Revista de Climatología

Vol. 15 (2015): 51-64 ISSN 1578-8768

©Copyright de los autores de cada artículo. Se permite su reproducción y difusión por cualquier medio, siempre que se haga sin interés económico y respetando su integridad

Comportamiento temporal de la radiación solar global en la ciudad de Bahía Blanca, Argentina

María Eugenia Fernández[1], Alicia M. Campo[2] y Jorge O. Gentili[2]

[1] *Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur (UNS) – Consejo Interuniversitario Nacional (CIN). <m.eugeniafernandez201@gmail.com>*

[2] *Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur (UNS) – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). <amcampo@uns.edu.ar> <jogentili@uns.edu.ar>*

(Recibido: 07-Feb-2015. Publicado: 04-Ago-2015)

Resumen

La energía que irradia el Sol es la principal causa de las diferencias climáticas en nuestro planeta y sustenta todos los procesos vitales. Si bien dicha emisión es prácticamente constante para escalas temporales breves, la radiación incidente en cada sitio es variable y depende en gran medida de los estados atmosféricos. En este sentido, la cantidad de cielo cubierto por nubes es un factor primordial, ya que por su capacidad de absorción y reflexión estas pueden reducir sustancialmente la radiación que alcanza la superficie terrestre. El objetivo del presente trabajo es caracterizar el comportamiento de la radiación solar global en la ciudad de Bahía Blanca (Argentina) para el período 2001-2011 y comparar los valores radiativos registrados en los años 2007-2011 con datos referidos a coberturas nubosas a fin de establecer relaciones entre ambas variables. La radiación promedio para el intervalo analizado fue de 187,36 W/m^2. En enero y en diciembre todos los días se registraron radiaciones mayores a 227,4 W/m^2 y en junio y julio la radiación siempre osciló entre 51,5 W/m^2 y 110,1 W/m^2. En el transcurso del día la radiación alcanza su máximo valor entre las 13:00 h y 13:30 h. En lo que respecta a la relación entre la cobertura nubosa y la radiación global se observaron reducciones de hasta un 10,86 % entre cielos despejados (0 octas) y parcialmente nublados (1-5 octas) y de hasta 44,35 % entre cielos despejados y cubiertos (6-8 octas). En término medio, los días claros reciben alrededor de un 16 % más de radiación que todos los días en conjunto.

Palabras clave: Radiación Global, Reducciones, Nubosidad, Bahía Blanca, Argentina.

Abstract

Solar energy is the main cause of climate differences on our planet and sustains all vital processes. Even though this emission is practically constant for short timescales, the total amount of solar radiation received on a given surface is variable and largely dependent on atmospheric conditions. Cloudiness is an overriding factor, due to cloud's absorption and reflexion capacity, which can highly reduce the radiation that reaches the earth surface. This paper aims to characterize global radiation's behavior in the city of Bahía Blanca (Argentina) for the period 2001-2011 and compare the radiative values recorded in the years 2007-2011 with data concerning cloud cover to establish relations between both variables. The average radiation for the analyzed interval was 187.36 W/m^2. In January and December, all records were higher than 227.4 W/m^2 and it was always between 51.5 W/m^2 and 110.1 W/m^2 in June and July. During the day, radiation reaches its peak between 13:00 h and 13:30 h. Regarding relation between cloud cover and global radiation, reductions of up to 10.86 % from clear skies (0 oktas) and partly cloudy (1-5 oktas) and up 44.35 % from clear skies and covered (6-8 oktas) were observed. On average, clear days receive about 16 % more radiation than every day together.

Key words: *Global Radiation, Reductions, Cloudiness, Bahía Blanca, Argentina.*

1. Introducción

La principal fuente de energía de todos los procesos atmosféricos es la radiación que nuestro planeta recibe del Sol. En su interior se genera gran cantidad de energía en forma de calor que es transmitida a través del espacio por un fenómeno ondulatorio hasta llegar al tope de la atmósfera terrestre. Sin embargo, la radiación solar incidente en un sitio particular es variable. La altura solar y la duración de la insolación constituyen factores determinantes, ambos relacionados con la posición latitudinal y la época del año. Además, en su paso por la atmósfera terrestre la radiación sufre modificaciones producto de procesos de absorción, difusión y reflexión. La suma de la radiación difusa y la radiación que alcanza directamente la superficie se denomina radiación solar global (Hufty, 1984). En consecuencia, el estado de los elementos presentes en la atmósfera se vincula directamente con esta energía incidente. La nubosidad es uno de los principales factores a tener en cuenta, ya que las nubes tienen gran capacidad de absorción y reflexión de energía. Producto de ambos procesos, con una capa de nubes gruesa puede perderse entre 35 % y 80 % del aporte de radiación, dejando que llegue a la tierra entre un 0 % y 45 % (Strahler y Strahler, 2005).

Conocer las características climáticas en términos de radiación recibida es sumamente útil. Posibilita la realización de estudios de balance energético y da cuenta de posibles procesos de cambio climático indefectiblemente reflejados en la distribución espacio-temporal de la radiación. También constituye la base para evaluar la factibilidad de implementación de sistemas de producción fotovoltaica de electricidad, cada vez más utilizados a nivel mundial. Los sitios de emplazamiento de las plantas generadoras, su rendimiento potencial y los costos de este tipo de energía demandan conocer la distribución de la radiación solar en superficie (Righini y Aristegui, 2013). En consecuencia, el comportamiento radiativo en superficie y su relación con elementos meteorológicos y factores antropogénicos ha sido ampliamente estudiado a nivel nacional e internacional. Por ejemplo, entre muchos otros, Robaa (2006) trabajó datos de radiación correspondientes a El Cairo (Egipto) para el período 1992-2003. Los analizó a diversas escalas temporales y los vinculó con las condiciones atmosféricas, principalmente la existencia de cobertura nubosa. También en Egipto, particularmente en Quena, Adam (2011) describió el efecto de las condiciones macrofísicas de las nubes (extensión vertical y distribución espacial) en la radiación solar recibida a nivel de superficie a escala global, concluyendo que las mayores reducciones se observan con coberturas mayores a 3 octas y en presencia de nubes bajas. En el contexto latinoamericano, Oliveira *et al.* (2002) caracterizaron el comportamiento diario de la radiación solar global, difusa y directa en la ciudad de São Paulo (Brasil), diferenciándolo según estación del año (otoño-invierno y primavera-verano). En México, Ulloa *et al.* (2011) analizaron la radiación solar global en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) basándose en estudios realizados por diversos investigadores e instituciones de gobierno, con el objetivo de conocer el clima regional y local y la trascendencia del recurso solar en el impulso y desarrollo de nuevas tecnologías ambientales. Wright (2002) elaboró mapas de radiación solar global para Costa Rica y pudo observar que en dicho país las zonas expuestas a los vientos alisios del NE, la vertiente del Caribe y llanuras del Norte registran valores menores de irradiación que las tierras del Pacífico. En la Argentina, Grossi Gallegos y Righini (2007) editaron el Atlas de Energía Solar de la República Argentina, que presenta cartas con la distribución mensual de los promedios diarios de la irradiación solar global y de la heliofanía efectiva. A escalas más acotadas, Grossi Gallegos *et al.* (2006) realizaron el análisis de datos de radiación solar disponibles en Ushuaia calculando promedios mensuales para el período 1986-2000. Por su parte, Adaro y Marchesi (2011) analizaron la influencia del fenómeno de variabilidad interanual El Niño sobre la variación del recurso solar en la ciudad de San Luis. En la región pampeana, Raichijk (2013) elaboró cartas con valores medios mensuales de radiación solar directa conjugando valores medios históricos de origen satelital con valores estimados a partir de datos de la Red Solarimétrica Regional de la Universidad Nacional de Luján entre los meses de enero de 2011 y junio de 2012.

