

Tema 11 – Radiación solar y clima

ÍNDICE DE TURBIDEZ DE LINKE A PARTIR DE IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN EL URUGUAY

A. Laguarda¹, G. Abal²

Laboratorio de Energía Solar (LES), Universidad de la República (UdelaR)
Cno. Luis B. Berres, km 508, CP 50000, Salto, Uruguay . Tel: +59847303400
Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Udelar
Herrera y Reissig 565, CP 11300, Montevideo, Uruguay. Tel:+59827110905

RESUMEN:

En este trabajo se utiliza el modelo de cielo claro ESRA para estimar el promedio mensual de T_L para 10 estaciones la zona geográfica que comprende el territorio del Uruguay y áreas cercanas, a partir de datos de tierra de irradiación solar global horaria sobre plano horizontal para condiciones de cielo claro. Una vez seleccionadas las horas claras, se utiliza un método sencillo basado en la minimización de un indicador estadístico KSI para determinar el mejor valor de T_L . Los valores medios obtenidos para cada mes, se comparan con los estimativos Meteonorm para las ubicaciones correspondientes.

Palabras clave: Recurso solar, Turbidez Linke, modelos de cielo claro, Uruguay.

INTRODUCCIÓN

La nubosidad es el principal factor que afecta la irradiancia solar incidente sobre una superficie horizontal (GHI) y es responsable de la mayor parte de la incertidumbre asociada a su estimación. Un modelo bien ajustado de irradiación global por satélite genera estimativos horarios de GHI con una incertidumbre típica de 13 % de la media horaria (Alonso-Suárez et al., 2012; Alonso-Suárez et al. 2014). En condiciones de cielo claro (ausencia de nubes), conociendo la composición atmosférica local, es posible describir en detalle los procesos de dispersión y absorción de radiación y calcular la irradiancia global en superficie con baja incertidumbre, típicamente < 5 % de la media. Existen diversos modelos que pueden ser usados para este fin (Inechien 2006; Gueymard 2012), pero la calidad de estos estimativos está limitada por la calidad de los datos de entrada con que se cuenta. Variables de entrada típicas son la columna de vapor de agua, la columna de Ozono y la densidad y tipo de aerosoles presentes en la atmósfera. Estas magnitudes varían temporal y espacialmente debido a efectos naturales y, a veces, a la actividad humana, como en el caso de los aerosoles y no es frecuente contar con medidas de tierra de calidad para las mismas. Por otro lado, contar con estimativos de baja incertidumbre para la irradiancia global horizontal en condiciones de cielo claro (GHIc) permite realizar buenos controles de calidad sobre las series temporales de datos de GHI y, en conjunto con información detallada de la nubosidad obtenida por satélite o por cámaras de cielo, constituye una buena base para modelar irradiancia solar por satélite con baja incertidumbre. En emprendimientos comerciales de aprovechamiento (térmico o eléctrico) de la energía solar, es importante contar estimativos adecuados de las condiciones de irradiancia máxima bajo las cuales deberán operar los equipos. Ésta información puede obtenerse de un modelo de cielo claro bien ajustado a las condiciones locales.

Entre los modelos de cielo claro, el modelo ESRA (Rigollier et al., 2000) se destaca por describir el estado de la atmósfera usando un único parámetro globalizador. Este parámetro se conoce como

1 Correo electrónico: laguarda@fing.edu.uy

2 Correo electrónico: gonzalo.abal@gmail.com

Turbidez Linke, T_L , y puede interpretarse como el número de atmósferas secas y limpias (atmósfera de Rayleigh) que produciría los mismos efectos de atenuación y dispersión observados (para masa de aire 2) en la atmósfera real en ausencia de nubes. Por definición $T_L = 1$ describe una atmósfera de Rayleigh solo con efectos de dispersión molecular y $T_L > 1$ representa en forma efectiva los efectos del vapor de agua (y otros gases) y de los aerosoles presentes en la atmosférica real local. Es posible estimar T_L a partir de datos de tierra de irradiancia solar (directa o global) bajo condiciones de cielo claro usando el modelo ESRA. Existen al menos tres enfoques para determinar T_L a partir de datos de radiación de banda ancha en superficie. El primero y más directo está relacionado con el uso de medidas de radiación directa en incidencia normal (DNI) para determinar T_L , generalmente a nivel horario (Pedros et al., 1999; Raichijk y Fasulo, 2010; Remund et al., 2003). En caso de existir medidas de DNI, este es el método de preferencia. Sin embargo, las medidas de DNI son comparativamente escasas y frecuentemente se debe recurrir a series de GHI. Es posible usar modelos fenomenológicos para estimar DNI a partir de GHI y luego estimar T_L a partir de DNI (Cucumo et al., 2000), pero la incertidumbre en la estimación de DNI inevitablemente se traduce en incertidumbre en T_L , por lo que no se usará esta metodología en este trabajo. Otra opción usar el modelo ESRA para calcular la radiación global en condiciones de cielo claro para una ubicación determinada y considerar T_L , como una variable (diaria o mensual) a determinar, para tener el mejor ajuste con los datos (Diabaté et al., 2003; Raichijk, 2009). Por otro lado, si se cuenta con medidas locales de columna de vapor de agua y espesor óptico monocromático en una o más longitudes de onda, es posible calcular T_L directamente (Remund et al., 2003).

