

Comparación del balance radiativo suelo-atmósfera en un sitio urbano y uno rural de la ciudad de Puebla

J. Adrián Álvarez-Pérez¹ (QEPD), Raquel Elisa Hernández-Parra², Adalberto Tejeda- Martínez², Gabriel Balderas-Romero³, Juan Pablo Báez-Vázquez³

¹Estudiante de Maestría en Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana

²Grupo de Climatología Aplicada de la Universidad Veracruzana

³Departamento de Investigaciones Arquitectónicas y Urbanísticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

email: raquelelisahernandezparra@gmail.com, atejeda.martinez@gmail.com

Resumen

No obstante que el clima de la ciudad de Puebla y sus alrededores ha sido estudiado ampliamente, prevalece la pregunta sobre los efectos de la urbanización en el balance radiativo suelo-atmósfera. Este trabajo evalúa las componentes de la radiación (onda larga y corta tanto entrantes como salientes), mediante campañas de mediciones realizadas en el año 2022, para comparar los balances radiativos de un sitio urbano contra uno rural, antes (18 de febrero al 20 de marzo), durante (19 de agosto al 20 de septiembre) y después (20 de octubre al 23 de noviembre) de la temporada de lluvias.

En el sitio rural durante todos los periodos analizados, las componentes del balance de radiación resultaron de menor magnitud que en el sitio urbano. El máximo de radiación neta se observó en el sitio urbano durante el periodo seco. Sin embargo, la diferencia máxima de radiación neta entre los sitios urbano y rural se observó en el periodo de octubre-noviembre, con valores de 4.75 MJm^{-2} durante el periodo seco después de la temporada de lluvias.

La radiación de onda corta incidente ($\downarrow RC$) tuvo su máximo antes de la temporada de lluvia (febrero-marzo) en el sitio rural. La pérdida máxima por reflexión fue en este mismo periodo en la zona urbana ($\uparrow RC$), se dio el máximo de radiación de onda larga incidente ($\downarrow RL$) en la zona urbana y la máxima emisión ($\uparrow RL$) en el sitio de medición rural.

En el sitio de medición rural se observó el mínimo de $\downarrow RC$ posterior a la temporada de lluvias. El mínimo de $\uparrow RC$ y $\downarrow RL$ se observaron en agosto en Azumiatla. El mínimo de $\uparrow RL$ se observó en la zona urbana en el periodo octubre-noviembre.

Con respecto al balance radiativo diurno, se registró mayor radiación neta en la estación urbana en comparación con la rural.

Palabras clave: clima urbano, balance radiativo, ciudad de Puebla

Abstract

Although the climate of the city of Puebla and its surroundings has been extensively studied, the question of the effects of urbanization on the soil-atmosphere radiative balance prevails. This work evaluates the radiation components (incoming and outgoing longwave and shortwave), by means of measurement campaigns carried out in 2022, to compare the radiative balances of an urban versus a rural site, before (February 18 to March 20), during (August 19 to September 20) and after (October 20 to November 23) the rainy season.

In the rural area, during all the periods analyzed, the radiation balance components were of a smaller magnitude than in the urban area. The maximum net radiation was observed at the urban site during the dry period. However, the maximum difference in net radiation between the urban and rural areas was observed in the October-November period, with values of 4.75 MJm^{-2} during the dry period after the rainy season. Incident shortwave radiation ($\downarrow \text{RC}$) had its maximum before the rainy season (February-March) at the rural site. The maximum reflection loss was in this same period in the urban area ($\uparrow \text{RC}$), also the maximum incident longwave radiation ($\downarrow \text{RL}$) was in the urban area and the maximum emission ($\uparrow \text{RL}$) was in the rural measurement site.

The minimum $\downarrow \text{RC}$ following the rainy season was observed at the rural measurement site. The minimum of $\uparrow \text{RC}$ and $\downarrow \text{RL}$ were observed in August at Azumiatla. The minimum of $\uparrow \text{RL}$ was observed in the urban area in the October-November period.

With respect to the diurnal radiative balance, higher net radiation was recorded at the urban station compared to the rural station.

Keywords: urban climate, radiative balance, Puebla City

Introducción

La transmisión de energía del Sol a la Tierra es casi en su totalidad radiativa. Cierta flujo de masa está asociado con las partículas del viento solar, pero su cantidad de energía es pequeña en comparación con la que llega en forma de fotones. Para calcular el balance energético de la Tierra, podemos solo considerar los intercambios de energía radiativa (Hartmann, 2016), o más específicamente, el flujo vertical de energía radiativa en la atmósfera, que es uno de los procesos más importantes para explicar el comportamiento climático.

El balance de radiación es el equilibrio entre la energía absorbida contra la reflejada y emitida por la superficie terrestre, es decir, la diferencia de la radiación neta de onda corta y la radiación neta de onda larga (Beringer, 2000).

Hartmann (2016) menciona que los flujos radiativos y no radiativos entre la superficie, la atmósfera y el espacio son factores determinantes del clima, pues la superficie se calienta a partir de un balance de radiación neta (Q^*) positivo durante el día y se enfría durante la noche ya que el balance de radiación es negativo.

Los flujos de energía a través de la superficie son tan importantes para el clima como los flujos en la parte superior de la atmósfera, puesto que el balance de energía en el continente determina la cantidad de energía disponible para evaporar el agua del suelo y para aumentar o disminuir la temperatura del suelo y del aire.

El balance energético en la superficie es más complejo que el balance en la parte superior de la atmósfera porque requiere considerar los flujos de energía por conducción, por convección de calor y de la humedad a través del movimiento de fluidos, así como por radiación. Además, en la escala local depende de la insolación, de las características de la superficie como la humedad, la cubierta vegetal, el albedo y de las condiciones superpuestas de la atmósfera. El balance energético de la superficie está íntimamente relacionado con el ciclo hidrológico. Evaluar el balance energético de la superficie es entonces fundamental para comprender el clima y su dependencia de los forzamientos radiativos (Hartmann, 2016).