En cuanto a las tendencias observadas en irradiación recibida en las últimas décadas, Standhill y Cohen (2001) llevaron a cabo una revisión de trabajos sobre el comportamiento radiativo en los pasados cincuenta años y estimaron que existe una disminución anual de $0{,}51 \pm 0{,}05$ W/m^2, lo que equivaldría a una

reducción de 2,7 % por década en la radiación recibida. Como posibles causas de este fenómeno sostienen que los aerosoles y contaminantes emitidos por la actividad humana modifican las propiedades ópticas de la atmósfera, incidiendo directamente en la radiación que alcanza la superficie y afectando los procesos vitales de los vegetales y la actividad agrícola. En una aproximación más actual, Wild (2009) también realizó un análisis de investigaciones previas sobre la misma temática y concluyó que entre 1950 y 1980 se ha documentado una reducción generalizada en la radiación solar incidente (fenómeno denominado *global dimming*). Recientemente, sin embargo, dicha variable ha manifestado una tendencia positiva, en lo que se denomina *global brightening*. Kvalevåg y Myhre (2007) relacionaron estos fenómenos con las variaciones globales de ozono, vapor de agua, dióxido de carbono y otros componentes atmosféricos que inciden en la radiación global recibida y concluyeron que el *global dimming* es más pronunciado en África Central, el Sudeste Asiático, Europa y el Noreste Americano. Russak (1990) analizó la tendencia de la radiación que alcanza la superficie terrestre en Tõravere (Estonia) y observó una disminución de 6,8 % en el período 1955- 1986, que se corresponde con un incremento de 11 % en el valor medio anual de nubes bajas. En China, Che *et al.* (2005) trabajaron con cuarenta años de datos de radiación (1961-2000) y observaron que en dicho período tanto la radiación directa como la global habían disminuido y que los días claros sobre el país se habían vuelto menos frecuentes. En concordancia con esta tendencia, You *et al.* (2010) documentaron que las horas de brillo solar disminuyeron entre 1983 y 2005 en un promedio de 65,1 h/década. Sanchez-Lorenzo *et al.* (2012) estudiaron las tendencias radiativas en España a partir de la década del ochenta y estimaron, entre 1985 y el 2010, un incremento de 3,9 W/m^2 por década, siendo máximo en verano con una tendencia lineal de +6,5 W/m^2. También en la Península Ibérica, Sánchez *et al.* (2012) analizaron el comportamiento de la radiación solar global, radiación solar difusa y radiación infrarroja en función de la nubosidad, comparándola en situaciones de cielos despejados, parcialmente cubiertos y totalmente cubiertos. Por su parte, Raichijk (2012) examinó el comportamiento radiativo en superficie para el período 1961-2004 en seis países sudamericanos y observó que entre 1961 y 1990 se manifestó una reducción en la radiación registrada y que desde la década de los noventa en adelante la tendencia ha sido positiva.

En esta línea, el presente trabajo tiene como objetivo caracterizar a diferentes escalas temporales el comportamiento de la radiación solar global en la ciudad de Bahía Blanca, para el período 2001-2011 y comparar los valores radiativos registrados en los años 2007- 2011 con datos referidos a coberturas nubosas a fin de establecer las posibles relaciones entre ambas variables.

2. Metodología

2.1. Materiales y métodos

Los registros de radiación global corresponden a una estación meteorológica marca Davis perteneciente al Departamento de Geografía y Turismo de la Universidad Nacional del Sur emplazada en la ciudad de Bahía Blanca. El sensor de radiación tiene como rango 0-1.800 W/m^2 con una resolución de 1 W/m^2. El intervalo de registro es de 30 minutos y la extensión temporal de la serie es 2001-2011. Si bien la precisión del instrumental está por debajo de los estándares internacionales, la escasez de datos en el sector justifica la utilización de los mismos. Estos datos cobran validez cuando son promediados adecuadamente ya que se reduce sustancialmente la componente aleatoria a niveles útiles (Raschke *et al.*, 2012). De esta forma se caracterizó el comportamiento anual, mensual, estacional y diario de la radiación en superficie, utilizando el software Microsoft Excel.

A fin de vincular el comportamiento radiativo con los elementos del tiempo presentes en la atmósfera, se cuenta con datos de la situación sinóptica de la estación Base Aeronaval Comandante Espora del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el período 2007- 2011 con hasta 8 registros diarios (00Z, 03Z, 06Z, 09Z, 12Z, 15Z, 18Z y 21Z). En cada uno de ellos se registra temperatura, temperatura máxima y temperatura mínima, humedad relativa, presión, velocidad y dirección de viento, nubes bajas y cobertura de nubes bajas, nubes medias y cobertura de nubes medias y nubes altas junto a otros datos meteorológicos

de interés. Sobre la base de esta información se estudió el comportamiento de la radiación solar global con respecto a la nubosidad. A tal efecto se calculó el valor modal diario de cobertura nubosa expresado en octas. Hahn *et al.* (1995) sostienen que debido a la falta de iluminación, las observaciones nocturnas de nubosidad poseen subestimaciones, sobre todo en las nubes medias y altas. Por este motivo, por un lado se calcularon los valores modales de cobertura nubosa para todas las horas de observación y por otro los valores correspondientes solo a las horas diurnas. Posteriormente, para ambos casos, se establecieron categorías que permitieran clasificar cada día según la presencia o ausencia de nubes: 0 octas se considera cielo despejado, entre 1 y 5 octas se considera un cielo parcialmente nuboso y entre 6 y 8 octas corresponde a un cielo nuboso. Finalmente, se contabilizaron los días correspondientes a cada categoría y se comparó con los promedios diarios de irradiancia global recibida a fin de establecer relaciones entre ambas variables.

2.2. Área de Estudio

La ciudad de Bahía Blanca está ubicada en el suroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Fig. 1) y constituye la ciudad cabecera del partido homónimo, que cuenta con 301.572 habitantes (INDEC, 2010).

