

MODELO SEMI-EMPÍRICO SIMPLE DE IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES GOES

Agustín Laguarda^{1,2} – agu.laguarda@gmail.com
Rodrigo Alonso-Suárez² – r.alonso.suarez@gmail.com
Gonzalo Abal^{1,2} – gonzalo.abal@gmail.com

¹ Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

² Laboratorio de Energía Solar (LES), CENUR LN, Universidad de la República, Salto, Uruguay

Resumen. El conocimiento de la irradiación solar que incide a nivel de superficie es necesario para el desarrollo, dimensionamiento y simulación de emprendimientos de aprovechamiento de la energía solar. La forma moderna de estimar el recurso solar sobre sitios específicos y grandes extensiones territoriales es a través de imágenes de satélite. La cadencia de la información generada por satélites meteorológicos geoestacionarios es suficiente para modelar el recurso a escala horaria. En este trabajo presentamos un modelo satelital simple para la estimación de irradiación solar global en plano horizontal a nivel de superficie. La propuesta combina un modelo de cielo claro cuyo parámetro principal, el factor de turbidez de Linke, fue localmente estimado, con un índice de nubosidad obtenido a partir de las imágenes del satélite GOES13. El modelo propuesto es de naturaleza híbrida, en tanto combina un modelo físico con una parametrización estadística, y cuenta con dos parámetros que son ajustables localmente a medidas en tierra. En la evaluación a nivel horario en dos sitios en Uruguay se obtuvo un desvío promedio relativo (rMBD) menor a 1% (negativo) y un desvío cuadrático medio relativo (rRMSD) del orden de 13%, expresados en términos relativos a la media de las medidas, lo que es competitivo con el desempeño de otros modelos ajustados en la misma región. Esta es la primera evaluación de un modelo híbrido sobre el territorio de Uruguay y es parte de una línea de trabajo sistemática que busca a disminuir la incertidumbre de modelos de este tipo para su utilización en la región.

Palabras clave: irradiación global horizontal, índice de nubosidad, modelo ESRA, modelo SUNY

1. INTRODUCCIÓN

Contar con información de calidad sobre el recurso solar de un territorio es imprescindible a la hora de diseñar sistemas de captación de energía solar. La calidad de dicha información se relaciona con el riesgo financiero y la bancabilidad de proyectos de mediana y gran escala (Vignola et al. 2012; Gueymard, 2014). Desde hace varias décadas se utilizan modelos basados en información de satélites meteorológicos geoestacionarios para generar información sobre el recurso solar debido a su gran cobertura espacial y la cadencia sub-horaria de las imágenes (Polo, Zarzalejo y Ramírez, 2008). Se ha encontrado que a escala horaria incluso modelos satelitales simples son más precisos que la interpolación entre estaciones de medición terrestres cuando estas distan más de 35 km del punto de interés (Perez, Seals y Zelenka, 1997; Zelenka, Perez y Renee, 1999).

Los modelos para estimar irradiación solar a partir de imágenes satelitales pueden clasificarse como modelos estadísticos (o empíricos) o modelos de base física. Los primeros utilizan una parametrización con coeficientes ajustables a partir de datos de irradiación solar medidos y frecuentemente logran un buen desempeño en regiones específicas para las cuales se cuenta con información de tierra de buena calidad. Sin embargo, el buen desempeño suele ser local y requieren calibraciones periódicas para ser sustentables. El primer modelo satelital implementado para Uruguay, JPTv2, es de este tipo. Es un derivado del modelo original de Tarpley (Justus, Paris y Tarpley, 1986) que se optimizó en un proceso de varios años (Alonso-Suárez et al, 2012a, 2012b, 2014) hasta lograr un desempeño a nivel horario de 13% en rRMSD (desvío cuadrático medio como porcentaje de la media de las medidas) sobre el territorio del Uruguay y regiones vecinas (Alonso-Suárez, 2017). Por otro lado, los modelos puramente físicos son de carácter universal, pero requieren de una descripción detallada del estado de la atmósfera. Frecuentemente se basan en cálculos de transferencia radiativa en las diferentes capas de la atmósfera, lo cual puede ser muy intensivo computacionalmente. La salida de un modelo físico es tan buena como los datos de entrada sobre el estado de la atmósfera que se utilicen y esto limita fuertemente su aplicabilidad a centros especializados con capacidades de medida adecuadas. En la práctica, la mayoría de los modelos son semi-empíricos o híbridos, dado que tienen base física pero diversos procesos en la atmósfera son parametrizados en forma conveniente para el usuario típico. El objetivo de esta línea de trabajo es implementar y validar en la región un modelo satelital semi-empírico de buen desempeño de forma de mejorar el conocimiento del recurso solar en el territorio del Uruguay y regiones vecinas. Este trabajo describe un primer paso en esta dirección, comparando el desempeño contra datos de tierra y otros modelos ya validados.

El modelo que se presenta es un modelo híbrido simple con la misma estructura de otros modelos bien conocidos, como el método Heliosat (Polo et al., 2015, Rigollier, Lefèvre y Wald., 2004) o el modelo SUNY (Perez et al., 2002, 2013). El concepto central, tomado del trabajo original de Cano et al. (1986), consiste en tomar como base un

modelo de cielo claro y atenuarlo en función de un factor o índice de nubosidad basado en información satelital. En este trabajo se reportan resultados preliminares correspondientes a la primer implementación de este tipo de modelos híbridos ajustados para el territorio uruguayo utilizando datos de tierra de la Red de Medida Continua de Irradiancia Solar (RMCIS), diseñada y mantenida por el LES.

