

## RADIACIÓN INFRARROJA ATMOSFÉRICA EN SALTA Y POSIBLE INFLUENCIA URBANA

Frigerio, E., De Paul, I., Aparicio, D.  
CIUNSa - Departamento de Física  
Universidad Nacional de Salta  
Bolivia 5150 – 4400 - Salta  
Tel.: (0387) 4255424, (0387) 4255489. [depaul.irene@gmail.com](mailto:depaul.irene@gmail.com)

*Recibido 13/08/13, Aceptado 23/09/13*

**RESUMEN:** Las medidas de radiación IR realizadas en Salta en el período marzo-agosto de 2012 y mayo-julio de 2013 muestran valores comprendidos entre 252 y 431 W/m<sup>2</sup> que, para superficies con emisividad 0,95, representan un potencial de enfriamiento (radiación útil) entre 0 y 171 W/m<sup>2</sup>. La correlación entre emisividad y temperatura de rocío obtenida anteriormente para cielo claro sigue siendo buena con una dispersión menor al 4%. La influencia del ambiente urbano parece manifestarse no sólo en un aumento de las temperaturas sino también en un aumento de la radiación de cielo, de la temperatura de cielo, de la emisividad y una disminución de la radiación útil disponible como potencial de enfriamiento pasivo.

**Palabras clave:** Radiación IR, enfriamiento pasivo, radiación nocturna, emisividad, atmósfera, ambiente urbano.

### INTRODUCCIÓN

El conocimiento del potencial de enfriamiento pasivo basado en la emisión de radiación infrarroja al cielo (IR) tiene una importancia creciente a partir de su aplicación en distintos ámbitos, especialmente en el campo del uso racional de energía, como criterio de enfriamiento en el diseño de viviendas y otros dispositivos. En la Universidad Nacional de Salta se ha medido esta variable desde hace tiempo (Frigerio, 2001; Frigerio y Ávila Blas 2002; Frigerio, 2004; Busano y Frigerio, 2006 y 2007; Frigerio y Busano, 2007, Frigerio 2012). Los datos permitieron generar una base de datos de emisividad y radiación IR y conseguir una correlación para cielo claro de la emisividad en función de la temperatura de rocío que se ajusta a las mediciones en un 4 %, correlación que es válida para la ciudad de Salta y el valle de Lerma (Frigerio, 2001).

En el año 2012 el Dr. Frigerio continuó con las medidas de radiación IR en Salta hasta los primeros días de agosto, cuyos resultados y análisis no pudieron ser publicados debido a su fallecimiento, por lo que en el presente trabajo se presentan dichas medidas con el fin de continuar completando la base de datos y aportando al conocimiento del potencial de enfriamiento pasivo en el Valle de Lerma. Se procuró mantener la estructura en que se presentó la información en trabajos previos. En el año 2013 se recomenzaron las medidas a mediados de mayo, por lo que se presentan los resultados obtenidos hasta mediados de julio.

También se incluye en el presente trabajo medidas realizadas anteriormente por Frigerio en las que por algunos días se pudo medir simultáneamente la radiación infrarroja al cielo en dos ambientes diferentes: en la azotea de la Universidad Nacional de Salta, ubicada en las afueras de la ciudad, y en el techo de su vivienda dentro del ámbito urbano (figura 14). Si bien el número de medidas es escaso por los problemas que se presentaron con el sistema de adquisición de datos, el análisis de las diferencias observadas es un primer indicativo de la importancia del ambiente urbano en la determinación de variables que suelen emplearse en el diseño de viviendas y dispositivos solares, no sólo por la influencia de las construcciones que aumentan la temperatura (isla de calor) sino por la presencia de la capa de intercambio atmosférica que se modifica en un ambiente urbano (Bou-Zeid,2009).

### MEDICIONES

Las medidas de radiación IR se hicieron con pirgeómetros CGR3 de Kipp y Zonen, con sensibilidades de 6,63 y 10,29  $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$  respectivamente cuyos rangos espectrales se encuentran entre los 4 y 40  $\mu\text{m}$ , aproximadamente. La medida es indirecta porque un sensor provee un voltaje proporcional al intercambio de radiación entre el cielo (Rad cielo) en su campo de visión y el instrumento ( $\sigma T^4$ ) que se encuentra a temperatura T medida por un detector, con lo que se puede calcular la radiación IR medida (PIR2). Con estos datos se calculó la radiación que podría emitir una superficie con emisividad de 0,95 hacia el cielo, lo que se denominó *radiación útil* (Rútil). Se incluyen medidas de radiación solar hechas con un solarímetro que permiten separar los datos nocturnos de los diurnos.

Con un psicrómetro se midió temperatura ambiente de bulbo seco (Tbs) y de bulbo húmedo (Tbh), se calculó la humedad relativa (H%) y la temperatura de rocío (Tr), y con un termohigrómetro LOG 32 se realizó una medida directa de la temperatura de rocío (dew point). En el psicrómetro se emplearon termocuplas tipo T calibradas con un bloque calibrador y un termómetro de precisión 0,1°C con lo que el error de calibración es de orden de 0,3°C. Con ambas medidas se calculó la emisividad a partir de la correlación presentada en (Frigerio 2001) (*emis calc* y *emis nuevo*) y se las comparó con la

emisividad medida con el pirgeómetro (*emisividad*),  $\varepsilon = \text{PIR}2/(\sigma T_{bs}^4)$ , cuyo error medida es del orden del 2 %.

Se presentan a continuación en forma gráfica los datos mensuales de radiación, emisividad, temperatura y radiación útil correspondientes al mes de julio de 2012, y en las Tablas I y II los promedios mensuales del periodo marzo – julio/agosto de 2012. En el mes de abril hubo muchos problemas con el instrumental por lo que esos datos no se consideraron. Los datos de agosto incluyen sólo la primera semana, después de lo cual no se realizaron más medidas.