En cuanto a su estructura productiva posee un rol destacado dentro del escenario industrial nacional debido al funcionamiento del Polo Petroquímico de Bahía Blanca, el más importante del país, localizado sobre la zona costera y complementado por diversos proyectos emplazados en la zona portuaria, que fomentan la conformación de un sector industrial dinámico y en continua expansión. Estas actividades modifican con sus emisiones la composición atmosférica natural y es posible suponer que incidan en los valores de radiación solar global en superficie registrados en la ciudad.

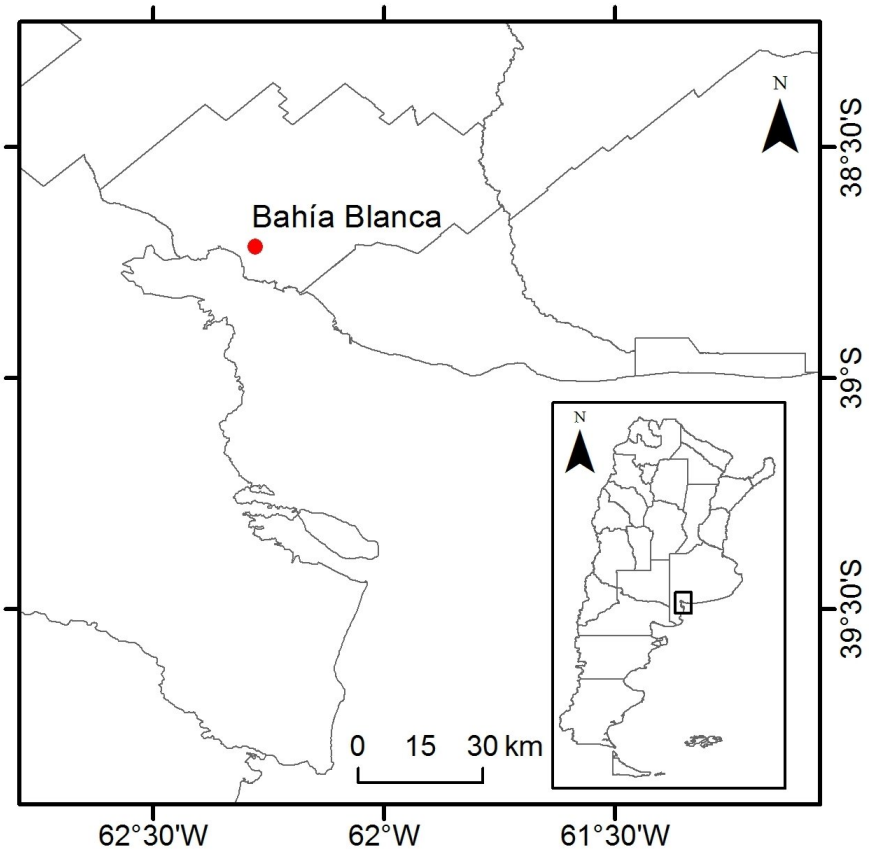

Fig. 1: Localización del área de estudio.

El área de estudio se localiza en la faja de climas templados, con temperaturas medias anuales entre 14 °C y 20 °C y con veranos e inviernos bien diferenciados y primaveras y otoños moderados (Capelli de Steffens *et al.*, 2005). Durante la estación cálida es frecuente el registro de temperaturas alrededor de los 40 °C y en la estación fría suelen presentarse marcadas olas de frío con mínimos próximos a los -12 °C. El movimiento de masas de aire de distinto origen y características dan lugar a una gran variabilidad en las condiciones atmosféricas y determinan para la zona un clima de transición entre el frío y seco de la Patagonia y el cálido y húmedo del este de la provincia de Buenos Aires. El Anticiclón Subtropical del Atlántico Sur origina masas de aire cálidas y húmedas, más influyentes en la estación verano, mientras que el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur genera una circulación fría y con baja humedad relativa, lo cual obedece a su procedencia austral y trayectoria continental (Capelli de Steffens *et al.*, 2005). El encuentro de estas masas de aire se asocia con la ocurrencia de frentes y la consecuente formación de nubes y posibles precipitaciones, lo cual incide directamente en la variabilidad de la radiación que alcanza la superficie terrestre. El Atlas de Energía Solar de la República Argentina (Grossi Gallegos y Roghini, 2007) muestra que el promedio de la irradiación solar global diaria para la ciudad oscila entre 7,00 kWh/m^2 en diciembre y 1,5 kWh/m^2 en junio y julio. Las horas de heliofanía efectiva diaria son máximas en enero y febrero (nueve horas) y mínimas en junio y julio (cuatro horas).

La localidad se inserta en la llanura pampeana, con relieves escasamente perceptibles cuyas cotas descienden gradualmente hacia el sur. En la ciudad de Bahía Blanca pueden identificarse tres unidades geomorfológicas: las terrazas que se extienden desde el noreste al norte, el valle del río Napostá Grande y la planicie baja, cercana a la costa (Bróndolo *et al.*, 1994). Cabe destacar que no existen variaciones topográficas significativas que puedan influir en la radiación global recibida.

3. Resultados y discusión

A continuación se expondrán los resultados del análisis del comportamiento radiativo en superficie en la ciudad de Bahía Blanca a distintas escalas temporales para el período 2001-2011.

3.1. Comportamiento interanual

La radiación media en superficie en la ciudad de Bahía Blanca entre los años 2001 y 2011 fue de 187,36 W/m^2, valor que coincide con los de radiación solar media anual en superficies horizontales al nivel del mar presentados por Giuliacci *et al.* (2010) para latitudes similares. No obstante ello, se evidencia una notable variabilidad en los valores observados. El mínimo corresponde al año 2001 con 169,4 W/m^2 y el máximo al 2010 con un valor promedio de 200,8 W/m^2, hallándose un rango de variabilidad de 31,4 W/m^2 para todo el período. Como puede apreciarse en la figura 2 la línea de tendencia muestra un patrón ascendente. Si bien el período de análisis no es lo suficientemente extenso, cabe destacar que el comportamiento radiativo coincide con las tendencias positivas globales, tratadas por Standhill y Cohen (2001) y Wild (2009) y las sudamericanas estudiadas por Raichijk (2012), fenómeno denominado *global brightening*.

3.2. Ciclo anual

El comportamiento estacional de la radiación que alcanza la superficie en la ciudad de Bahía Blanca obedece al patrón latitudinal. El máximo valor se observa en verano, con un promedio de 275,29 W/m^2 y el mínimo en invierno con 112,2 W/m^2. En primavera y en otoño se hallaron promedios de 252,9 W/m^2 y 115,4 W/m^2 respectivamente (Fig. 3).

En la figura 4 puede observarse la variación de los valores medios mensuales de radiación solar global para todos los años del período y la variación media mensual. La máxima radiación corresponde al mes de diciembre, con un valor promedio mensual de 310,6 W/m^2. En contrapartida, el mes de junio presenta la mínima radiación con 73,8 W/m^2.