2. MODELOS

Se utiliza el modelo de cielo despejado ESRA (Rigollier, Bauer y Wald, 2000) que tiene un único parámetro ajustable de origen físico conocido como factor de turbidez Linke, sobre el cual el LES cuenta con información localmente desarrollada. Este modelo de cielo despejado se modula con un factor de nubosidad obtenido por satélite como se describe en esta sección, para obtener un modelo para toda condición de cielo.

2.1 Modelo ESRA

El modelo de cielo despejado ESRA (Rigollier et al., 2000) fue desarrollado en el marco del European Solar Radiation Atlas con el objetivo de estimar radiación solar a nivel de superficie a partir de información del satélite europeo Meteosat. El mismo se utiliza en el método Heliosat-2 (Rigollier, Lefèvre y Wald, 2004) y en sus variantes más recientes (Espinar et al., 2009).

El modelo ESRA utiliza como único parámetro el coeficiente de Turbidez de Linke para una masa de aire igual a 2 (T_L). Este es un parámetro que representa en forma efectiva los efectos de atenuación en la atmósfera debidos al vapor de agua y aerosoles, y se puede interpretar como el número de atmósferas limpias y secas (atmósfera de Rayleigh) que producirían los mismos efectos de atenuación en la radiación solar que la atmósfera real (en ausencia de nubes). El modelo ESRA calcula analíticamente las componentes directa y difusa de irradiancia sobre un plano horizontal y luego las suma para obtener la irradiancia global horizontal (GHI). En su versión horaria, la irradiación directa, I_{bh} , está dada por,

$$I_{bh}^{ESRA} = I_0 f_n \cos \theta_z e^{-0.8662 m \delta_R(m) T_L} \quad (1)$$

donde $I_0 = 1367 \text{ Wh/m}^2$ es la constante solar horaria, f_n es el factor de corrección orbital para el cual se utiliza en este caso la parametrización (Spencer 1971), m es la masa de aire relativa, y δ_R es el espesor óptico de Rayleigh (Kasten, 1996). El ángulo cenital solar, θ_z , se calcula para el punto medio en la hora utilizando la fecha y ubicación del punto de interés en la forma usual (Duffie y Beckman, 2016). Existe un conjunto de correcciones para los efectos de la altitud, propuestos en Remund (2003), que no son implementados dado que la topografía en la región de interés (Uruguay) presenta alturas menores a 500 m.s.n.m. El parámetro 0.8662 está asociado a la expresión utilizada para el espesor óptico de Rayleigh, $\delta_R(m)$, de forma que la definición de T_L sea independiente a dicha parametrización (Grenier et al., 1994).

La componente difusa de la irradiación sobre plano horizontal es estimada (Rigollier et al., 2000) como el producto de la irradiación extraterrestre por una transmitancia difusa en un camino óptico vertical T_z , multiplicado por un modificador angular difuso F_d que depende de la dirección de incidencia y T_L ,

$$I_{dh}^{ESRA} = I_0 f_n T_z(T_L) F_d(\theta_z, T_L) \quad (2)$$

La parametrización de T_z y F_d dada en (Rigollier et al., 2000) podría ser ajustada localmente para la región de interés. Sin embargo, el aporte de la radiación difusa es menor al 15% de la radiación total en condiciones de cielo despejado por lo que pequeñas variaciones en este término tienen poco impacto en el desempeño del modelo. La suma de las Ecs. 1 y 2 es la irradiación global en plano horizontal para cielo despejado.

Turbidez Linke

Para estimar T_L de forma precisa es necesario contar con medidas espectrales confiables de variables atmosféricas como la columna de vapor de agua o la profundidad óptica de aerosoles (Remund et al., 2003). Este no es el caso para la región de interés, donde no hay ninguna estación Aeronet (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) y no se relevan estas variables en forma continua. La estación más cercana (CEILAP-BA), corresponde a un punto urbano en el gran Buenos Aires, Argentina, dista entre 300 y 800 km de los sitios de medida en Uruguay y sus medidas no son aplicables al área de interés de este trabajo, que es predominantemente rural.

Para estimar T_L promedio localmente se recurre a un método alternativo basado en información de irradiación solar de banda ancha distribuida en el territorio. También es posible estimar T_L localmente a partir de datos de irradiancia directa en incidencia normal (DNI) en condiciones de cielo claro, a partir de la Ec. 1 (Pedros et al., 1999; Raichijk y Fasulo, 2010; Remund et al., 2003; Laguarda y Abal 2016). Este método es el preferible si existe suficiente cobertura espacial en la información de DNI. Sin embargo, las medidas de larga estadística de DNI son relativamente escasas en el mundo, y en Uruguay actualmente sólo existe una medida permanente de DNI en el LES, en Salto. Es posible usar modelos fenomenológicos para obtener la radiación directa a partir de GHI, y luego usar la Ec. 1 para

obtener T_L (Cucumo, Kaliakatsos y Marinelli, 2000), pero la alta incertidumbre asociada a esos modelos (Abal et. al, 2016) afecta a los estimativos de T_L .