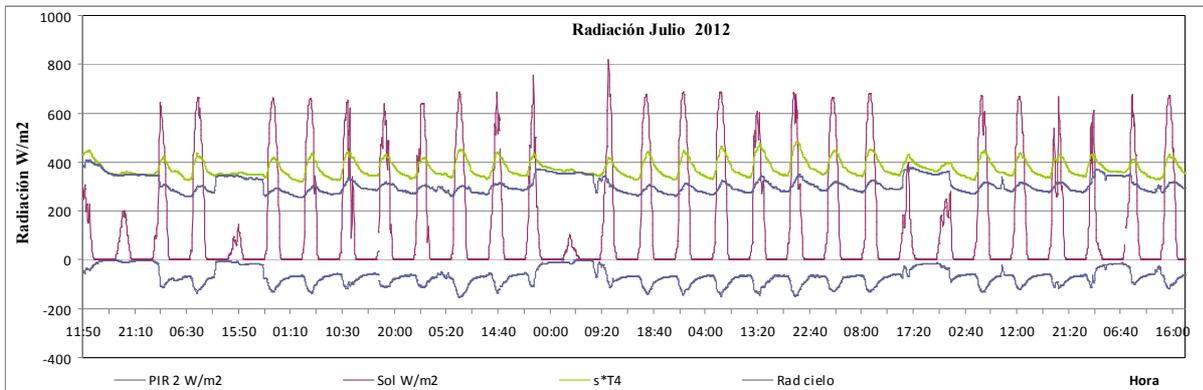


Figura 1. Radiación, datos diurnos y nocturnos de julio. Se observan cuatro intervalos con días de cielo cubierto y como consecuencia la radiación de cielo es prácticamente constante.

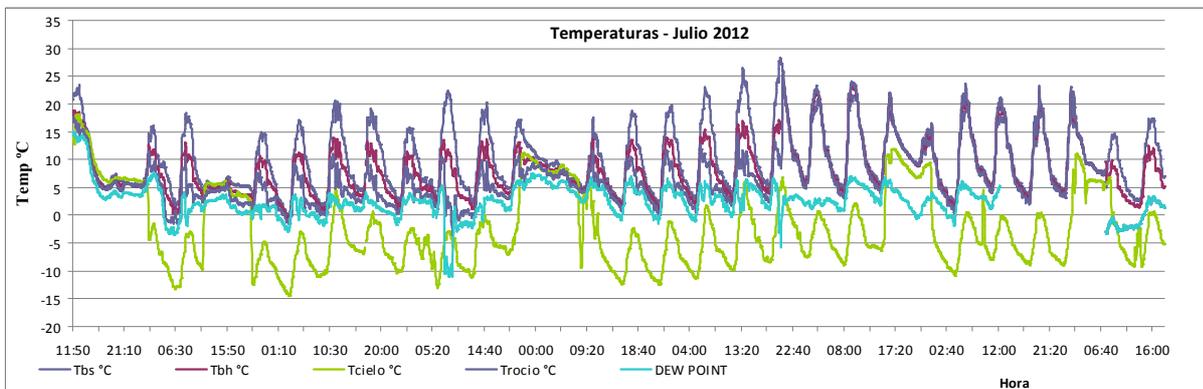


Figura 2. Temperaturas, datos diurnos y nocturnos de julio. En los intervalos con días nublados se observa cómo las temperaturas se aproximan a los valores de bulbo húmedo. Tr y Dew Point difieren en general en menos de 2°C.

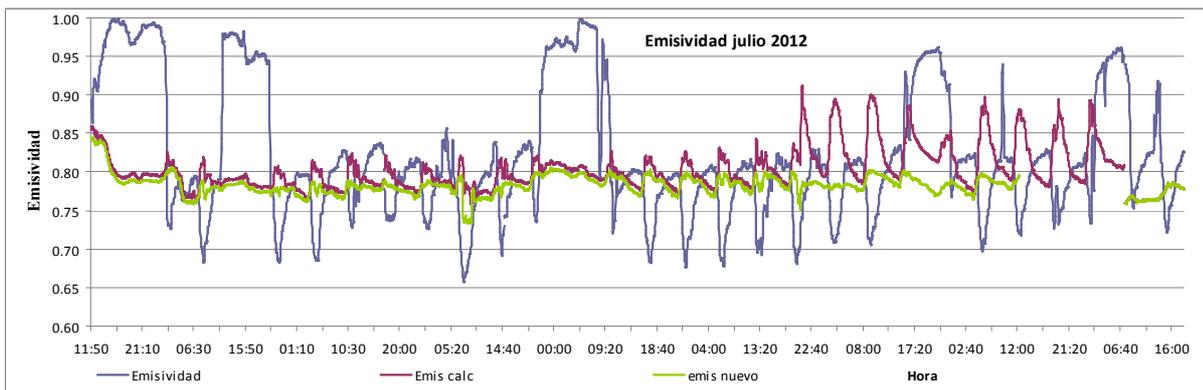


Figura 3. Emisividad, datos diurnos y nocturnos de julio. En los intervalos con días nublados se observa cómo los valores se aproximan a 1 debido a la presencia de nubes.

El resumen de los promedios mensuales de la radiación de cielo, la emisividad aparente de cielo, la temperatura equivalente de cielo y lo que podría emitir una superficie de emisividad alta,  $R_{\text{útil}}$ , se da en la Tabla I.

De las gráficas y de la Tabla I se aprecia que en el periodo analizado la radiación proveniente del cielo oscila entre los 250 y los 430  $\text{W}/\text{m}^2$ , mientras que la radiación útil oscila entre -28 y 122  $\text{W}/\text{m}^2$ , dependiendo de las condiciones meteorológicas y de la hora. Los valores negativos mínimos de  $R_{\text{útil}}$  indican que en esas condiciones no hay disponible potencial de enfriamiento pasivo.