La ciudad de Puebla, como consecuencia de su crecimiento urbano, ha experimentado alteraciones en su balance energético, lo cual afecta directamente las variables meteorológicas

locales. Por ello, estudiar el balance radiativo se vuelve fundamental para mitigar impactos como sequías, islas de calor y efectos adversos en el sector energético, entre otros. En consecuencia, es esencial comprender las diferencias entre los entornos urbanos y rurales, reconociendo cómo las variables meteorológicas responden de manera diferente en ambos contextos. Este conocimiento permite tomar decisiones informadas para enfrentar los retos derivados del cambio en el uso del suelo y sus efectos sobre el clima local.

Antecedentes

De acuerdo con Hartmann (2016), de la radiación solar incidente, una fracción es reflejada hacia el espacio debido al albedo planetario medio global, cuyo valor aproximado es de 0.29. El balance energético medio global de la Tierra a principios del siglo XXI, según Wild *et al.* (2017), muestra que en el tope de la atmósfera la radiación solar entrante es de alrededor de 340 Wm^{-2} , mientras que la radiación terrestre emitida es de alrededor de 398 Wm^{-2} ; la diferencia es almacenada por el océano. De los 340 Wm^{-2} de radiación solar absorbida por el sistema climático, solo alrededor de una tercera parte es absorbida en la atmósfera y dos terceras partes en la superficie.

Más del 90% de la emisión terrestre al espacio se origina en la atmósfera y solo alrededor de 20 Wm^{-2} (~6 %) provienen de la propia superficie.

Para el caso del balance de radiación en superficie, la radiación neta (Q^*) es la variable de mayor interés, la cual es la diferencia entre la radiación solar entrante menos la radiación reflejada y la emitida por la superficie; en otras palabras, es la radiación almacenada en el sistema superficie-atmósfera y puede ser escrita como en la ecuación 1 (Oke *et al.*, 1999).

$$Q^* (\downarrow RC + \downarrow RL) - (\uparrow RC + \uparrow RL) \quad (1)$$

Donde $\downarrow RC$ y $\uparrow RC$ son la radiación de onda corta incidente y reflejada, $\downarrow RL$ y $\uparrow RL$ representan la radiación de onda larga incidente y emitida por la superficie.

Sobre el continente, solo una pequeña fracción (20%) de la radiación neta en la superficie se conduce hacia abajo durante el día, o se almacena calentando la superficie. Como resultado, la temperatura de la superficie se eleva rápidamente después del amanecer, hasta que se alcanza un equilibrio aproximado entre la radiación neta y la evaporación de agua (o la transpiración de las plantas), denominado flujo de calor latente (Sánchez, 1992).

Gay (1979) estudió el balance de radiación en cuatro ecosistemas en Bend, Oregon, E.U.A. (bosque, desierto, prado y pantano), y comparó las diferencias en el balance de radiación en condiciones de cielos despejados. Obtuvo que, bajo condiciones uniformes (días despejados de verano) la zona de bosque absorbe 90% de la radiación solar, el pantano 89%, seguido por el desierto 77% y el prado 75%. La absorción fue mayor en áreas con un dosel de mayor espesor.

Posteriormente, Ho-Taek Park *et al.* (1999), en un estudio realizado en la ciudad de Seto, Japón, obtuvieron que durante el día el balance de radiación es dominado primordialmente por la radiación neta de onda corta, la cual depende del albedo, la temperatura superficial y los coeficientes de transmisión de energía en la atmósfera y las nubes para esta franja del espectro. Por la noche el balance es dominado principalmente por la radiación neta de onda larga y es controlado fundamentalmente por la temperatura y la emisividad de las superficies.

Otro análisis del balance de radiación fue llevado a cabo por Akshay *et al.* (2016), quien investigó la contribución de cada componente del balance con el fin de observar sus variaciones diurnas y estacionales en la ciudad de Bangalore, India, con mediciones realizadas en el año 2014. El trabajo

mostró la relevancia de la radiación de onda corta en el balance de radiación neta, especialmente en estaciones húmedas.

Según Hernández *et al.* (1991) los inicios del estudio de la radiación solar en nuestro país pueden situarse en los años 1911 a 1928, cuando el investigador de origen polaco Ladislaw Gorczynski realizó mediciones con un sensor desarrollado por él mismo –la termopila de Gorczynski– en el Observatorio Meteorológico de Tacubaya de la Ciudad de México y otros sitios del país, los cuales produjeron “datos comparativos de las intensidades de la radiación solar que se registraron en diversas localidades del país con distintos climas y latitudes” (que los autores no especifican).

El presente trabajo parte de la hipótesis de que los fenómenos meteorológicos y la cobertura superficial en las zonas urbanas y rurales son un factor importante en las diferencias del balance de radiación solar (entrante y saliente de onda corta y larga), por lo que prevalece la pregunta sobre las características cuantitativas del balance radiativo, bajo la influencia de las superficies en las temporadas seca y húmeda en las zonas urbanas y rurales de la ciudad de Puebla y sus inmediaciones.

Según Balderas-Romero (2018), el estudio de la climatología urbana de la ciudad de Puebla se remonta al año 1970 con la tesis doctoral de Günter Gäb, partiendo del crecimiento de población en la región Puebla-Tlaxcala (Gaeb, 1970). En la década de los 90 se realizaron estudios para analizar el impacto del crecimiento urbano de la ciudad de Puebla en el clima local. Las investigaciones se realizaban bajo cuatro principales métodos: recorridos de medición, datos de estaciones fijas, sensores remotos y modelación de cambio climático.

Molina-Prior (2013) presenta el balance de radiación durante la temporada de secas para el centro de la ciudad de Puebla. La campaña

de medición realizada del 1 al 7 de abril de 2003 mediante estaciones meteorológicas fijas muestra que, al medio día, la radiación global, la compuesta por la radiación difusa (dispersión que sufre la radiación solar al atravesar algunos componentes de la atmósfera, incluidas las nubes) y la directa (la que no sufre dispersión atmosférica) fue en promedio de 943.14 W/m², la radiación neta de 575.5 W/m², el calor almacenado en superficie de 434.67 W/m², el calor sensible de 183.7 W/m², y el calor de evaporación de 5.2 W/m². Por la noche el promedio de calor almacenado en superficie fue de -124.15 W/m² (el signo negativo significa que el flujo es hacia abajo) y un valor extremo de -191.12 W/m²; la radiación neta promedio fue de -91.14 W/m² con un extremo de -104.6 W/m².