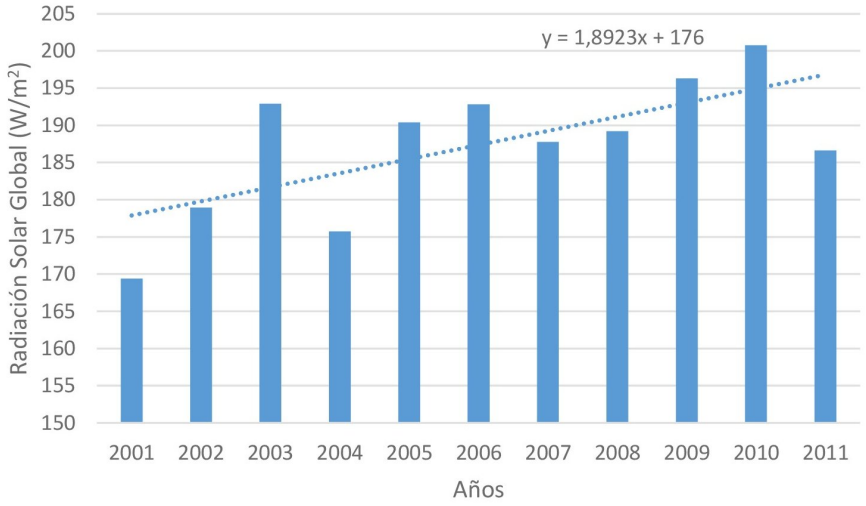

Fig. 2: Comportamiento interanual de la radiación solar global para Bahía Blanca.

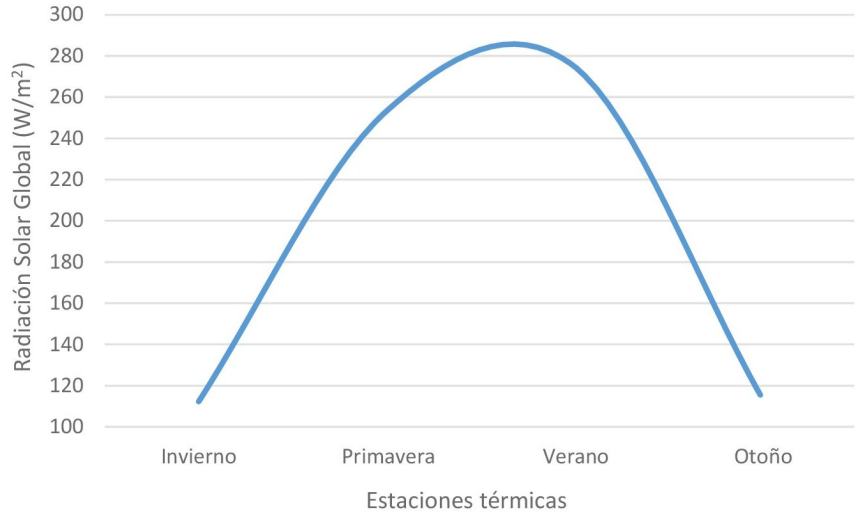

Fig. 3: Comportamiento estacional de la radiación solar global para Bahía Blanca.

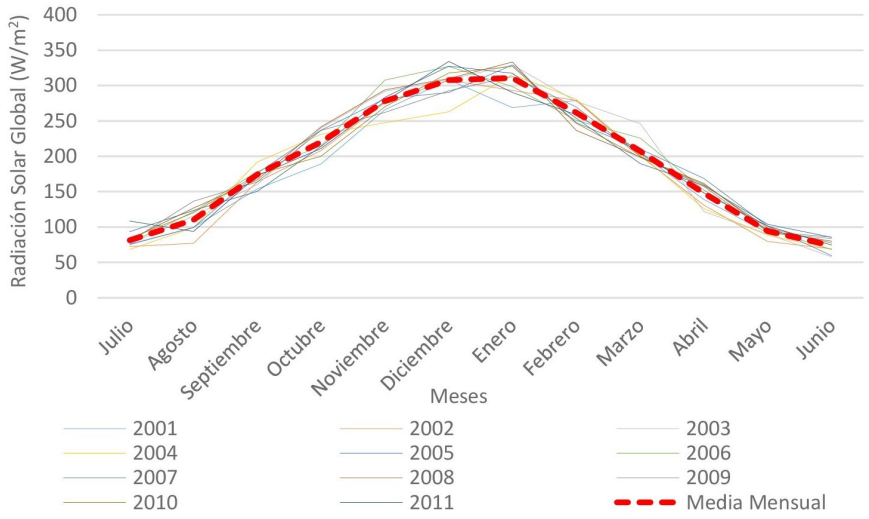

Fig. 4: Comportamiento mensual de la radiación solar global para los años 2001 a 2011.

3.3. Comportamiento diario

Se calcularon los valores medios diarios para el período 2001-2011. En la figura 5 puede observarse el comportamiento radiativo medio de cada día del año. El mínimo valor medio fue de 51,5 W/m^2 registrado el día 14 de junio y el máximo correspondió al 6 de diciembre con 344,6 W/m^2. Durante los meses de verano se manifiestan mayores variaciones, mientras que durante el invierno los valores de radiación se muestran más estables.

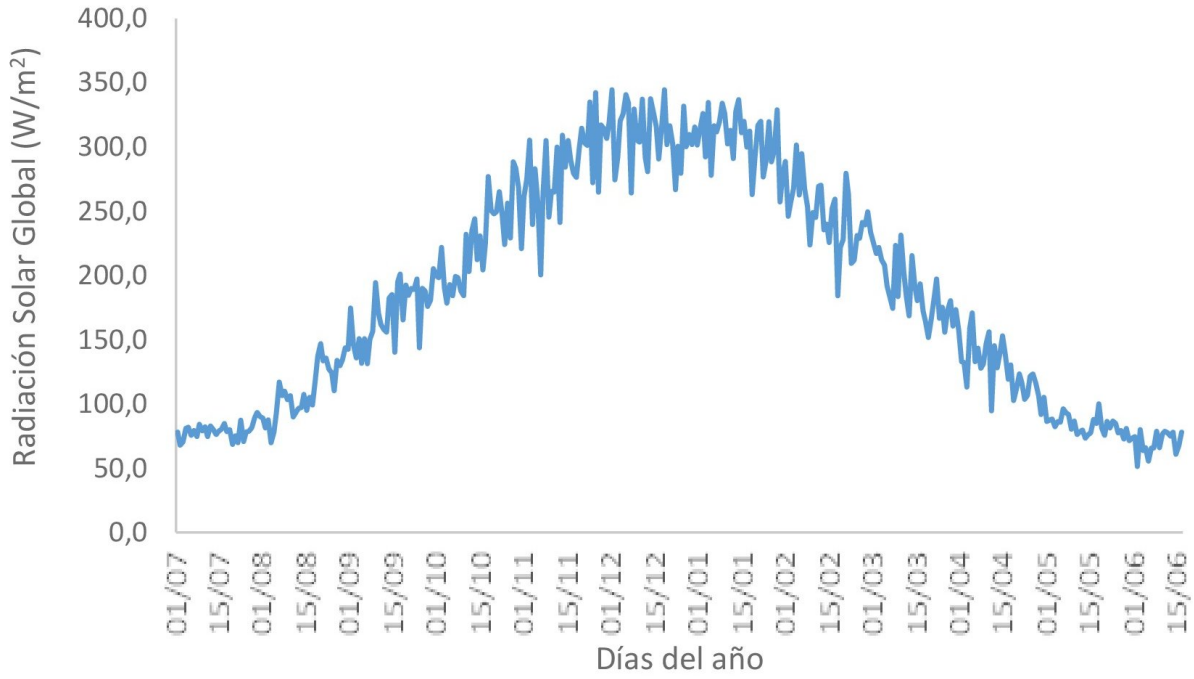

Fig. 5: Comportamiento diario medio de radiación solar global para el período 2001-2011 bajo cualquier condición de cobertura.