En este trabajo se utilizan ciclos anuales de T_L obtenidos con un método de minimización de residuos a partir de información de irradiancia global sobre plano horizontal en Uruguay (Laguarda y Abal, 2016). Este método, que permite una adecuada cobertura geográfica, consiste en utilizar un modelo de cielo despejado en una ubicación determinada y tomar T_L como un parámetro (diario o promedio mensual) a determinar comparando con medidas de irradiancia en tierra para condiciones de cielo despejado (Diabaté, Remund y Wald, 2003; Raichijk, 2009). Se ha utilizado el modelo ESRA para hallar valores medios mensuales de T_L en 10 estaciones de medida en Uruguay y la región. Se ajustó T_L de modo de minimizar el estadístico KSI, definido en la Ec. (7) de este trabajo, a nivel horario para datos del período 2010-2015. El método incluye técnicas de validación cruzada estándar, y fue validado en estaciones donde existen medidas disponibles de DNI simultáneas, obteniéndose diferencias menores al 10% de la media en términos de RMSD (Laguarda y Abal, 2016). En la región de interés T_L es un parámetro de variación relativamente lenta. Los valores medios mensuales son interpolados a nivel diario para generar un ciclo anual, evitando discontinuidades artificiales al cambiar el mes. Debido a que la dependencia espacial de los ciclos de T_L es débil en el territorio de interés, sólo 3 ciclos diarios (correspondientes a las regiones Norte, Sur y Centro) son usados, sin pérdida de desempeño en el modelo de cielo claro. Estos ciclos, mostrados en la Fig.1, presentan un comportamiento estacional, con un máximo en verano y un mínimo en invierno, asociado a una atmósfera más limpia y diáfana.

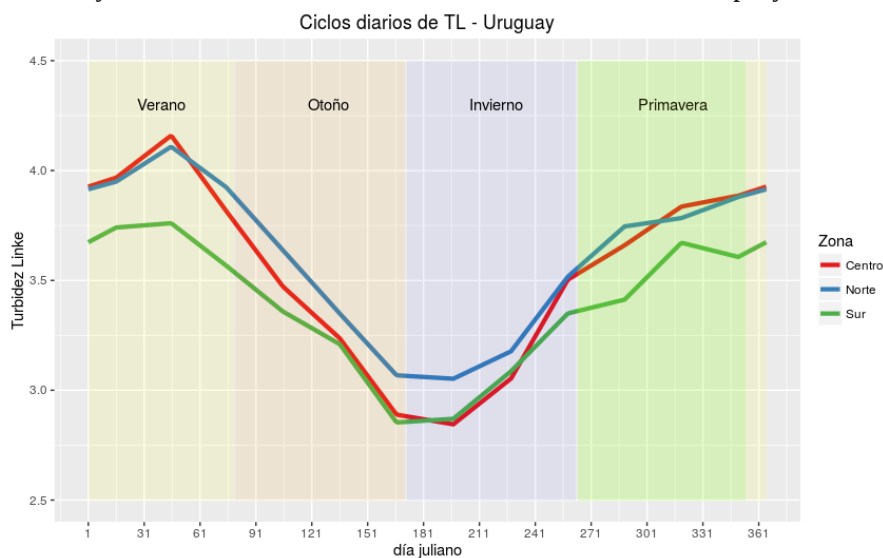


Figura 1- Ciclos mensuales interpolados a nivel diario de T_L para tres regiones de Uruguay. El día juliano es un ordinal entre 1 y 365.

2.2 Modelo para toda condición de cielo

El modelo propuesto para toda condición de cielo se basa en el modelo de cielo despejado ESRA. Para atenuar la irradiación de acuerdo a la nubosidad, se utilizan imágenes del satélite meteorológico GOES13, ubicado en la posición GOES-East. El método ensayado en este trabajo es similar al modelo SUNY, propuesto por Perez et al. (2002). El concepto central es que la irradiación a nivel de suelo es una porción de la que habría en condiciones de cielo despejado. Se parametriza la irradiación solar horaria de la siguiente forma:

$$I = I_{cc} (A + B(1 - C)) \quad (3)$$

En esta expresión, I es la irradiación horaria modelada, I_{cc} es la irradiación horaria de cielo despejado (estimada por el modelo ESRA), A y B son parámetros localmente ajustables y C es el índice de nubosidad definido a continuación. Tanto A y B , como C dependen de la ubicación.

Índice de nubosidad

Se utilizan las imágenes del canal visible del satélite geostacionario GOES-East, operado por la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés). Este satélite está ubicado en longitud de 75° W, a aproximadamente 35000 km de altura sobre el ecuador. La información es registrada por el radiómetro (GOES imager) en 5 canales (uno de ellos visible, los 4 restantes infrarrojos) con una cadencia temporal irregular para Sudamérica de aproximadamente media hora y una resolución espacial que sobre Uruguay es de aproximadamente 2 km x 2 km/píxel. La información está disponible a través del servicio en línea CLASS (<https://www.class.ngdc.noaa.gov>) de la NOAA. Desde el LES se mantiene una base de imágenes de este satélite que cuenta con 18 años de datos (desde el 2000 hasta la actualidad) (Alonso-Suárez, 2017). Cada imagen consiste en una

matriz georreferenciada de cuentas digitales que cuantifican el brillo de cada píxel. Estas cuentas digitales se convierten a radiancia y se normaliza por la máxima radiancia que se podría observar en la ventana espectral del radiómetro. El resultado es el factor de reflectancia (F_R), adimensionado. En su cálculo, se incluye la corrección orbital por la distancia Tierra-Sol variable y los coeficientes de calibración del radiómetro brindados regularmente por la NOAA para compensar la degradación del sensor en órbita. A partir del factor de reflectancia, se calcula la reflectancia planetaria (R_p), como:

$$R_p = \frac{F_R}{\cos \theta_z} \quad (4)$$

donde el coseno del ángulo cenital se calcula para cada píxel en la imagen. La reflectancia planetaria se conoce también como Albedo terrestre. El procedimiento de obtención del Albedo a partir de la cuentas digitales se realiza localmente en los servidores de computo del LES, procedimiento que se encuentra automatizado a partir de la recepción de imágenes automática del CLASS. Valores bajos de reflectancia corresponden al brillo de fondo en condiciones de cielo despejado. Valores altos de reflectancia corresponden usualmente a la presencia de nubosidad (en ausencia de nieve u otros fondos muy claros, condiciones que no se dan en Uruguay). Para utilizar esta información a escala horaria y alimentar modelos de irradiación solar en sitios específicos, la reflectancia es promediada espacialmente en una celda de 10' de latitud por 10' de longitud centrada en el sitio de interés. Sobre Uruguay, estas celdas representan un área de aproximadamente 15 km x18 km. Este procedimiento puede entenderse como una hipótesis ergódica, donde se asume que un promedio espacial de una imagen instantánea representa la media horaria de la reflectancia en el centro de la celda. El tamaño de la celda ha sido optimizado para utilizar el modelo a escala horaria sobre el territorio de Uruguay (Alonso-Suárez, 2017). Si se dispone de más de una imagen en la hora, éstas se promedian, obteniéndose de este modo una serie temporal horaria de reflectancia planetaria para cada sitio de interés. Dada la disponibilidad de imágenes satelitales sobre Sudamérica, los valores horarios provienen típicamente de la integración de dos o tres valores instantáneos.

El índice de nubosidad C se obtiene a partir de la reflectancia planetaria, utilizando valores máximo (R_{max}) y mínimo (R_{min}) adecuados, en forma similar a la propuesta por Cano et al. (1986):

$$C = \frac{R_p - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \quad (5)$$

Estos valores máximos y mínimos dependen de la hora del día y de la posición geográfica. Se impone $C=0$ si $R_p < R_{min}$ y $C=1$ si $R_p > R_{max}$. Los valores de R_{min} y R_{max} son críticos en la definición del índice de nubosidad. Distintas elecciones de estos valores pueden afectar en forma importante el desempeño del modelo satelital para irradiación solar. La variable R_{min} , asociada a condiciones de cielo descubierto y atmósfera limpia, depende del brillo de fondo en las imágenes. Por otro lado, R_{max} es constante y uniforme a primer orden de aproximación, ya que esta asociado a la presencia de nubosidad importante. En la Fig. 2 se muestra una serie temporal de reflectancia planetaria para un sitio ubicado al Sur del país, cercano a la ciudad de Montevideo, donde se pueden apreciar estos comportamientos. Para hallar la serie de R_{min} a utilizar en el modelo (resaltada en rojo en la figura) se toma una ventana móvil de 300 horas centrada en la hora de interés, y se promedian los 20 valores más bajos excluyendo posibles *outliers*. Como se puede apreciar en la Fig. 2, se obtiene una serie de valores R_{min} con un marcado comportamiento estacional.

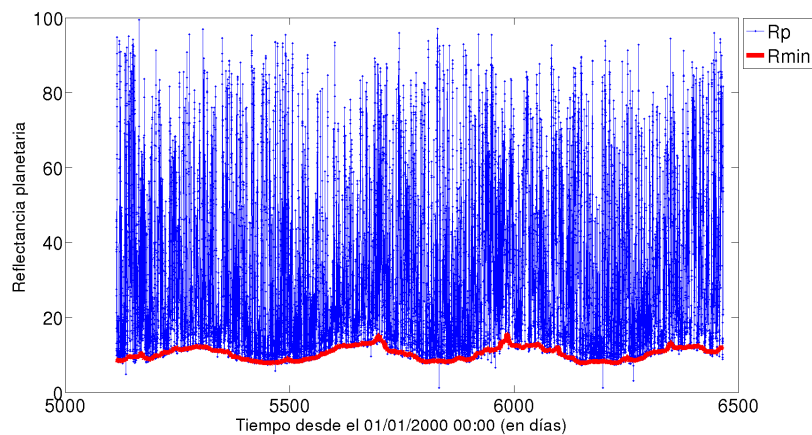


Figura 2- Serie temporal de reflectancia planetaria para LB. Se muestra en rojo el ciclo de reflectancia mínima hallado como la envolvente.

Para hallar la reflectancia máxima (parámetro que se supone constante) se realiza un estudio de la sensibilidad del desempeño del modelo al variar este parámetro desde 40% a 100% para distintas locaciones. Se encuentra que el desempeño es monótono creciente con este valor, y que a partir de un valor en el entorno de 80% se mantiene aproximadamente constante. Al final de la Sección 3 se muestra la respuesta del ajuste del modelo para diferentes valores de R_{max} . A valores más bajos de este parámetro se tienen menos *outliers* en la salida del modelo de irradiación por presencia de nubes excepcionalmente brillantes, por lo que se toma el valor de $R_{max} = 80\%$, que no compromete el desempeño del modelo.