Realizar mediciones in situ del balance de radiación es fundamental para comprender la interacción de la energía con el entorno de manera precisa y en tiempo real. Aunque las aproximaciones mediante percepción remota son valiosas, las mediciones en superficie proporcionan datos específicos y representativos, lo que permite una evaluación más exacta del comportamiento energético en relación con el clima local. Además, los estudios que comparan superficies rurales y urbanas ofrecen información clave para entender cómo las distintas áreas absorben y emiten energía, lo que resulta crucial para optimizar el diseño urbano y mejorar la calidad de vida de los habitantes en entornos urbanos.

Zona de estudio

El municipio de Puebla se centra en las coordenadas geográficas 19°03'05"N, 98°13'04"O y a una altitud aproximada de 2,135 msnm. Cuenta con una población de 1,692,181 habitantes, en una superficie de 535.3 km², que arroja una densidad de población de 3,163 hab./km² (INEGI, 2021).

La Secretaría de Protección Civil y Gestión Integral de Riesgos (2018) expresa en el Programa

Municipal de Protección Civil de Puebla 2018-2021, que el clima dominante es templado subhúmedo, cuyo régimen de lluvias tiene un máximo en verano. La temperatura mínima promedio es de 5°C observada en la parte alta del volcán Malinche. El centro y sur del municipio tienen una temperatura media anual de 17.1°C y 16°C respectivamente. El mes más frío del año es enero, mientras que las temperaturas más altas ocurren en mayo, iniciando en este mismo mes la temporada de lluvias que culmina en octubre, con dos máximos, uno en junio y el otro en septiembre. Con el aumento de nubosidad a partir del mes de junio la temperatura comienza a descender progresivamente (Figura 1).

La humedad relativa tiene un valor promedio de 45% en los meses secos y en los meses de lluvias alrededor del 72%, con un promedio anual de 65.4%. (Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (s. f.)).

Instrumentos y métodos

Las variables que se midieron para este trabajo se enlistan en la Tabla 1. Se usaron radiómetros (NR01), que miden el flujo de la radiación de onda larga (RL) y corta (RC) y establece el balance entre la radiación incidente de onda corta más la infrarroja (de onda larga) menos la onda corta y larga infrarroja reflejada y emitida por

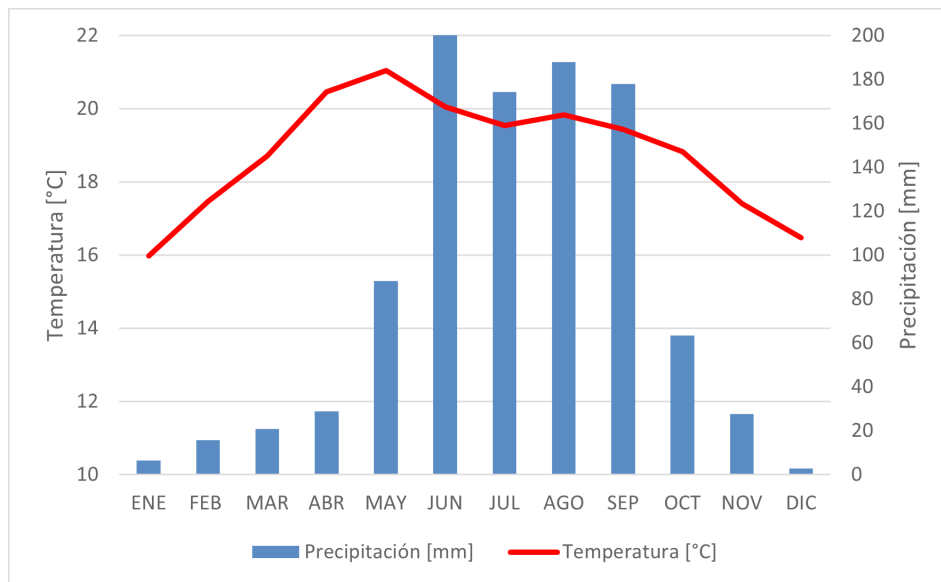


Figura 1. Climograma observatorio meteorológico de Puebla (1981-2010). Elaboración propia a partir de datos de la Conagua (SMN, 2010).

Tabla 1. Definiciones de las variables de estudio según Wallace (2005). Fueron medidas en Wm^{-2}

Variable	Descripción
Radiación solar de onda corta entrante ($\downarrow RC$)	Radiación emitida por el Sol incidente en la superficie de la Tierra a una longitud de onda menor a 3 μm .
Radiación solar de onda corta saliente ($\uparrow RC$)	Radiación reflejada por la superficie de la Tierra de una longitud de onda de menos de 3 μm
Radiación solar de onda larga entrante ($\downarrow RL$)	Radiación entrante cuya longitud de onda es superior a 3 μm .
Radiación solar de onda larga saliente ($\uparrow RL$)	Radiación saliente cuya longitud de onda es superior a 3 μm .

la superficie. El NR01 incluye cuatro detectores: dos con la cara hacia arriba y dos hacia abajo, y requiere mantenimiento limitado. Además, permite calcular algunos parámetros como el albedo para la onda corta, temperatura del aire, temperatura de la superficie y radiación neta.

Los sensores de RC, también llamados piranómetros (tipo SR01), miden longitudes de onda entre 300 y 2,800 nm; los sensores de RL son llamados pirgeómetros (tipo IR01) y miden longitudes de onda entre 4,500 y 50,000 nm. Para calcular las temperaturas del aire y la superficie, se incluye un sensor de temperatura PT100 conectado a los sensores mencionados. (Campbell-Scientific Inc, 2014 b).

Los datos son almacenados y preprocesados en el datalogger CR3000. Debe tomarse en cuenta que una falla en cualquier parte del sistema

puede llevar a datos dudosos o bien, a su pérdida (Campbell - Scientific Inc. 2014 a). Para los periodos de datos que se reportan aquí se descarta la presencia de datos dudosos.