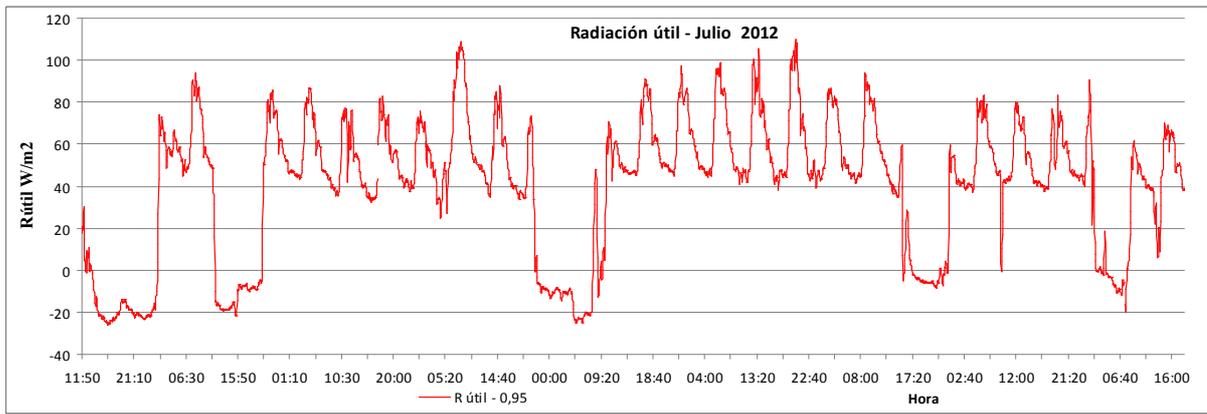


Figura 4. Radiación útil, datos diurnos y nocturnos de julio. Se observan que en los días de cielo nublado la radiación útil disminuye bruscamente.

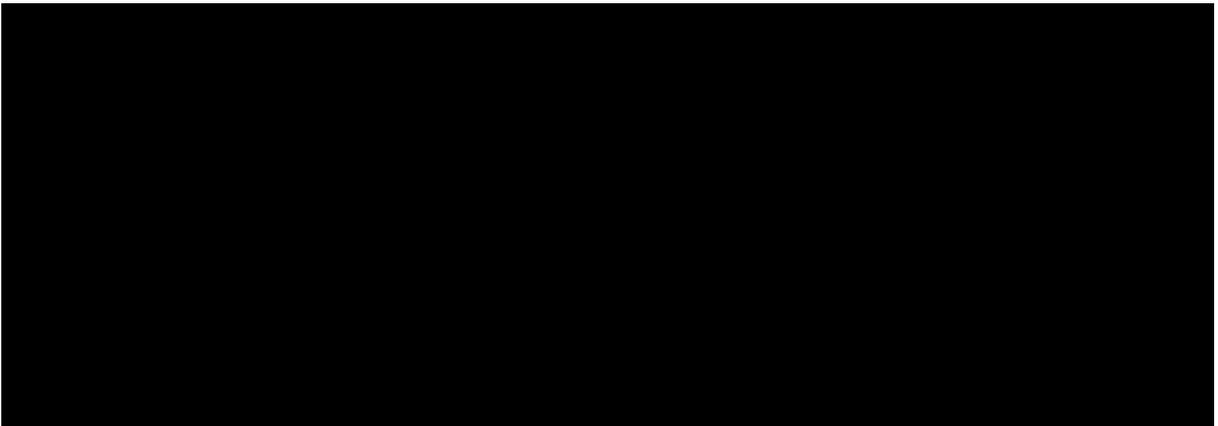


Tabla I. Resumen de los promedios mensuales de las medidas realizadas, su desviación estándar, máximos y mínimos del mes.

Los promedios se presentan en forma gráfica en las figuras siguientes que muestran cómo en la época seca, a partir de mayo, la radiación de cielo, la temperatura de cielo y la emisividad disminuyen, mientras que el potencial de enfriamiento aumenta.

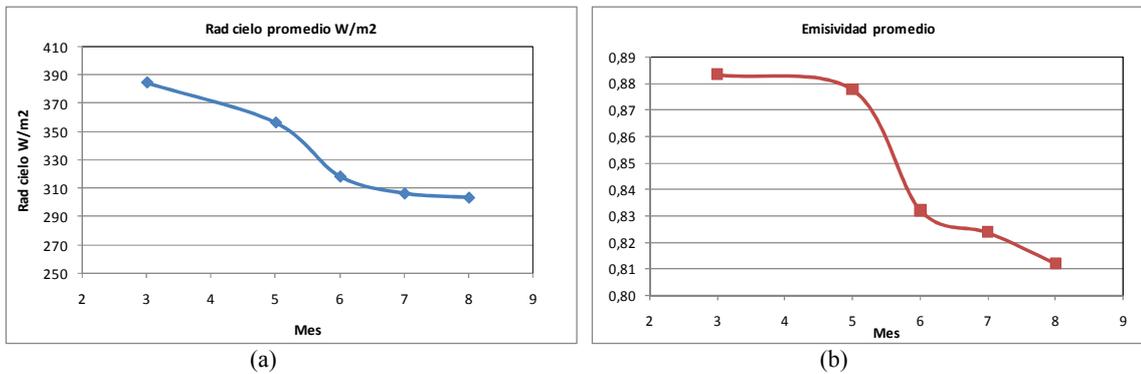


Figura 5. Promedio mensual a) de la radiación nocturna y b) de la emisividad.