3. VALIDACIÓN

En esta sección se valida el modelo contra datos de tierra utilizando un método de validación cruzada para asegurar la independencia de los indicadores con los datos usados para ajustar el modelo. Los indicadores utilizados son la desviación cuadrática media (RMSD), y la desviación media (MBD) se definidos en la forma usual como:

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad \text{MBD} = \frac{1}{N} \sum \hat{Y}_i - Y_i \quad (6)$$

donde Y_i indica medidas e \hat{Y}_i los valores estimados de una variable dada, ambos con N elementos. Estos indicadores se expresan frecuentemente en términos relativos como una fracción porcentual de la media de las medidas (rRMSD y rMBD). El RMSD aporta información sobre la dispersión entre los estimativos y las medidas, en tanto que el MBD informa sobre el sesgo medio del modelo.

Se utilizará también el índice estadístico integral de similitud de Kolmogorov-Smirnov (KSI) definido para una variable z con función de distribución acumulada F(z) como

$$\text{KSI} = \int_{z_{min}}^{z_{max}} D(z) dz \quad (7)$$

donde $D(z) = |F_{\hat{Y}}(z) - F_Y(z)|$. Este indicador, asociado al test de similitud de distribuciones de probabilidad del mismo nombre, caracteriza la distancia entre las distribuciones de las medidas y de los estimativos. El test sostiene como hipótesis nula que las series provienen de la misma distribución de probabilidad. Esta hipótesis es rechazada con confianza del 99% si D(z) supera el umbral $V_C = 1.63/\sqrt{N}$ para algún valor de z (Massey 1951). Se define KSI en

términos relativos al porcentaje del área umbral como $r\text{KSI} = \frac{\text{KSI}}{V_C(z_{MAX} - z_{MIN})} \cdot 100$. Pequeños valores de rKSI sugieren mayor similitud entre las distribuciones de las series.

3.1 Medidas en tierra

La irradiación horaria estimada por el modelo es comparada contra cinco años de mediciones terrestres de GHI en dos puntos de la red de medidas mantenida por el LES (Tab. 1). Estas estaciones están ubicadas en el extremo Norte y en el extremo Sur de Uruguay, separadas por unos 4 grados en latitud. Se considera el período enero 2012 – diciembre 2016 y se seleccionan las horas que coexisten con información satelital. El número de horas diurnas disponibles en cada sitio de acuerdo a este criterio se muestran en la última columna de la Tab. 1. Las medidas GHI de la red son registradas en régimen minutal con piranómetros de primera clase o superior, calibrados cada dos años en el LES contra un estándar secundario Kipp & Zonen CMP22. Dichas calibraciones son trazables al estándar secundario mantenido por el PMO World Radiation Center y a la referencia mundial radiométrica. Ambos sitios están ubicados en áreas rurales o semirurales, a baja altitud (menor a 140 m.s.n.m) en un clima templado.

Tabla 1: Detalles de las estaciones utilizadas, para el período enero 2012 a diciembre 2016.

Código estación	Zona	Latitud Sur (grados)	Longitud Oeste (grados)	Altura sobre el nivel del mar (m)	Horas seleccionadas
LB	Sur	34.67	56.34	37	14154
AR	Norte	30.40	56.51	136	13611

3.2 Ajuste del modelo e indicadores de desempeño

Para ajustar linealmente los parámetros A y B (Ec. 3) se utilizan las variables C , I , I_{cc} como parámetros conocidos y se emplea la validación cruzada. En este caso se toma al azar un conjunto con la mitad de los datos disponibles para una locación para ajustar A y B . Luego se construye el modelo para toda condición de cielo según la Ec. 3 y se lo valida contra los restantes datos no utilizados para el ajuste. Esta operación se itera mil veces, tomando nuevos datos aleatoriamente en cada iteración. De acuerdo al procedimiento, los indicadores y parámetros reportados en la Tab. 2 son los promedios de 1000 iteraciones. En la tabla se observa que los indicadores y parámetros son similares en ambas locaciones. El $rMBD$ es negativo y menor al 1% en ambos casos mientras que el $rRMSD$ es menor a 13 %. Por otra parte los $rKSI$ son menores a 21%, sugiriendo similitud entre las distribuciones de los estimados y los datos.

En la Fig.3 se comparan los datos en tierra contra los predichos por el modelo para la estación LB. En la Fig. 4 se muestra un histograma de las respectivas diferencias para la estación AR, donde se aprecia un sesgo sistemático bajo y una baja dispersión.

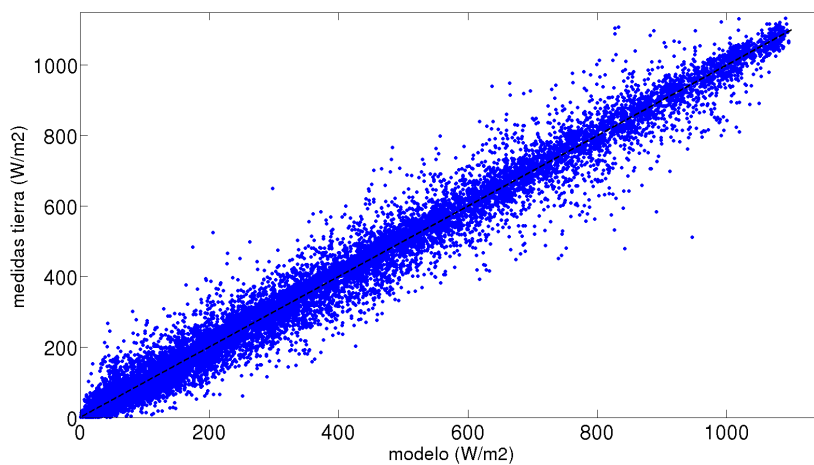


Figura 3- Medidas terrestres contra predicciones del modelo a nivel horario para LB.