Se instalaron dos estaciones de balance de radiación en la ciudad de Puebla (Figuras 2 y 3), una en el edificio Carolino (Ca, en los sucesivos) en el centro de la ciudad ($19^{\circ}02'44''$ N, $98^{\circ}11'44''$ W, 2,135 msnm), y la otra en San Andrés Azumiatla (Az, en los sucesivos) ($18^{\circ}54'44''$ N, $98^{\circ}14'31''$ W, 2,142 msnm), un ambiente rural en la periferia de la ciudad. Cada estación incluye dos piranómetros y dos pirheliómetros que miden radiación solar de onda larga y corta tanto entrante como saliente y un datalogger que almacena los datos. Los instrumentos se colocaron entre 15 y 20 metros sobre el nivel de la calle en torres verticales, lo que permitió obtener una base de datos de las diferentes variables registradas cada 15 minutos.

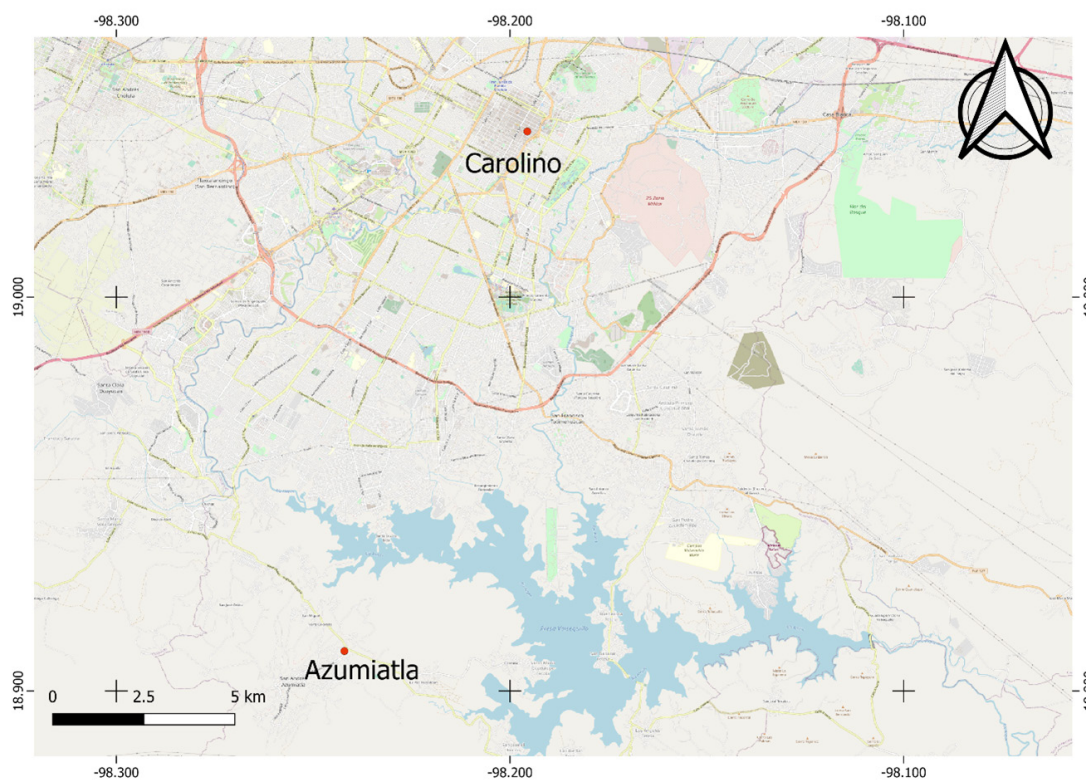


Figura 2. Ubicación de las estaciones de medición de balance radiación en la ciudad de Puebla. *Estación edificio Carolino (Ca, zona urbana):* $19^{\circ}02'44''$ N, $98^{\circ}11'44''$ W, 2,135 msnm y *estación San Andrés Azumiatla (Az, zona rural):* $18^{\circ}54'44''$ N, $98^{\circ}14'31''$ W, 2,142 msnm.

Se seleccionaron tres periodos de datos correspondientes a: 1) la época de secas invernal, del 18 de febrero al 20 de marzo de 2022 (2,880 observaciones); 2) mitad de la época de lluvias, del 19 de agosto al 20 de septiembre de 2022 (3,168 observaciones); 3) época de secas después de la época de lluvias, del 20 de octubre al 23 de noviembre de 2022 (3,072 observaciones).

La evaluación de las componentes del balance radiativo requiere el cálculo de las áreas fuente de los sensores de medición. Los radiómetros tienen un campo de visión prácticamente hemisférico hacia arriba, como un ojo de pez; hacia abajo el área de influencia de los datos de radiación se considera como la base de un cono con vértice en el sensor. Para determinar la distancia máxima y el área visual de la señal de los sensores de radiación que apuntan hacia abajo, se utiliza una función trigonométrica, dependiendo del ángulo de visión de éste (Marcolla & Cescatti, 2018).

Se considera un ángulo de 85° alrededor de la vertical, de modo que el radio máximo en la horizontal será calculado con la Ecuación 2:

$$R_{max} = (\tan 85^\circ)h \quad (2)$$

donde h es la altura a la que se coloca el sensor (Schmid, 1997).

Las herramientas de cómputo utilizadas fueron LoggerNet de Campbell-Scientific Inc., para la programación de los equipos, y Excel de Microsoft para el procesamiento de los datos.

Resultados

La Tabla 2 y las Figuras 4, 5 y 6 resumen la energía por unidad de área (MJm^{-2}) para los tres periodos de estudio, tanto en la estación urbana ubicada en el edificio Carolino, como en la rural en San Andrés Azumiatla.

En la Figura 4 se muestra que durante la campaña de medición febrero-marzo se alcanzó la radiación más alta en todas sus componentes en ambos sitios de medición. La radiación de onda corta incidente ($\downarrow\text{RC}$) máxima de ambas estaciones se registró en la estación Ca de 27.37 MJm^{-2} (Tabla 2). Durante este periodo previo a la temporada de lluvia, el sitio urbano superó al sitio rural en cada componente de radiación a excepción de la reflejada de onda larga ($\uparrow\text{RL}$), puesto que el máximo se observó en Az de 2.38 MJm^{-2} . También se observó la pérdida máxima de los tres periodos de estudio por reflexión de onda corta ($\uparrow\text{RC}$) de -8.01 MJm^{-2} para la zona urbana. En cuanto a la radiación neta (Q^*), la máxima se observó en el sitio urbano de 31.22 MJm^{-2} .