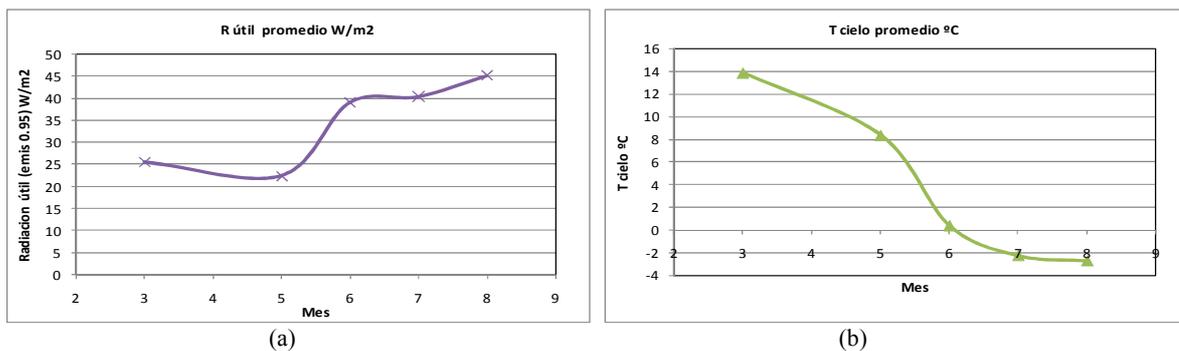


Figura 6. Promedio mensual a) del potencial de enfriamiento y b) de la temperatura de cielo.

## DATOS NOCTURNOS

Para analizar los datos nocturnos se eligió en general el periodo comprendido entre las 19 hs y las 7 hs, que incluye algunas horas con luminosidad solar que se manifiesta como una cola de radiación solar en el atardecer. Se puede apreciar cómo la radiación emitida por el pirgeómetro disminuye a medida que se enfría el ambiente mientras que la radiación de cielo varía con la nubosidad presente.

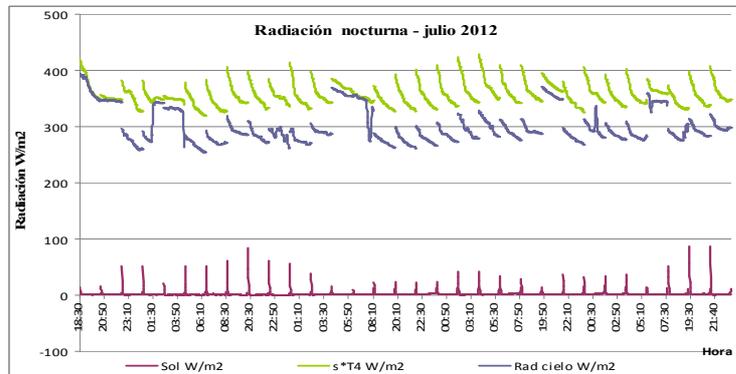


Figura 7. Radiación, sólo datos nocturnos de julio.

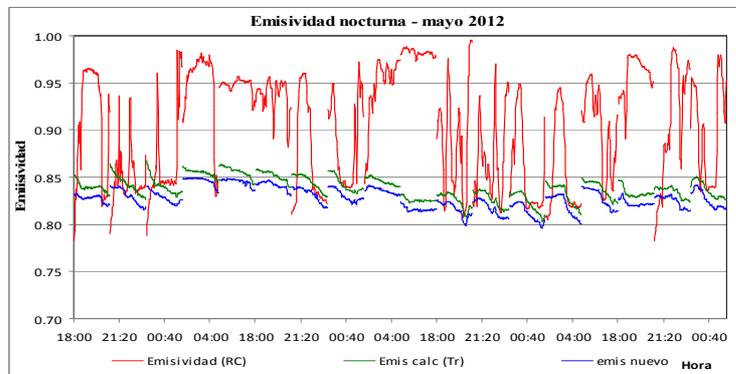


Figura 8. Emisividad, sólo datos nocturnos de mayo.

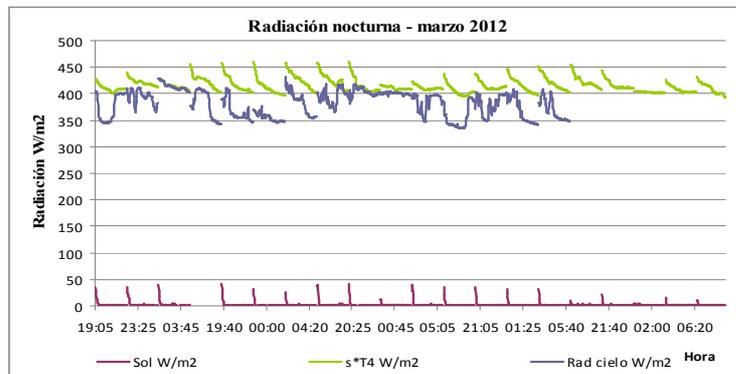


Figura 9. Radiación, sólo datos nocturnos de marzo.

Los valores promedio mensuales nocturnos, máximos y mínimos se muestran en la Tabla II. Se aprecia que en el periodo analizado la radiación proveniente del cielo oscila entre 254 y 432  $W/m^2$ , mientras que la radiación útil oscila entre -8,8 y 109  $W/m^2$ . La emisividad media se encuentra entre 0,81 y 0,92 mientras que la temperatura de cielo alcanza los  $-14,4^{\circ}C$  en julio/agosto.

Valores nocturnos 2012		Marzo	Mayo	Junio	Julio/Agosto
Rad cielo W / m 2	Promedio	381.20	357.61	296.14	300.74
	Máximo	431.60	407.99	345.92	394.56
	Mínimo	334.62	294.05	259.50	254.03
Emisividad	Promedio	0.92	0.90	0.81	0.84
	Máximo	1.00	1.00	0.94	1.00
	Mínimo	0.81	0.78	0.76	0.70
T cielo (°C)	Promedio	13.09	8.48	-4.43	-3.53
	Máximo	22.23	18.10	6.33	15.67
	Mínimo	4.02	-4.80	-13.05	-14.43
R útil (emis 0,95) W / m 2	Promedio	33.18	33.08	64.80	50.26
	Máximo	91.85	85.35	94.58	109.22
	Mínimo	-4.56	-2.90	18.96	-8.77

Tabla II. Resumen de los promedios mensuales nocturnos de las medidas realizadas, máximos y mínimos del mes.