En la Fig. 5 se muestra la distribución de datos disponibles para AR, junto con los indicadores de dispersión y desvío para diferentes combinaciones de índice de claridad y coseno del ángulo cenital. En términos generales, se observa un mejor desempeño del modelo cuando el coseno del ángulo cenital y el índice de claridad adoptan valores altos (cielo predominantemente despejado en torno al mediodía solar), como es de esperar.

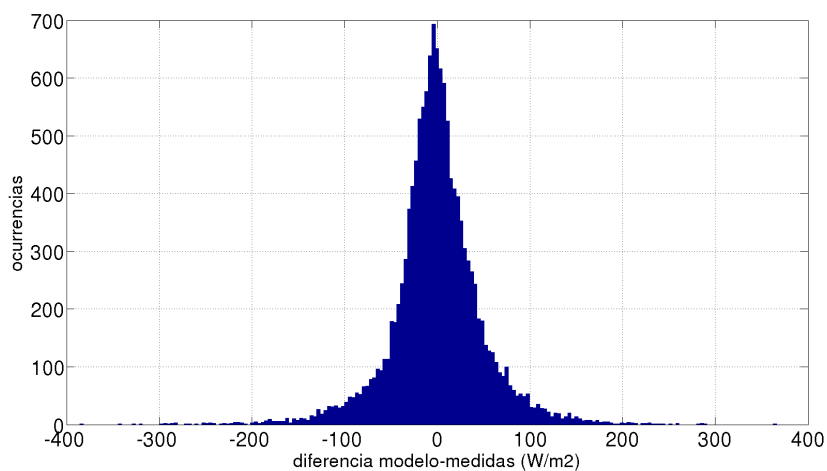


Figura 4- Histograma de las diferencias (en W/m^2) entre el modelo desarrollado y las medidas en tierra para AR.

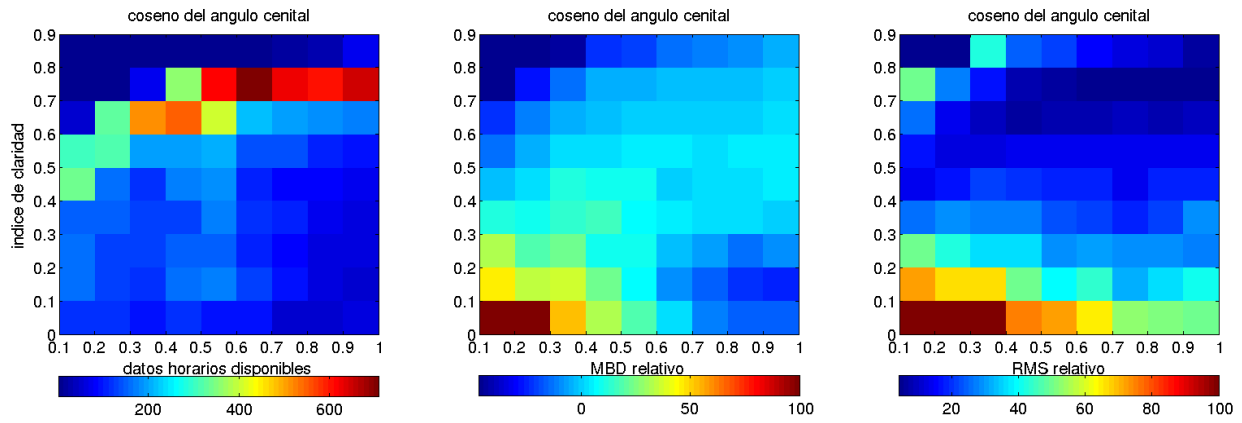


Figura 5- Distribución de disponibilidad de datos horarios (izquierda), desvío medio relativo rMBD (centro) y rRMSD (derecha) para LB según el índice de claridad (ordenadas) y el coseno del ángulo cenital (abscisas).

Tabla 2: Valores de los parámetros ajustados A y B, e indicadores relativos globales del desempeño del modelo para cada estación.

Código estación	Parámetros del modelo		Indicadores			Irradiación horaria media
	A	B	RMSD (%)	MBD (%)	KSI (%)	
LB	0.054	0.968	12.2	-0.55	17	393 W/m ²
AR	0.052	0.985	12.2	-0.12	21	412 W/m ²

En modelos como el definido en la Ec. 3, la irradiación está acotada por una irradiación máxima, $I_{cc} \times (A+B)$, y una mínima, $I_{cc} \times A$, para cada instante, por definición. Por este motivo este tipo de modelos tienden a sobrestimar para irradiación baja y subestimar para irradiación alta, como muestra Perez et al. (2015). Idealmente, en condiciones de cielo despejado $C=0$ y deberíamos tener $A+B=1$ (en este caso, habría sólo un parámetro independiente). Sin embargo, es frecuente en condiciones de cielo claro tener $C>0$, dado que la claridad de la atmósfera también depende de otros factores como la variación de la presencia de vapor de agua precipitable o aerosoles. Por tanto, con un único parámetro ajustable, no se evita la indeseable atenuación con respecto a I_{cc} en condiciones de cielo despejado. La experiencia muestra que manteniendo A y B independientes se logran mejores indicadores.