Figura 3. Área fuente de la estación urbana en el edificio Carolino (izquierda) y de la estación rural San Andrés Azumiatla (derecha).

En la Figura 5 se observa que durante la temporada de lluvia (agosto-septiembre) la diferencia entre los sitios urbano y rural es la más baja en todas las componentes del balance de radiación (Tabla 2). En esta figura se registró el mínimo de $\uparrow RC$ y de $\downarrow RL$ de -4.54 y 5.41 MJm^{-2} , respectivamente. La componente de $\uparrow RL$ resultó mayor en Az de -2.10 MJm^{-2} . Respecto a la radiación neta en la época lluviosa, el sitio urbano superó por 1.8 MJm^{-2} al sitio rural, según se muestra en la Tabla 2.

Durante el periodo de secas posterior a la temporada de lluvia, agosto- noviembre (Figura 6), la radiación de onda corta incidente ($\downarrow RC$) y reflejada ($\uparrow RC$) fueron mayores en el sitio urbano. Por otro lado, la radiación de onda larga, la componente incidente ($\downarrow RL$), resultó mayor en la Ca, mientras que la reflejada ($\uparrow RL$) fue mayor en la Az. La radiación neta (Q^*) en Ca fue de 25.21 MJm^{-2} (Tabla 2).

De la Figura 7 se observa que para la zona rural en todos los periodos la radiación es de menor

magnitud que en la estación urbana en todas las componentes. La que presentó la diferencia mínima de todas las componentes de radiación y de todas las campañas de medición fué de 0.68 MJm^{-2} más en el sitio urbano. Las máximas diferencias de radiación neta (Q^*) se observaron en el periodo de secas posterior a la de lluvia (octubre-noviembre) alcanzando 4.75 MJm^{-2} (Tabla 2).

Los balances de radiación diarios comparando la zona rural con la zona urbana se muestra en las Figuras 8, 9 y 10 y, aunque el comportamiento en todas las temporadas es similar en la Figura 8, durante los meses previos a la temporada de lluvia se observa que la estación urbana alcanza amplitudes superiores en la mayoría de las componentes del balance, exceptuando la radiación de onda larga incidente ($\downarrow RL$) y reflejada ($\uparrow RL$). Además se observaron variaciones en la radiación de onda corta incidente ($\downarrow RC$) y neta (Q^*) después de medio día en el caso de la estación Az.

Tabla 2. Energía por unidad de área [MJm^{-2}] en cada componente de la radiación solar entre el sitio Urbano (Ca) y el sitio Rural (Az), durante tres periodos en el 2022

COMPONENTE	PERIODO	URBANA (Ca)	RURAL (Az)	DIFERENCIA (Ca-Az)
$\downarrow RC$	Febrero- Marzo	27.37	24.63	2.74
	Agosto- Septiembre	20.55	19.87	0.68
	Octubre-Noviembre	21.87	18.71	3.16
$\uparrow RC$	Febrero- Marzo	-8.01	-6.10	-1.91
	Agosto- Septiembre	-5.39	-4.54	-0.85
	Octubre-Noviembre	-5.91	-4.81	-1.1
$\downarrow RL$	Febrero- Marzo	13.23	11.22	2.01
	Agosto- Septiembre	6.20	5.41	0.79
	Octubre-Noviembre	10.11	8.21	1.9
$\uparrow RL$	Febrero- Marzo	-1.38	-2.38	1
	Agosto- Septiembre	-0.92	-2.10	1.18
	Octubre-Noviembre	-0.85	-1.65	0.8
Q^*	Febrero- Marzo	31.22	27.37	3.85
	Agosto- Septiembre	20.44	18.64	1.8
		25.21	20.46	4.75

Durante la temporada de lluvia se observó que los flujos de radiación de onda corta $\downarrow RC$ y por ende, la neta (Q^*), muestran durante el día la mayor variación de todas las temporadas. También se observa que la componente de onda corta reflejada ($\uparrow RC$) tiene mayor amplitud en la zona urbana que en la zona rural.

Posterior a la temporada de lluvia, la estación urbana Ca superó a la rural en la energía de onda corta incidente ($\downarrow RC$) y neta (Q^*) en alrededor por 200 MJm^{-2} y además, la amplitud de la radiación de onda corta saliente también fue mayor en la zona urbana. Las variaciones en esta temporada se mantienen, debido a que aún se pueden observar precipitaciones, sin embargo, las variaciones son más notorias en la zona rural.