## EMISIVIDAD NOCTURNA DE CIELO CLARO

Cuando se grafican sólo los datos de cielo claro, con emisividad menor que 0,85, se puede apreciar una buena correspondencia entre los cálculos obtenidos de la medida y los obtenidos con el cálculo de la correlación usando datos del psicrómetro y del termohigrómetro. Tomando como referencia los promedios mensuales nocturnos de temperatura de rocío medidas por el psicrómetro y el termohigrómetro, se puede comparar la emisividad medida con la calculada a partir de la correlación para cielo claro (Frigerio 2001) (Figuras 10 a y b). Se observa que en los meses extremos del período de marzo y julio/agosto la emisividad medida difiere de la calculada a partir de Trocio en 1,4% y 1,7% respectivamente, mientras que la calculada a partir de Dew Point difiere en 2,8% y 3,1%. En general la diferencia entre ajuste y medidas es menor al 4%. Se indica como *emis nuevo* el cálculo realizado con la temperatura de rocío dada por el termohigrómetro. Las diferencias están dentro del error del ajuste original (Frigerio 2001).

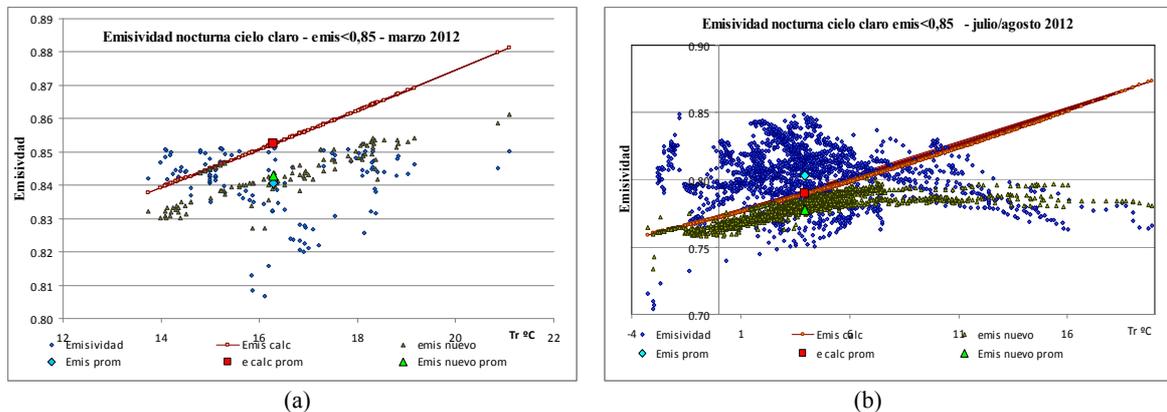


Figura 10. Emisividad de cielo claro medida con el pirgeómetro y calculada a partir de la correlación para cielo claro empleando las medidas de Trocio, usando el psicrómetro y Dew Point usando el termohigrómetro. (a) Marzo y (b) julio/agosto 2012.

## MEDIDAS 2013

En el año 2013 las medidas comenzaron a mediados de mayo y se empleó sólo el psicrómetro para medir temperatura de bulbo húmedo y determinar la temperatura de rocío. Para mayo y junio se cuenta con datos de radiación global medida por el Dr. Germán Salazar que permiten precisar el periodo nocturno. El periodo de medida actual es de 1 minuto, y para evitar el uso de archivos muy grandes en esta presentación, no se muestran en los gráficos siguientes la totalidad de los datos medidos, sino sólo el periodo 14 a 18 de junio de 2013. Los promedios mensuales se muestran en las tablas III y IV.

Los gráficos muestran dos días despejados mientras que el día 17 se presentó nublado, mostrando una radiación de cielo prácticamente constante alrededor de los 350W/m<sup>2</sup>, mientras que la radiación útil es casi nula. La temperaturas muestran que durante la noche del 16 al 17 y del 17 al 18 los valores son prácticamente constantes y próximos a T<sub>bh</sub> mientras que los días claros la temperatura de cielo alcanzó los -7°C.

La figura 13 muestra la emisividad en función de la temperatura de rocío para el mismo período, mostrando que la diferencia entre los valores promedios medido y resultante de la correlación es del 3,3%, dentro del orden al ajuste oportunamente propuesto.

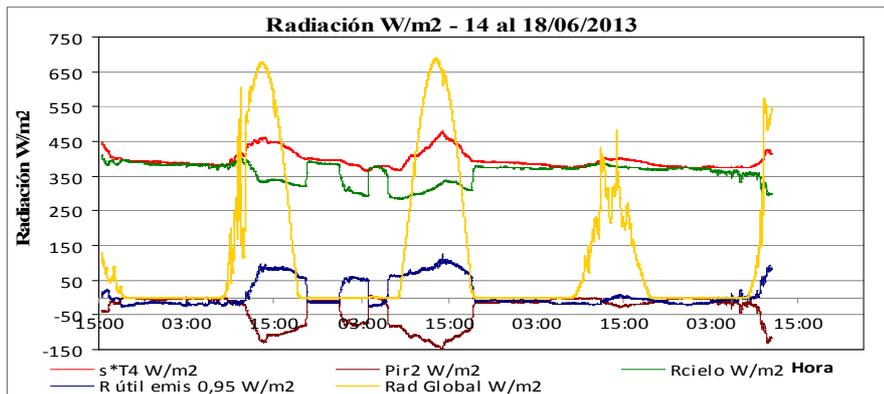


Figura 11. Radiación, algunos datos diurnos y nocturnos de junio. Se observan que el día 17 el cielo se cubrió y como consecuencia la radiación de cielo es prácticamente constante.