Sensibilidad de R_{max} :

A efectos de optimizar R_{max} , se realiza un análisis de sensibilidad. Al variar R_{max} varía la el índice de cobertura nubosa C, por lo que el ajuste los parámetros A y B retorna diferentes resultados. En la Fig. 7 se muestra la variación de A y B ajustados, así como el rRMSD relativo a la media para cada R_{max} para la estación LB (ambas estaciones dan resultados similares). Se puede observar que se alcanza un rRMSD mínimo para valores de R_{max} superiores a 70%. Para estar del lado de la seguridad, como se mencionó antes, se toma $R_{max} = 80\%$.

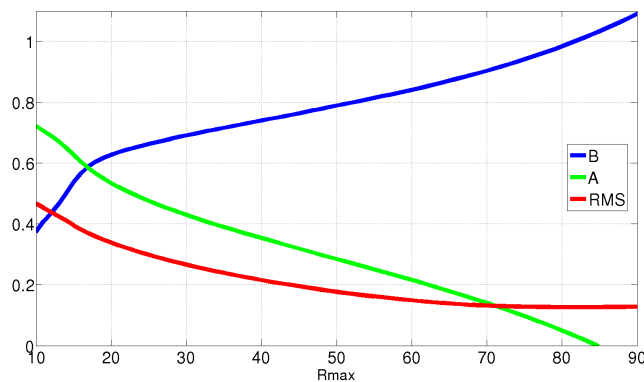


Figura 7- Estudio de sensibilidad del modelo con respecto al parámetro R_{max} para LB. Se muestran los parámetros A y B ajustados (adimensionados), y la desviación del modelo rRMSD normalizada (adimensionado entre cero y uno) en función de la reflectancia planetaria máxima.

4. CONCLUSIONES

Se implementa un modelo híbrido semi-empírico simple de irradiación global horaria para toda condición de cielo a partir del conocimiento del ciclo anual del parámetro TL, y de información satelital de reflectancia planetaria en el espectro visible. La información satelital se expresa en términos del índice de nubosidad. Este modelo es de bajo costo computacional y da resultados auspiciosos al ser evaluado en dos sitios en los extremos Norte y Sur de Uruguay. Se obtienen desviaciones cuadráticas medias (rRMSD) menores a 13% y sesgos (rMBD) menores al 1%, con respecto a la media de los datos medidos. La similitud de las distribuciones está avalada por rKSI menores a 21%. Estos indicadores preliminares resultan ser competitivos con el desempeño reportado en la literatura de modelos de estas características (Ineichen, 2014). Debido a su adaptación local, el modelo presenta mejor desempeño que modelos globales comercializados por consultoras internacionales (3TIER, 2013). La poca variabilidad espacial de los parámetros obtenidos y rendimiento del modelo auspician una aplicación de la metodología en regiones vecinas de topografía y clima similares.

Existen varios aspectos que pueden ser mejorarse a futuro. Los mismos se pueden resumir en dos categorías: (i) mejorar el desempeño de los modelos de cielo claro sobre la región objetivo y (ii) mejorar la construcción del índice de nubosidad o la parametrización por la cual se incorpora su efecto. Si bien el modelo de cielo claro ESRA es uno de los más precisos de su clase en la región (Laguarda y Abal, 2017), un siguiente paso es considerar la utilización de un modelo de alto rendimiento como el REST2 (Gueymard 2008), lo que implicaría contar con información más detallada del estado de la atmósfera local. En lo que refiere a la utilización del índice de nubosidad, una posibilidad es generar un mapa de parámetros A y B sobre el territorio de Uruguay que permiten utilizar un modelo adaptado a cada píxel.

REFERENCIAS

- 3TIER, 2013. Vaisala 3TIER services global solar dataset: Methodology and validation. Publicación de 3TIER, Octubre 2013.
- Abal, G., Aicardi, D., Alonso-Suárez, R., Laguarda, A., 2017. Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay. *Solar Energy* (2017), 141, 166-181.
- Alonso-Suárez, R., 2017. Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales. R. Alonso-Suarez. Tesis de Doctorado en Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UdelaR. Julio de 2017. Disponible en <http://les.edu.uy/investigacion/publicaciones-cientificas/>
- Alonso-Suárez, R., Siri, R., Abal, G. and Musé, P., 2012. Brightness-dependent Tarpley model for global solar radiation estimation using GOES satellite images: application to Uruguay. *Solar Energy* (2012) 86, pag. 3205–3215.
- Alonso-Suárez, R., Siri, R., Abal, G. and Musé, P., 2014. “Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay”. *Energy Procedia* 57 1237-1246.
- Alonso-Suárez, R., Siri, R., Abal, G., Toscano, P. and Musé, P., 2012. Recent advances in satellite-based solar resource assessment in Uruguay, Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference, Montevideo, Septiembre 3-5, 2012. Disponible en <http://les.edu.uy/investigacion/publicaciones-cientificas/>
- Cano, D., Monget, J., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N., Wald, L. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellites data. *Solar Energy*, Elsevier, 1986, 37 (1), pp.31-39.
- Cucumo, M., Kaliakatsos, D., Marinelli, V., 2000. A calculation method for the estimation of the Linke turbidity factor, *Solar Energy* 19, 249-258.
- Diabaté, L., Remund, J., Wald, L., 2003. Linke turbidity factors for several sites in Africa. *Solar Energy* 75, 111-119.
- Duffie, J. and Beckman, W., 2006. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, third edition.
- Espinar, B., Ramírez, L., Drews, A., Beyer, H. G., Zorzalejo, L. F., Polo, J., and Martín, L., 2009. Analysis of different comparison parameters applied to solar radiation data from satellite and german radiometric stations. *Solar Energy*, 83(1):118–125.
- Grenier, J.C., de la Casini, A., Cabot, T., 1994. A spectral model of Linke’s turbidity factor and its experimental implications. *Solar Energy*, 52, 303-313.
- Gueymard, C.A., 2008. REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation, *Solar Energy* 82, 272–285.
- Gueymard, C.A., 2014. A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 39, 1024-1034.
- Ineichen, P., 2014. Long term satellite global, beam and diffuse irradiance validation. In Elsevier Energy Procedia, volume 48, pages 1586–1596. Proceedings of the 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013).
- Justus, C., Paris, M., and Tarpley, J., 1986. Satellite-measured insolation in the United States, Mexico, and South America. *Remote Sensing of Environment*, 20: 57–83.
- Kasten, F., 1996. The linke turbidity factor based on improved values of the integral rayleigh optical thickness. *Solar Energy* (1996) 56, 239–244.
- Laguarda, A., Abal, G., 2016. Índice de Turbidez de Linke a partir de irradiación global en Uruguay. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 20, 11.35-11.46. Disponible en <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php>