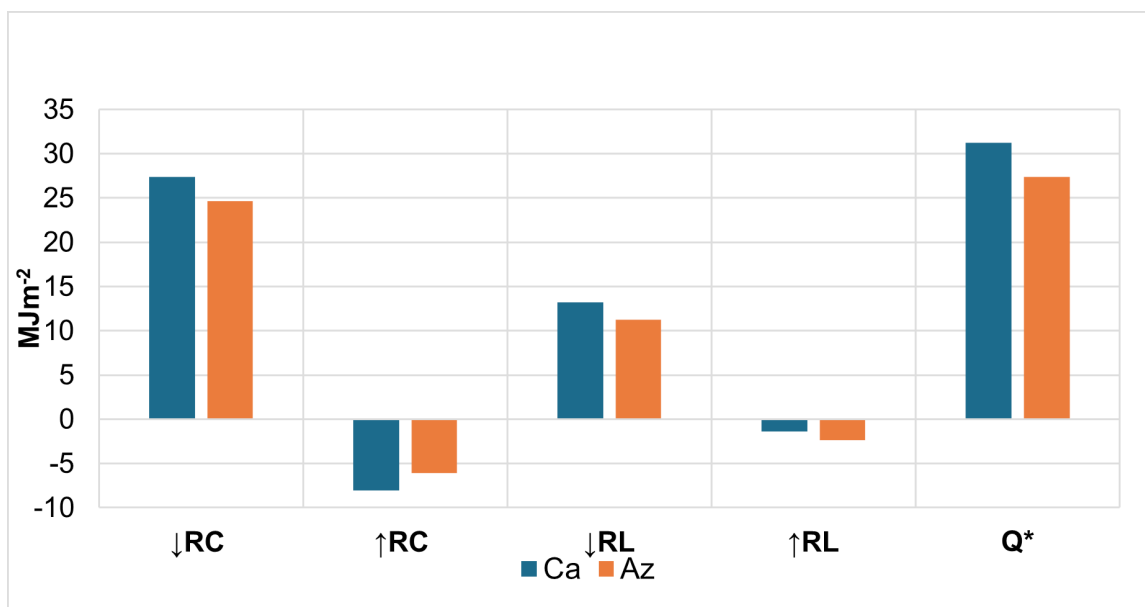


Figura 4. Energía por unidad de área [MJm^{-2}] en cada componente de la radiación solar entre el sitio urbano (Ca) y el sitio rural (Az), durante febrero-marzo 2022

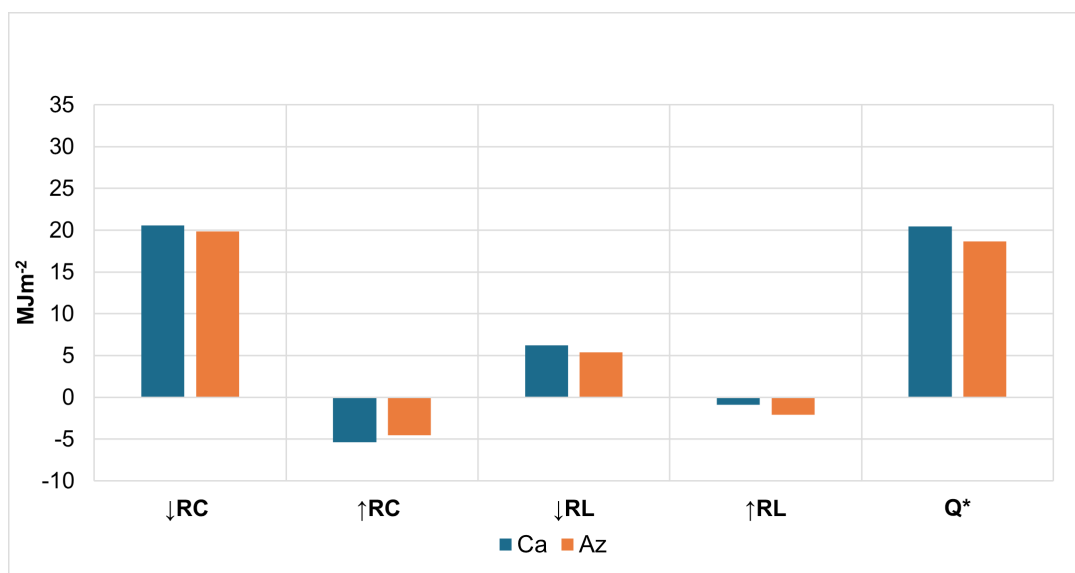


Figura 5. Energía por unidad de área [MJm^{-2}] en cada componente de la radiación solar entre el sitio urbano (Ca) y el sitio rural (Az), durante agosto-septiembre 2022

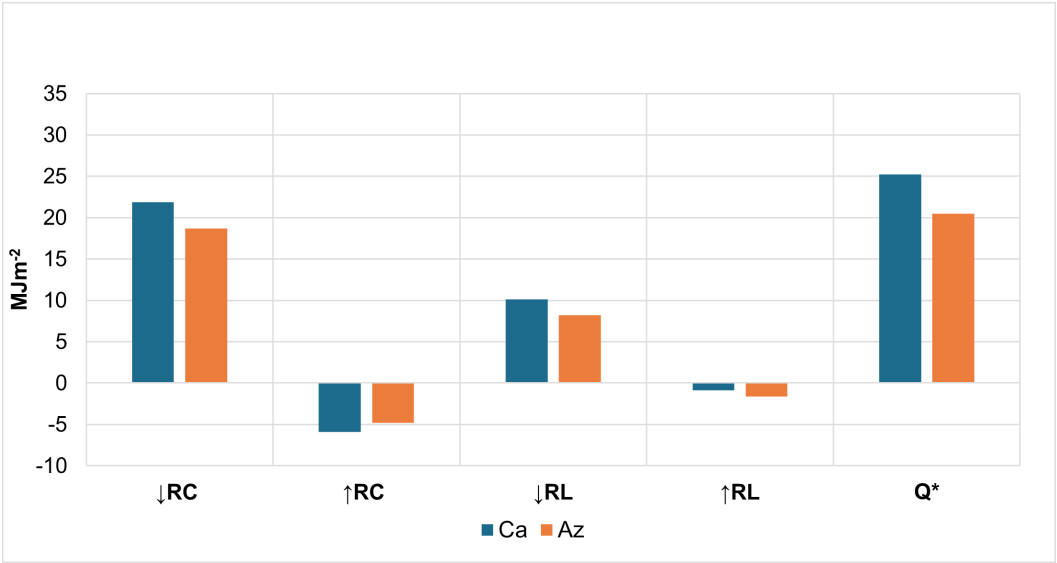


Figura 6. Energía por unidad de área [MJm⁻²] en cada componente de la radiación solar entre el sitio urbano (Ca) y el sitio rural (Az), durante octubre-noviembre 2022