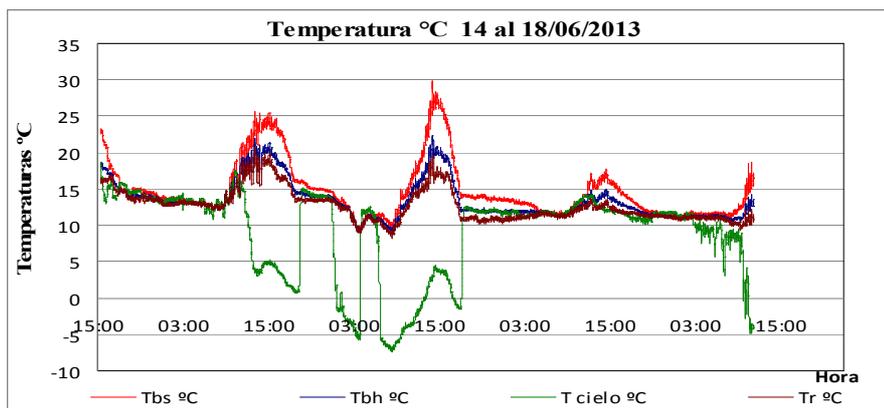


Figura 12. Temperaturas, algunos datos diurnos y nocturnos de junio. En los intervalos con días nublados se observa cómo las temperaturas se aproximan a los valores de bulbo húmedo.

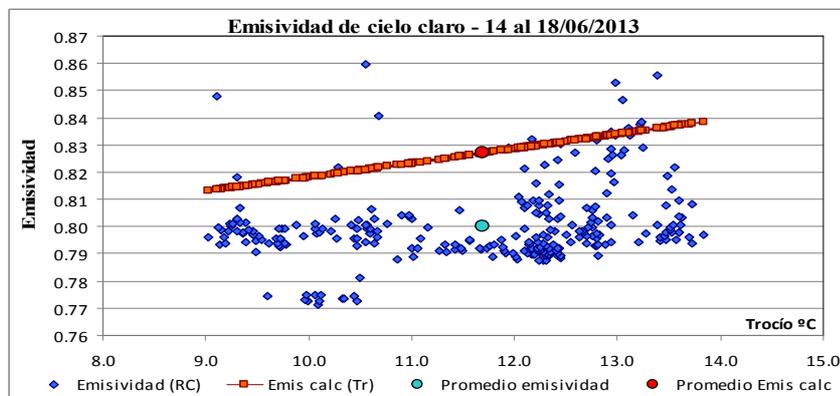


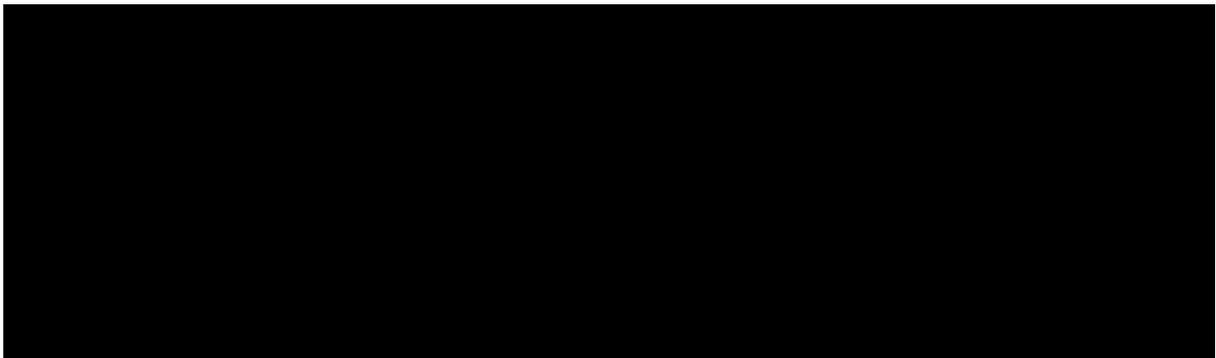
Figura 13. Emisividad, algunos datos nocturnos de cielo claro de junio y los valores que resultan de la correlación con la temperatura de rocío. Los valores promedio difieren en un 3,3%.

La Tabla III muestra los valores promedio mensuales de radiación para el periodo medido, con un promedio de radiación de cielo de  $326 \text{ W/m}^2$ , con mínimos y máximos entre  $252$  y  $420 \text{ W/m}^2$  respectivamente, mientras que la radiación útil para una superficie de emisividad  $0,95$  arroja un promedio de  $41 \text{ W/m}^2$ , con mínimos y máximos entre  $0$  y  $146 \text{ W/m}^2$  respectivamente.

La Tabla IV muestra los promedios mensuales de temperaturas y emisividad para el periodo medido. La temperatura  $T_{bs}$  es similar al promedio histórico en el mes de mayo ( $14^\circ\text{C}$ ) pero ligeramente superior en los meses de junio y julio indicando un periodo invernal más cálido. La temperatura media de cielo es de  $1,9^\circ\text{C}$  con valores extremos de  $-14,7$  y  $20,3^\circ\text{C}$ . El promedio de emisividad en el periodo es de  $0,83$  mientras que la correlación arroja el valor de  $0,82$ ; los valores extremos respectivos son  $0,63$  a  $1$ , y  $0,77$  a  $0,78$ .



*Tabla III. Resumen de los promedios mensuales de las medidas de radiación realizadas, su desviación estándar, máximos y mínimos.*



*Tabla IV. Resumen de los promedios mensuales de temperaturas y emisividad obtenidos, su desviación estándar, máximos y mínimos en el periodo de medidas.*

#### **POSIBLE INFLUENCIA DEL ENTORNO URBANO – MEDIDAS 2010**

En el año 2010, por un corto periodo se pudo realizar medidas simultáneas de radiación IR al cielo en dos lugares ubicados en ambientes diferentes, separados una distancia de unos 5 km: en la azotea de la Universidad Nacional de Salta, ubicada en las afueras de la ciudad, y en el techo de la vivienda familiar dentro del ámbito urbano (figura 14). De esta manera se pudo tener una primera información directa de la manera que puede influir el ambiente urbano en las variables que se miden.

Por simplicidad se identifica con el número 1 a la vivienda y con 2 la UNSa, y se calculan las diferencias porcentuales tomando como referencia los valores medidos en la UNSa.