Seguidamente se establecieron rangos de radiación. Para ello se restó el mínimo valor registrado al máximo y se dividió el resultado por la cantidad de clases deseada (cinco), estableciéndose así la amplitud de clase, permitiendo establecer intervalos que incluyeran al total de los datos disponibles. Posteriormente se calculó la frecuencia relativa (expresada en porcentaje) de cada uno de ellos para cada mes, cada estación climática y para el año entero (tabla 1).

Puede notarse que en el transcurso del año los valores más frecuentes oscilan entre 51,5 y 110,1 W/m^2 y entre 286,0 y 344,6 W/m^2. Esta variabilidad en los valores de radiación a lo largo del año obedece a las estaciones térmicas bien diferenciadas propias del clima templado que caracteriza a la zona. En enero y en diciembre el 100 % de los días se registraron radiaciones mayores a 227,4 W/m^2. En junio y julio en cambio, el 100 % de los días la radiación osciló entre 51,5 W/m^2 y 110,1 W/m^2.

La figura 6 muestra el comportamiento radiativo medio a lo largo del día para todo el período de estudio. La radiación crece uniformemente desde la salida del sol a lo largo del día, alcanzando su máximo valor entre las 13:00 h y 13:30 h.

Además, se compara dicho comportamiento en verano y en invierno, notándose claramente la disminución del registro de radiación en la estación fría y un leve desplazamiento de los máximos valores de irradiancia: mientras que en verano suceden alrededor de las 14:00 h, en invierno suceden alrededor de las 13:30 h.

Tabla 1: Frecuencias relativas (%) de radiación solar global media diaria a distintas escalas temporales según rangos de radiación (W/m^2).

	[51,5-110,1]	(110,1-168,7]	(168,7-227,4]	(227,4-286,0]	(286,0-344,6]
Enero	0,0	0,0	0,0	9,7	90,3
Febrero	0,0	0,0	13,8	58,6	27,6
Marzo	0,0	12,9	61,3	25,8	0,0
Abril	6,7	70,0	23,3	0,0	0,0
Mayo	80,6	19,4	0,0	0,0	0,0
Junio	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Julio	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agosto	54,8	45,2	0,0	0,0	0,0
Septiembre	0,0	50,0	50,0	0,0	0,0
Octubre	0,0	0,0	60,0	40,0	0,0
Noviembre	0,0	0,0	40,0	53,3	6,7
Diciembre	0,0	0,0	0,0	19,4	80,6
Verano	0,0	0,0	17,8	33,3	48,9
Otoño	51,1	33,7	15,2	0,0	0,0
Invierno	63,0	29,3	7,6	0,0	0,0
Primavera	0,0	2,2	30,8	35,2	31,9
Anual	28,7	16,4	17,8	17,2	19,9

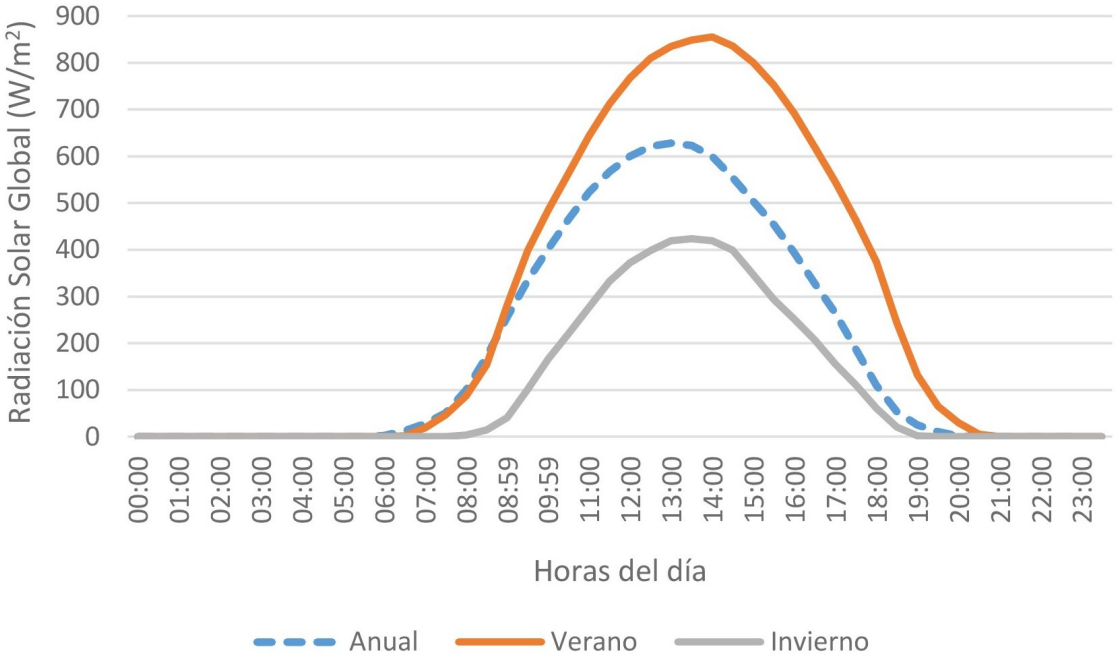

Fig. 6: Comportamiento radiativo diario medio.

3.4. Relación entre la radiación solar global y la cobertura nubosa

Un primer paso para conocer las relaciones entre la radiación recibida y la cobertura nubosa fue calcular la frecuencia de días despejados, parcialmente nublados y cubiertos para todo el período de estudio y los valores de radiación correspondiente a dichos días. Con esa intención se elaboraron dos tablas. La tabla 2 muestra valores de nubosidad calculados sobre todas las horas de observación y la tabla 3

valores de nubosidad considerando solo las horas diurnas. En la primera se evidencia que los cielos despejados fueron más frecuentes en todo el período de estudio. La tabla 3, en cambio, muestra que los días parcialmente nublados y cubiertos presentaron mayores frecuencias que los despejados. Al comparar ambas tablas se evidencia que los registros de nubosidad nocturnas poseen subestimaciones notables, lo que coincide con lo expuesto por Hahn *et al.* (1995). Además, puede apreciarse que los días despejados fueron más frecuentes en otoño y los cubiertos en invierno. Con relación al comportamiento radiativo, la acción de las nubes influye fuertemente en los valores de radiación solar que alcanza la superficie, ya que cuanto mayor fue la cobertura nubosa menor la irradiancia global registrada.