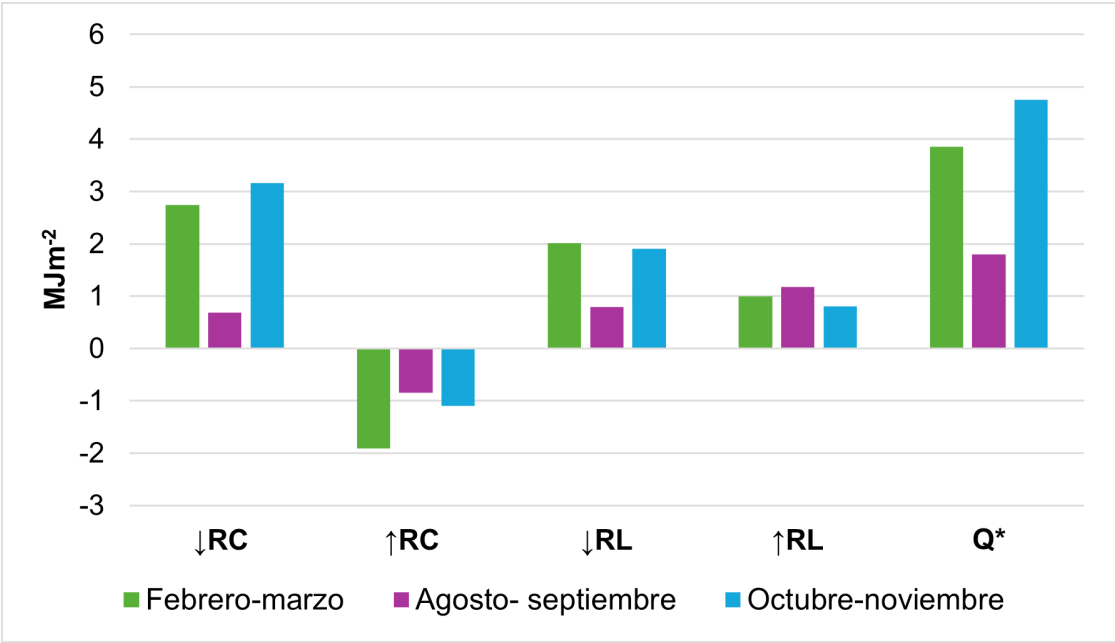


Figura 7. Diferencias de radiación por unidad de área [MJm⁻²] en cada componente de la radiación solar del sitio urbano (Ca) menos el sitio rural (Az)

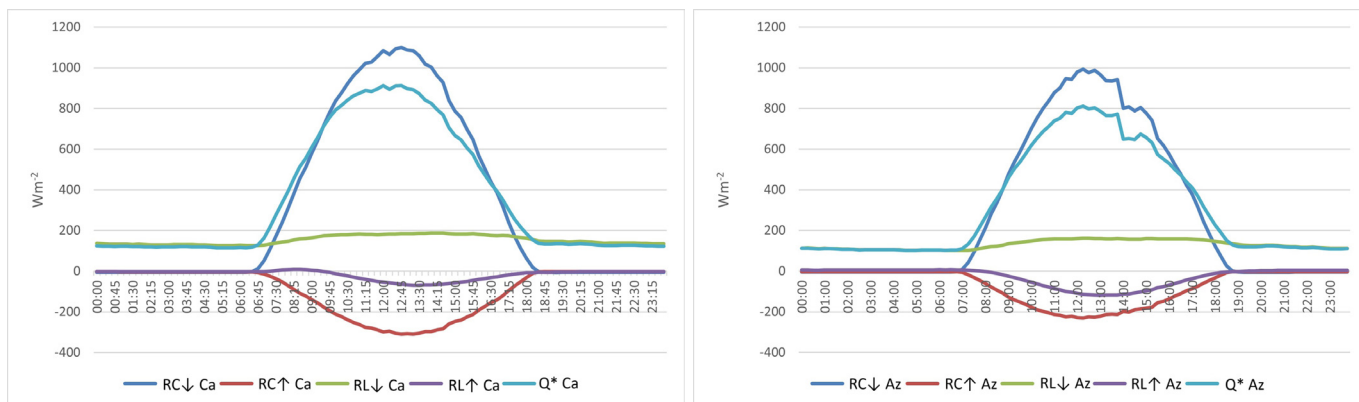


Figura 8. Componentes del balance radiativo en la estación Ca (izquierda) y Az (derecha) durante febrero-marzo 2022.

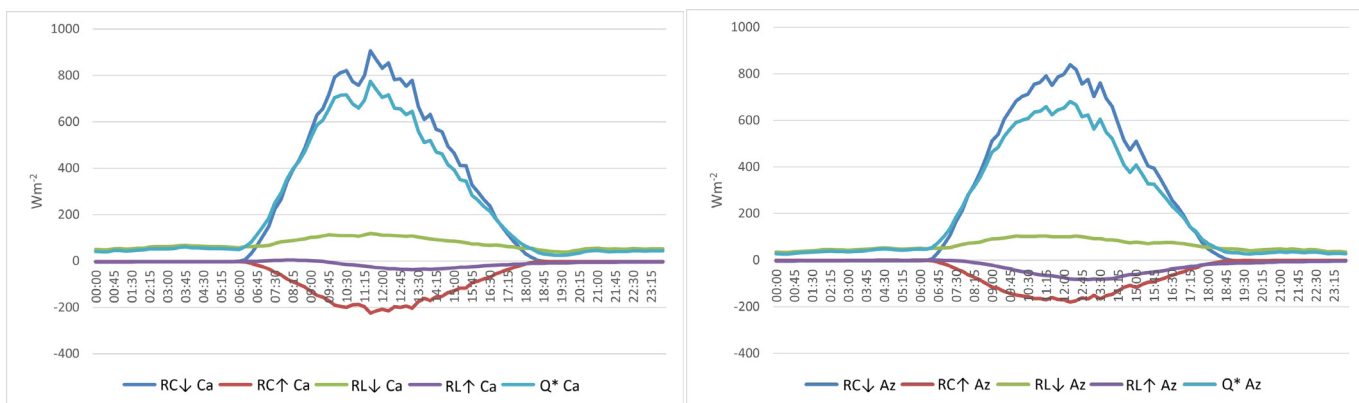


Figura 9. Componentes del balance radiativo en la estación Ca (izquierda) y Az (derecha) durante agosto-septiembre 2022.