*Figura 14. Ubicación relativa de la posición 1 (vivienda) y la posición 2 (UNSa).*

Las figuras 15, 16 y 17 muestran los valores nocturnos medidos. Se observa que las temperaturas ambientes de bulbo seco y de bulbo húmedo son más altas en la vivienda, 11,7% y 17,7% respectivamente, como se esperaría de la isla de calor que se establece en el ambiente urbano.

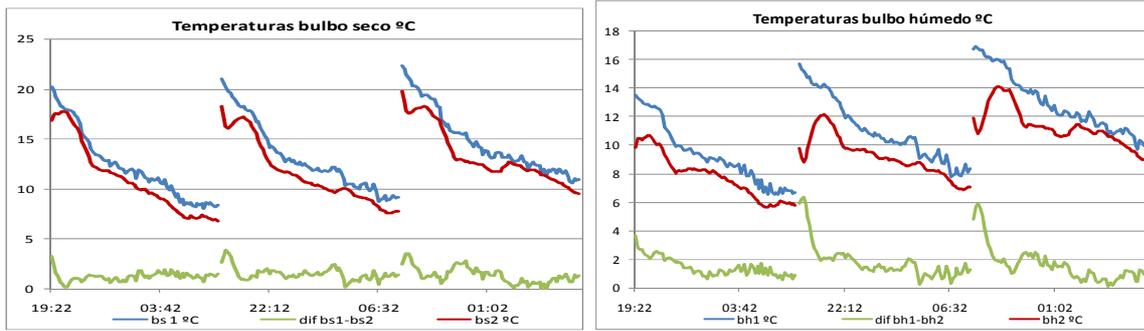


Figura 15. Comparación de temperaturas de bulbo seco y húmedo y su diferencia en las posiciones 1 y 2.

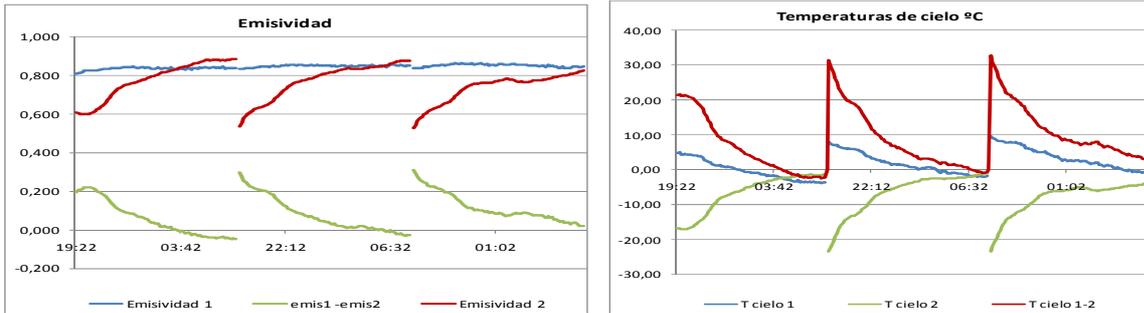


Figura 16. Comparación de emisividad y temperaturas de cielo en las posiciones 1 y 2.

La radiación que emite el pirgeómetro en la vivienda es un 6,6% mayor que en la UNSa por estar a temperatura más alta, mientras que la radiación que emite el cielo es un 13,7% mayor, lo que puede atribuirse a un mayor espesor de la capa de intercambio (*exchange layer*), que por ser una zona de mezcla incorpora más componentes en forma de agua (vapor y gotas), y aerosoles que contribuyen a la emisión IR hacia el suelo (Bou-Zeid 2009). Como el espesor de la capa límite es menor en una zona rural, la atmósfera en la zona en la que está ubicada la Universidad es más limpia; la emisividad resulta entonces allí un 10,9% menor, la temperatura de cielo calculada es un 122,7% menor y la radiación útil es un 11% mayor.

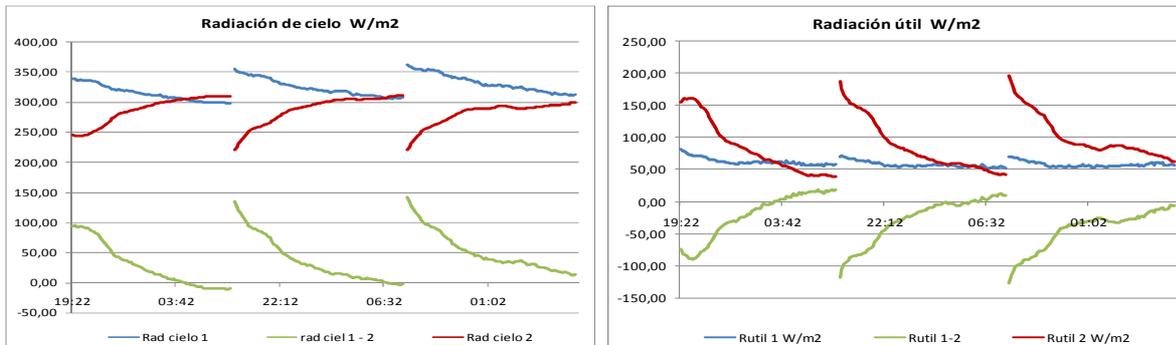


Figura 17. Comparación radiación de cielo y radiación útil en las posiciones 1 y 2.