En cuanto a las reducciones en los niveles de radiación recibida de acuerdo a la nubosidad, la tabla 4 muestra porcentajes de reducción entre cielos despejados (0 octas) y parcialmente nublados (1-5 octas) y entre cielos despejados y cubiertos (6-8 octas) analizados mes a mes. Se observan reducciones de hasta un 10,86 % en el caso de los primeros y de 44,35 % en los segundos. Sánchez *et al.* (2012) hallaron un 50 % de atenuación en la radiación global recibida en los días totalmente cubiertos del suroeste español. Por su parte, Adam (2011) muestra que en Quena (Egipto) los cielos totalmente cubiertos atenúan entre el 28 % y el 54 % de la radiación incidente. Como promedio, entre un día despejado y un día con cielo cubierto hay un 35 % de diferencia en la radiación recibida y un 6,62 % entre un día claro y un día con cielos parcialmente cubiertos.

Tabla 2: Frecuencia de días despejados, parcialmente nublados y cubiertos (calculados a partir de todas las observaciones diarias) y sus efectos sobre la radiación global recibida para el período 2007-2011.

	Cielo despejado (0 octas)		Cielo parcialmente nublado (1-5 octas)		Cielo cubierto (6-8 octas)	
Período	Nº de días*	W/m^2	Nº de días*	W/m^2	Nº de días*	W/m^2
Enero	51	335,8	48	324,8	25	251,1
Febrero	35	287,0	41	261,7	28	192,9
Marzo	36	209,6	52	206,8	20	136,7
Abril	74	168,7	44	168,2	23	112,9
Mayo	52	122,3	39	111,5	56	68,1
Junio	57	94,1	35	83,9	50	59,8
Julio	30	101,9	33	94,1	39	71,5
Agosto	38	143,4	32	138,3	51	95,6
Septiembre	40	212,8	31	198,3	62	118,6
Octubre	43	277,1	52	248,2	58	155,0
Noviembre	36	327,4	51	295,6	32	196,5
Diciembre	48	347,6	49	320,6	25	233,7
Verano	124	295,0	133	277,5	71	209,3
Otoño	178	139,1	122	142,7	123	77,8
Invierno	108	139,7	100	121,1	146	91,2
Primavera	130	307,0	152	280,9	129	172,1
Año	540	215,4	507	215,2	469	127,8
* El total de días para todo el período en cada mes es: enero, marzo, mayo, julio, agosto, octubre y diciembre: 155 días; febrero: 141 días; abril, junio, septiembre y noviembre: 150 días.						

En las figura 7 puede apreciarse aún más el vínculo entre la radiación que alcanza la superficie y la cobertura nubosa de cada momento del tiempo. Se clasificaron días claros, es decir, totalmente despejados (0 octas) y se calcularon promedios mensuales de radiación. Existen sustanciales diferencias entre estos valores y los promedios calculados sobre todos los días del período. Los días claros reciben alrededor de un 16 % más radiación que todos los días considerados en conjunto. En invierno y primavera se observaron las máximas reducciones (22,1 % y 20,6 % respectivamente) seguidos del otoño con un valor de 13,7 %

y el verano con 9,3 %. Para esta escala temporal de análisis, Fathey (1992) identificó una reducción de radiación directa de entre el 10 y el 33 % en invierno. El análisis mensual muestra que la mayor diferencia en la radiación recibida entre días claros y todos los días fue en el mes de agosto con un 28,6 %, seguido por septiembre con un 25,4 %.

Tabla 3: Frecuencia de días despejados, parcialmente nublados y cubiertos (calculados a partir de observaciones diurnas) y sus efectos sobre la radiación global recibida para el período 2007-2011.

	Cielo despejado (0 octas)		Cielo parcialmente nublado (1-5 octas)		Cielo cubierto (6-8 octas)	
Período	Nº de días*	W/m^2	Nº de días*	W/m^2	Nº de días*	W/m^2
Enero	43	336,1	58	326,3	23	244,4
Febrero	27	299,2	52	263,0	25	177,0
Marzo	21	227,2	58	208,4	29	143,8
Abril	38	179,2	82	163,6	21	107,5
Mayo	35	127,1	57	113,2	55	65,8
Junio	36	93,0	46	88,8	60	64,2
Julio	25	108,6	35	94,0	42	70,2
Agosto	26	153,5	36	141,6	59	96,0
Septiembre	29	225,4	44	193,4	60	116,1
Octubre	29	282,0	60	260,3	64	156,5
Noviembre	25	334,9	56	303,2	38	205,3
Diciembre	37	356,7	59	328,0	26	218,8
Verano	94	307,8	161	280,9	73	194,0
Otoño	99	144,3	189	141,2	135	79,7
Invierno	83	141,2	118	128,4	153	89,1
Primavera	95	315,2	174	288,5	142	173,7
Todo el período	371	228,8	643	213,8	502	125,6
* El total de días para todo el período en cada mes es: enero, marzo, mayo, julio, agosto, octubre y diciembre: 155 días; febrero: 141 días; abril, junio, septiembre y noviembre: 150 días.						

Tabla 4: Porcentajes de reducción en los valores de radiación solar global recibida de acuerdo a la cobertura nubosa.

Meses del año	Entre cielos despejados y cielos parcialmente cubiertos	Entre cielos despejados y cielos cubiertos
Enero	3,29	25,23
Febrero	8,82	32,79
Marzo	1,35	34,78
Abril	0,34	33,11
Mayo	8,83	44,35
Junio	10,86	36,48
Julio	7,70	29,83
Agosto	3,56	33,34
Septiembre	6,80	44,25
Octubre	10,44	44,06
Noviembre	9,71	39,98
Diciembre	7,77	32,77
Promedio	6,62	35,91