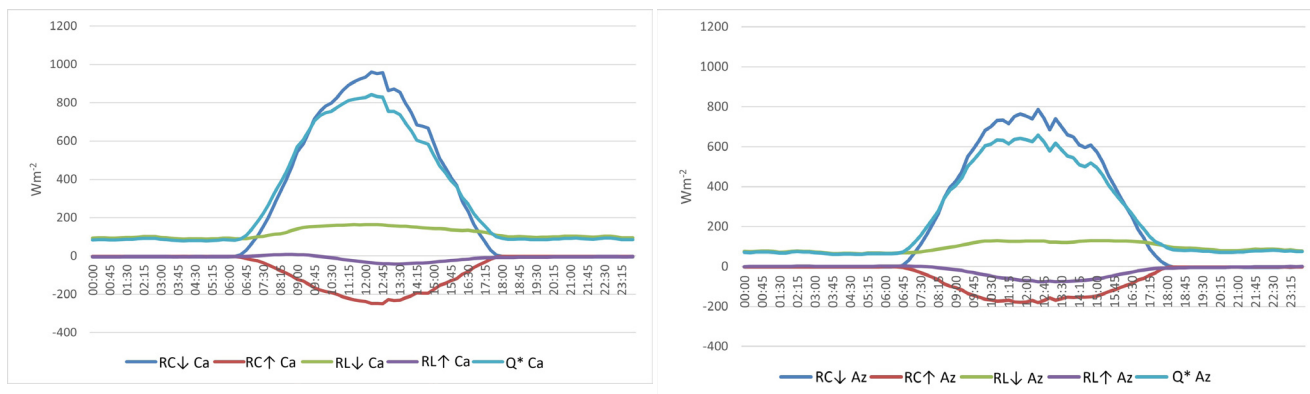


Figura 10. Componentes del balance radiativo en la estación Ca (izquierda) y Az (derecha) durante octubre-noviembre 2022.

Comentarios finales

La radiación neta resulta mayor en la zona urbana para todos los periodos estudiados, observándose una disminución en la temporada de secas posterior a la temporada de lluvias. Con respecto al balance radiativo diurno se destaca que se registró mayor radiación neta en la estación urbana en comparación con la rural. Este comportamiento posiblemente sea similar en otras ciudades del altiplano del país, cuyo ambiente rural es más árido que el urbano, como es el caso de Az versus Ca.

Agradecimientos

Agradecemos a Omar Castro Díaz por sus valiosas sugerencias y al revisor anónimo por sus observaciones pertinentes, que contribuyeron de manera significativa.

Referencias

- Akshay M., Sunil-Kumar M. B., Charan-Kumar K., Gudennavar S. B., Nagaraja K. (2016). Surface radiation Budget over Bengaluru. *Science Spectrum*, v. 1(4), 455-461.
- Balderas-Romero, G. (2018). Efectos climáticos de la urbanización en la Zona Metropolitana de Puebla En: Santillán-Soto, N., García-Cueto, O.R., coordinadores, *Ambiente urbano 2050*. Mexicali, Baja California: Universidad Autónoma de Baja California. ISBN: 9786076074930.
- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (s. f.). *Clima y Urbanización en el Valle de Puebla, Estaciones de la RAMM*. BUAP. Recuperado de: <http://urban.diau.buap.mx/estaciones.ph>.
- Beringer, J., and Tapper, NJ. (2000). The influence of subtropical cold fronts on the surface energy balance of a semi-arid site. *Journal of Arid Environments*, 44(4), 437-450. <https://doi.org/10.1006/jare.1999.0608>.
- Campbell - Scientific Inc. (2014 a). *Instruction manual CSAT3 Three-Dimensional Sonic Anemometer*. 72 p.
- Campbell - Scientific Inc. (2014 b). *Instruction manual NR01 Four – Component Net Radiation Sensor*. 46 p.
- Gay, L.W. (1979). Radiation budgets of desert, meadow, forest and marsh sites. *Archiv. für Meteorologie, Geophysik und bioklimatologie*. Vol. 27, 249-259.
- Gaeb, G. M. (1970). Investigaciones del clima de la ciudad de Puebla. *Revista Comunicaciones de la Fundación Alemana*, 2, 25-43.
- Gay, L. W. (1979). Radiation budgets of desert, meadow, forest and marsh sites. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und bioklimatologie*, v. 27, 249-259.
- Hartmann, D. (2016). *Global physical climatology*. 2nd ed. Nueva York. 485 p.
- Hernández, E., A. Tejeda y S. Reyes. (1991). *Atlas solar de la República Mexicana*. Universidad de Colima/ Universidad Veracruzana. México, 154 p.
- Ho-Taek Park, Hattori S., Tanaka T., Gyung-Soo C., (1999). Seasonal variations in radiation and energy balance in a deciduous broad-leaved forest. *J. For. Res*, v.4, 261-269.
- INEGI (2021). *Panorama sociodemográfico de Puebla: Censo de Población y Vivienda 2020*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197940.pdf.
- Marcolla, B., and Cescatti, A. (2018). Geometry of the hemispherical radiometric footprint over plant canopies. *Theoretical and Applied Climatology*, 134, 981-990

Molina-Prior, S. (2013). Mediciones y estimaciones de balance energético en el sistema superficie/atmósfera de la Ciudad de Puebla. Tesis de licenciatura. Universidad Veracruzana, Veracruz. México.

Manuscrito recibido: 26 febrero 2025
Recepción del manuscrito corregido: 25 abril 2025
Manuscrito aceptado: 30 abril 2025

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

Sánchez, M. (1992). Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración 1st ed. Logroño (España): Geoforma ediciones. (p. 3-13).

Schmid, H.P. (1997). Experimental design for flow measurements: matching scales of observations and flows. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 87 (2-3), 179-200.

Secretaría de Protección Civil y Gestión Integral de Riesgos (2018). Programa Municipal de Protección Civil del Municipio de Puebla 2018-2021. https://memorias.pueblacapital.gob.mx/images/PMPC_Version_Final.pdf.

SMN (2020). Información y catálogo EMAS, consultado en octubre del 2021. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-emas>.

Wallace J.M. and Hobbs P.V. (2005). *Atmospheric Science. An Introductory Survey*. 2nd ed.

Wild, M., Ohmura, A., Schär, C., Müller, G., Folini, D., Schwarz, M., Hakuba, M.Z & Sanchez-Lorenzo, A. (2017). The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: A database for worldwide measured surface energy fluxes. *Earth System Science Data*, 9(2), 601-613. <https://doi.org/10.5194/essd-9-601-2017>.