- Laguarda, A., Abal, G., 2017. Clear-Sky Broadband Irradiance: First Model Assessment in Uruguay. Proceedings of Solar World Congress 2017, 29/10-2/11, Abu Dhabi, EAU. To appear in <http://proceedings.ises.org/>
- Massey, F.J., 1951. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association* 46, 68–78.
- Pedrós, R., Utrillas, M.P., Martínez-Lozano, J.A., Tena, F., 1999. Values Of Broad Band Turbidity Coefficients In A Mediterranean Coastal Site, *Solar Energy* 66, 11-20.
- Perez, R., Cebecauer, T., and Šúri, M., 2013. Chapter 2 - semi-empirical satellite models. In Kleissl, J., Editor, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pp. 21–48. Academic Press, Boston.
- Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmieciak, M., Chain, C., George, R., and Vignola, F., 2002. A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. *Solar Energy*, 73, 307–317.
- Perez, R., Schlemmer, J., Hemker, K., Kivalov, S., Kankiewicz, A., and Gueymard, C., 2015. Satellite-to-irradiance modeling - a new version of the SUNY model. *IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 1–7.
- Perez, R., Seals, R., and Zelenka, A., 1997. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. *Solar Energy*, 60(2):89-96.
- Polo, J., 2015. Solar global Horizontal and direct normal irradiation Maps in Spain derived from geostationary Satellites, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 130-131, pp. 81-88.
- Polo, J., Zarzalejo, L., Ramírez, L., 2008. Solar Radiation Derived from Satellite Images, in Badescu (ed), V., *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*. 449-461: Springer.
- Raichijk, C., 2009. Estimación del índice de turbidez de linke para distintas localidades de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, vol. 13, pp. 11-16.
- Raichijk, C., Fasulo, A., 2010. Estudio de la turbidez atmosférica en la ciudad de San Luis. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, vol. 25.
- Remund, J., Wald, L., Lefevre, M., Ranchin, T., Page, J. Worldwide Linke turbidity information. *ISES Solar World Congress 2003*, Jun 2003, Göteborg, Sweden. *International Solar Energy Society (ISES)*, 13 p.
- Righini, R. y Barrera, D., 2008. Empleo del modelo de Tarpley para la estimación de la radiación solar global mediante imágenes satelitales Goes en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)* Vol. 12, pp. 11.9-11.15.
- Rigollier, C., Bauer, O., Wald, L., 2000. On the clearsky model of the ESRA- European Solar Radiation Atlas - with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, vol.68, No.1, pp. 33-48.
- Rigollier, C., Lefèvre, M., Wald, L., 2004. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, vol. 77, pp.159-169.
- Spencer, J.W., 1971. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2:172.
- Vignola, F., Grover, C., Lemon, N., McMahan A., 2012. Review: Building a bankable solar radiation dataset, *Solar Energy* 86 (2012) 2218–2229.
- Zelenka, A., Perez, R., Renee, D., 1999. Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. *Theoretical and Applied Climatology* 62: 199-207.

SIMPLE SEMI-EMPIRICAL MODEL OF SOLAR GLOBAL IRRADIATION FROM GOES SATELLITE IMAGES

Abstract. The knowledge of the solar irradiation reaching the Earth's surface is necessary for the development, design and simulation of solar energy projects. The modern way for estimating the solar resource on specific sites or over large territorial extensions is through satellite images. The frequency of the information generated by geostationary meteorological satellites is sufficient to model the resource on a hourly time scale. In this work we present a simple satellite-based model to estimate global solar hourly irradiation in an horizontal plane at ground level. The model combines a clear sky model whose main parameter, the Linke turbidity factor, was locally estimated, with a cloud index obtained from the GOES13 satellite images. The proposed model is hybrid in its nature, as it combines a physical model with a statistical parameterization, and has two parameters that are locally adjustable to ground measurements. In the evaluation in two sites in Uruguay, a relative average deviation (rMBD) of less than 1% and a relative mean square deviation (rRMSD) of the order of 13% were obtained, expressed in terms relative to the mean of the measures. These values are competitive with the performance of other adjusted models in the same region. This is the first evaluation of a hybrid model on the territory of Uruguay and is part of systematic local research actions that are aimed to reduce the uncertainty of this type of models for its use in the region.

Key words: solar global irradiation, cloud index, ESRA model, SUNY model.