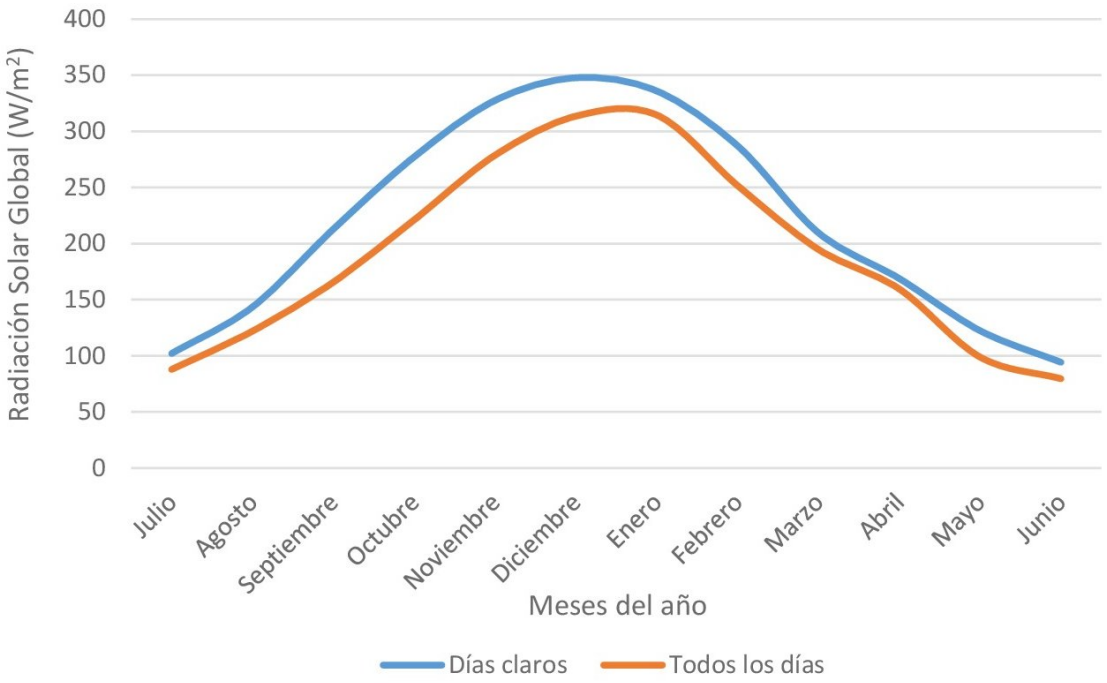

Fig. 7: Comportamiento radiativo mensual en los días claros y en todos los días del año.

Paralelamente, se calcularon valores medios anuales del período 2007-2011 diferenciando días claros de días con cobertura nubosa. La figura 8 muestra los resultados de este análisis. Si se consideran solo los días despejados, la radiación solar global recibida manifiesta una tendencia ascendente. En cambio, si se consideran los días nubosos sucede lo contrario, marcándose una disminución en los registros. En este sentido, puede suponerse que el aumento en la radiación global recibida esté ligado a la carga de aerosoles atmosféricos y no a la cobertura nubosa.

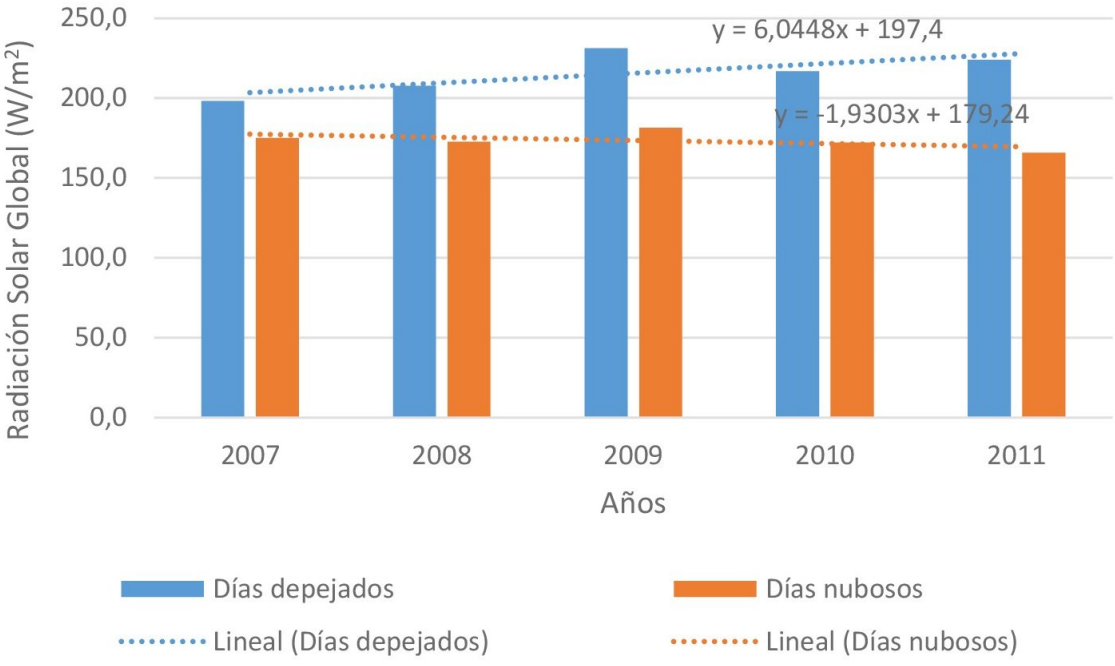

Fig. 8: Comportamiento radiativo anual en los días claros y en todos los días del año.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se analizó la radiación solar global incidente sobre la ciudad de Bahía Blanca para el período 2001-2011. Para dichos años se registró una radiación de 187,36 W/m^2, con gran variabilidad interanual. La serie manifestó una tendencia ascendente, lo que coincide con las tendencias positivas globales y sudamericanas, estudiadas por Standhill y Cohen (2001), Wild (2009) y Raichijk (2012), fenómeno denominado *global brightening*.

El comportamiento estacional obedece al patrón latitudinal, el máximo valor se observó en verano, con un promedio de 275,29 W/m^2 y el mínimo en invierno, con 112,2 W/m^2. En primavera y en otoño se hallaron promedios de 252,9 W/m^2 y 115,4 W/m^2 respectivamente. En cuanto a los valores mensuales, la máxima radiación corresponde al mes de diciembre, con un promedio mensual de 310,6 W/m^2. En contrapartida, el mes de junio presenta la mínima radiación con 73,8 W/m^2. También se calcularon los promedios diarios de la década para el período 2001-2011. El mínimo valor medio fue de 51,5 W/m^2 y registrado el día 14 de junio; el máximo valor medio correspondió al 6 de diciembre con 344,6 W/m^2.

En cuanto a las frecuencias de radiación, pudo notarse que en el transcurso del año los valores más frecuentes oscilan entre 51,5 y 110,1 W/m^2 y entre 286 y 344,6 W/m^2, variabilidad que obedece a las estaciones térmicas bien diferenciadas propias del clima templado que caracteriza a la zona. Las máximas radiaciones se manifiestan en los meses de verano y las mínimas en invierno. En enero y en diciembre el 100 % de los días se registraron radiaciones mayores a 227,4 W/m^2. En junio y julio el 100 % de los días la radiación osciló entre 51,5 W/m^2 y 110,1 W/m^2.

El día medio de la década mostró una radiación que crece uniformemente a lo largo del día a partir de la salida del Sol alcanzando su máximo valor entre las 13:00 h y 13:30 h. Si se compara dicho comportamiento en verano y en invierno, se ve claramente la disminución de horas de insolación en la estación fría y un desplazamiento mínimo de los máximos valores de irradiancia.