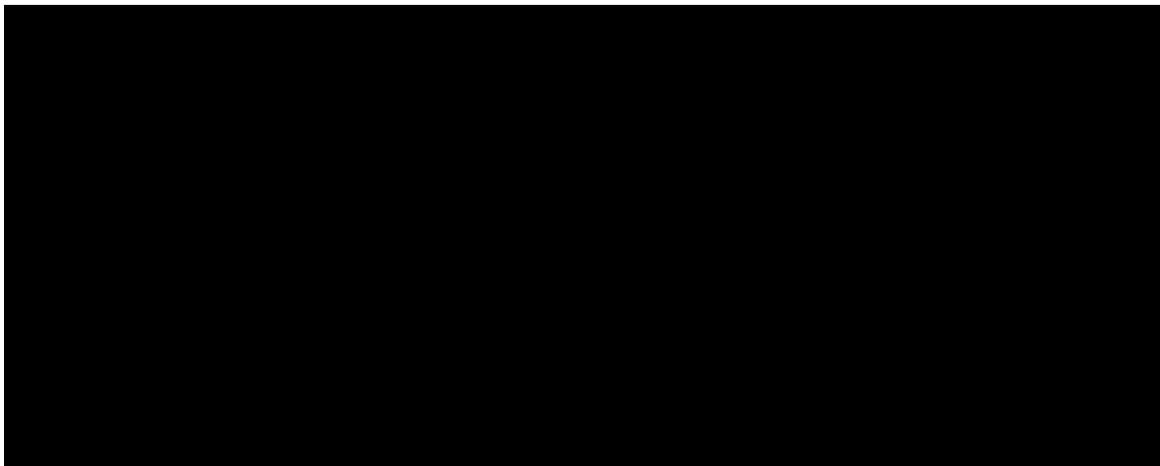


Tabla V. Comparación de las medidas nocturnas promediadas en el periodo medido en las posiciones 1 y 2.

Estos primeros resultados sugieren que es importante tener en cuenta la ubicación de las estaciones cuyos datos se toman como referencia para calcular intercambios radiativos en enfriamiento pasivo, porque el ambiente urbano no modifica sólo la temperatura, tanto de bulbo seco como de bulbo húmedo, sino que, en principio, también parece modificar la emisividad atmosférica y el potencial de enfriamiento, como se refleja en la radiación útil disponible.

## CONCLUSIONES

Las medidas realizadas en Salta en el periodo marzo-agosto de 2012 muestran que la radiación IR que llega a superficie se encuentra entre 250 y los 430 W/m<sup>2</sup>, con un promedio de 334 W/m<sup>2</sup>, mientras que la radiación útil oscila entre 0 y 122 W/m<sup>2</sup>, con un promedio de 34,2 W/m<sup>2</sup>. Los valores nocturnos promedio respectivos son 350 y 45 W/m<sup>2</sup> con una emisividad media de 0,87.

Las medidas realizadas en el periodo mayo-julio de 2013 muestran que la radiación IR que llega a superficie se encuentra entre 300 y los 450 W/m<sup>2</sup>, con un promedio de 326 W/m<sup>2</sup>, mientras que la radiación útil oscila entre 0 y 146 W/m<sup>2</sup>, con un promedio de 41 W/m<sup>2</sup>. Los valores promedio nocturnos de cielo claro dan una emisividad media de 0,83.

La correlación de emisividad media para cielo claro con temperatura de rocío encontrada en trabajos previos sigue siendo buena porque la diferencia entre los valores obtenidos en ambos periodos de medida son menores que 4%, dentro de la precisión de la correlación.

Las medidas realizadas en la UNSa y la vivienda sugieren que la influencia del ambiente urbano puede manifestarse no sólo en mayores valores de temperatura tanto de bulbo seco como húmedo, sino en un aumento de la radiación atmosférica, de la temperatura de cielo y de la emisividad, y una correspondiente disminución de la radiación útil disponible como potencial de enfriamiento pasivo. Estos resultados sugieren que es importante tener en cuenta la ubicación de las estaciones cuyos datos se toman como referencia para calcular intercambios radiativos en enfriamiento pasivo.

**Agradecimientos.** Mi agradecimiento al Dr. Germán Salazar por suministrar los datos de radiación global que permiten precisar el periodo nocturno. Agradezco también la colaboración del Sr. Carlos Fernández en la instalación del equipamiento y al CIUNSa por financiar el proyecto.

## Referencias

- Frigerio E. (2001) *La radiación nocturna como fuente fría: su caracterización y uso*. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta.
- Frigerio E., O. Ávila Blas. (2002) *Predicción De La Emisividad De La Atmósfera A Partir De Modelos Estadísticos*. Actas del XI Congreso ibérico e VI congreso iberoamericano de energía solar, trabajo 46, Portugal.
- Frigerio E. (2004) *Radiación nocturna: Campañas en Cachi*. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN 0329-5184, Vol. 8, N° 2, pp 11.25-11-28, La Plata.
- Busano J. P., Frigerio E. (2006) *Nuevos estudios sobre radiación nocturna en Cachi*. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN 0329-5184, Vol. 10, pp 11.95-11.100, Buenos Aires.
- Busano J. P., Frigerio E. (2007) *Evolución de la temperatura de rocío para el cálculo de la emisividad media*. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN 0329-5184, Vol. 11, pp 11.67-11.72, San Luis.
- Frigerio E., Busano J. P. (2007) *Depresión nocturna en Salta*. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN 0329-5184, Vol. 11, pp 11.89-11.93, San Luis.
- Bou-Zeid, E. (2009) *The atmospheric boundary layer and how it links climatic and environmental change*. Research report. Swiss Federal Institute of Technology- Lausanne.
- Frigerio, E. (2012) *Nuevas medidas de radiación atmosférica en Salta*. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN 0329-5184, Vol. 16, pp 11.31-11.38, Rosario.

## ABSTRACT

IR measurements performed at Salta in the periods march-august 2012 and may-july 2013 show values between 252 and 431 W/m<sup>2</sup> that for surfaces with emissivity 0,95 represent a cooling potential (useful radiation) of 0 to 171 W/m<sup>2</sup>. The correlation between emissivity and dew point obtained before for clear skies is still valid with a dispersion less than 4%. The first measurements suggest that the influence of urban environment manifests not only through the rising of temperatures but also through a rise of sky radiation, sky temperature and emissivity, and a diminution of the useful radiation available for passive cooling.

**Keywords:** IR radiation, passive cooling, nocturnal radiation, emissivity, atmosphere, urban environment.