Con relación a la nubosidad se calcularon valores modales diarios considerando, por un lado, todas las horas de observación y por otro, solo las diurnas. El primer análisis mostró que los días despejados (0 octas) fueron más frecuentes para todo el período de estudio. Para el segundo análisis pudo observarse que la ocurrencia de días despejados fue menor que los días parcialmente nublados (1-5 octas) y cubiertos (6-8 octas). Este evidente subregistro ligado a las observaciones nocturnas concuerda con lo expuesto por Hahn *et al.* (1995). Se constata que dicha variación se registra también a escala estacional y mensual.

En todos los casos, a mayor cantidad de cielo cubierto de nubes, menor radiación global registrada, lo cual coincide con lo afirmado por Adam (2011). Se observan reducciones de hasta un 10,86 % entre cielos despejados (0 octas) y parcialmente nublados (1-5 octas) y de hasta 44,35 % entre cielos despejados y cubiertos (6-8 octas) analizados mes a mes. En término medio, entre un día despejado y un día con cielo cubierto hay un 35 % de diferencia en la radiación recibida y entre un día claro y un día con cielos parcialmente cubiertos la diferencia es de 6,62 %. Los días claros reciben alrededor de un 16 % más radiación que todos los días considerados en conjunto. Las máximas reducciones fueron de 22,1 % y 20,6 %, en invierno y primavera respectivamente. En el análisis mensual se destacaron el mes de agosto con un 28,6 % y septiembre con un 25,4 %.

Los valores medios anuales correspondientes al período 2007-2011 muestran una tendencia ascendente solo con respecto a los días despejados, por lo cual puede suponerse que el aumento en la radiación global recibida esté ligado a la carga de aerosoles atmosféricos y no a la cobertura nubosa. La cercanía al mar y la realización de actividades industriales en la ciudad de Bahía Blanca incidirían directamente en los elementos presentes en la atmósfera urbana, por lo que las posibles relaciones entre estos y la radiación global recibida será motivo de análisis en próximos trabajos.

Se considera de importancia estratégica el desarrollo de este tipo de investigaciones en el hemisferio Sur en general y en la región pampeana en particular. Por esta razón se propone extender la investigación a localidades vecinas a fin de comprender a cabalidad la dinámica radiativa de la región en relación con fenómenos de origen natural y antrópico.

5. Agradecimientos

El presente trabajo se realizó en el marco del proyecto de investigación "Geografía Física Aplicada al estudio de la interacción sociedad-naturaleza. Problemáticas a diversas escalas témporo-espaciales" (24/G067) dirigido por la Dra. Alicia M. Campo y subsidiado por la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur.

6. Bibliografía

Adam MEN (2011): Effect of macrophysical parameters of clouds on broadband solar radiation (295-2800 nm) at a subtropical location. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 4:181-185.

Adaro J, Marchesi J (2011): Influencia del fenómeno El Niño en el estudio del recurso solar con fines energéticos en la ciudad de San. Presentado en el *II Congreso Internacional de Ambiente y Energías Renovables*. Universidad Nacional de Villa María Córdoba, pp. 221-229.

Bróndolo M, Campos M, Zinger S, Del Pozo O, Lorda MA (1994): *Geografía de Bahía Blanca*. Ediciones Encestando, Bahía Blanca.

Capelli de Steffens AM, Piccolo MC, Campo de Ferreras AM (2005): Clima urbano de Bahía Blanca. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.

Che HZ, Shi GY, Zhang XY, Arimoto R, Zhao JQ, Xu L, Wang B, Chen ZH (2005): Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961-2000. *Geophysical Research Letters*, 32, L06803.

Fathey AM (1992): Ultraviolet solar radiation at Helwan and its dependence on atmospheric conditions. M. Sc. Thesis, Faculty of Science, Helwan University, Egypt.

Giuliacci M, Giuliacci A, Corazzon P (2010): *Manuale di Meteorología*. Alpha Test, Milano.

Grossi Gallegos H, Roberti A, Sierra V (2006): Análisis de los datos de radiación solar disponibles en Ushuaia, Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10:11.09-11.14.

Grossi Gallegos H, Righini R (2007): *Atlas de Energía Solar de la República Argentina*. Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires. <http://www.aldar.com.ar/atlas/home.swf>

Hahn CJ, Warren SG, London J (1995): The effect of moonlight on observation of cloud cover at night, and application to cloud climatology. *Journal of Climate*, 8:1429-1446.

Hufty A (1984): *Introducción a la climatología*. Editorial Ariel S.A, Barcelona.

INDEC (2010): Censo Nacional de 2010. Instituto Nacional de Estadística y Censos, Buenos Aires, Argentina.

Kvalevåg MM, Myhre G (2007): Human impact on direct and diffuse solar radiation during the Industrial Era. *Journal of Climate*, 20:4874-4883.

Oliveira AP, Machado AJ, Escobedo JF, Soares J (2002): Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, 71:231-249.

Raichijk C (2012): Observed trends in sunshine duration over South America. *International Journal of Climatology*, 32:669-680.

Raichijk C (2013): Cartas de radiación solar directa normal para la Pampa Húmeda Argentina. Acta de la *XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1:11.47-11.53.

Raschke E, Kinne S, Stackhouse PW (2012): *Gewex Radiative Flux Assessment (rfa)*. WCRP report, 19.

Righini R, Aristegui R (2013): Análisis de datos de la red solarimétrica pampeana. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1:1137-1146.

Robaa SM (2006): A study of solar radiation climate at Cairo urban area, Egypt and its environs. *International Journal of Climatology*, 26:1913-1928.

Russak V (1990): Trends of solar radiation, cloudiness, and atmospheric transparency during recent decades in Estonia. Revista *Tellus*, 42B:206-210.

Sánchez G, Serrano A, Cancillo ML (2012): Effect of cloudiness on solar global, solar diffuse and terrestrial downward radiation at Badajoz (Southwestern Spain). *Óptica Pura y Aplicada*, 45:33-38.

Sanchez-Lorenzo A, Calbó J, Wild M (2012): Global and diffuse solar radiation in Spain: Building a homogeneous dataset and assessing their trends. *Global and Planetary Change*, 100:343-352.

Standhill G, Cohen S (2001): Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107:255-278.

Strahler A, Strahler A (2005): *Geografía Física*. Omega, Barcelona.

Ulloa H, García M, Pérez A, Meulenert A, Ávila D (2011): Clima y radiación solar en las grandes ciudades: Zona Metropolitana de Guadalajara (Estado de Jalisco, México). *Investigaciones Geográficas*, 56:165-175.

Wild M (2009): Global dimming and brightening: A review. *Journal of Geophysical Research*, 114:D00D16.

Wright J (2002): Mapas de radiación solar en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 9:79-87.

You O, Kang S, Flügel WA, Sanchez-Lorenzo A, Yan Y, Huang J, Martin-Vide J (2010): From brightening to dimming in sunshine duration over the eastern and central Tibetan Plateau (1961-2005). *Theoretical and Applied Climatology*, 101:445-457.