Diversos investigadores han realizado estimaciones locales de T_L a partir de observaciones en tierra, usando alguna variante de estos métodos. Pedrós estimó T_L y otras medidas de turbidez a partir de medidas de irradiancia directa y global en Valencia, España (Pedrós, 1999). Cucumo propuso usar medidas de irradiancia solar global diaria para días claros para estimar T_L , utilizando una correlación estadística genérica para estimar la irradiancia directa (Cucumo et al, 2000). Este tipo de métodos indirectos están afectados por altas incertidumbres introducidas por la separación directa-difusa. Diabaté et al. han estimado T_L a partir de datos diarios de GHI para 16 ubicaciones en África (Diabaté et al, 2009). Existen en la literatura otras variantes de este enfoque (Mavromatakis and Franghiadakis, 2007; Polo 2009). En la región, Tiba ha estimado T_L a partir de datos de tierra para la Amazonia (Tiba 2006) y Pernambuco (Tiba y Pimentel, 2009) en el norte de Brasil. Raichijk y colaboradores han estimado T_L (medias mensuales) para varias localidades de Argentina trabajando directamente con la irradiancia global diaria promedio medida por la red solarimétrica argentina (Raichijk, 2009) y, para la ciudad de San Luis, estimaron T_L a partir de irradiancia directa horaria en incidencia normal (DNI) (Raichijk y Fasulo, 2010). Mas recientemente, se han elaborado cartas de T_L para la Pampa Húmeda Argentina (Raichijk y Taddei, 2014) combinando valores de T_L estimados a escala mundial por Meteonorm (Remund, 2003) con datos de tierra de irradiancia solar global y usando técnicas de interpolación para generar isocurvas de T_L promedio mensual a partir de esta información base. Los estimativos de T_L promedio mensual están disponibles gratuitamente en el servicio SODA (www.soda-is.com) para todo el planeta con resolución espacial de 20' de grado (Remund, 2003). Los mismos integran distintos tipos de información de tierra, cuando esta disponible, con estimativos de irradiancia global de cielo claro del modelo NASA/SSE, de alcance global y basado en datos satelitales. El resultado es una aproximación a los valores medios mensuales de T_L en el mundo, pero su exactitud depende de la disponibilidad que tuvo el autor al momento de elaborarlo de datos locales de calidad. Polo y colaboradores han propuesto un interesante método, basado en regularidades en los residuos, para mejorar los estimativos Meteonorm usando información local de irradiancia solar global a mediodía solar bajo condiciones de cielo claro (Polo et al, 2009).

En este trabajo se utiliza el modelo de cielo claro ESRA para estimar el promedio mensual de T_L a partir de datos de tierra de irradiación solar global horaria para diez estaciones en la zona geográfica que comprende el territorio del Uruguay y áreas cercanas. Una vez seleccionadas las horas claras de GHI, se utiliza un método basado en la minimización del indicador estadístico KSI para determinar el mejor valor de T_L . Para dos estaciones en las cuales se dispone de medidas simultáneas de DNI y GHI, se obtiene T_L promedio mensual a partir de DNI y se utilizan estos valores para validar el método basado en GHI. Los valores medios de T_L obtenidos para cada mes en cinco estaciones se comparan con los estimativos globales proporcionados por la empresa Meteonorm a efectos de evaluar la incertidumbre de los mismos.

DATOS UTILIZADOS

Se utilizaron medidas de tierra de irradiación solar global horaria sobre plano horizontal (I_h) para diez estaciones distribuidas en la región (nueve en Uruguay y una en Argentina). Todas ellas están situadas en sitios rurales o semirurales. En la Tabla 1 se detalla su ubicación, período de medidas usadas, horas totales y horas claras utilizadas. Tres de ellas (Rozeno Mendoza (RM), Rincón del Bonete (RB) y Buena Unión (BU)) son estaciones automáticas ubicadas en predios del Instituto Nacional de Colonización y administradas por la compañía eléctrica de Uruguay (UTE). Estas estaciones miden GHI con cadencia 10-minutal, utilizando radiómetros fotovoltaicos Licor SL 200 calibrados bi-anualmente en el Laboratorio de Energía Solar (LES) de Uruguay. Las otras seis estaciones son administradas parte de la Red de Medidas Continuas de Radiación Solar, administradas por el Laboratorio de Energía Solar de UdelaR. Todas estas medidas corresponden a piranómetros Kipp & Zonen (primera clase o estándar secundario) calibrados bi-anualmente en el LES. Están ubicadas en predios del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) o del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), donde reciben limpieza diaria. Estas medidas son filtradas por control de calidad y luego integradas automáticamente para generar radiación solar horaria y diaria. La estación LE es la estación principal del LES, ubicada a 10 km de la ciudad de Salto, junto a la frontera con Argentina. Esta estación recibe mantenimiento diario y utiliza piranómetros Kipp & Zonen CMP10 (estándar secundario) con ventilación por aire seco y pirheliómetro Kipp & Zonen CHP1 montado en un seguidor solar SOLYS2. En todos los casos, como estándar para la calibración de piranómetros se utiliza un piranómetro Kipp & Zonen CMP 22 calibrado en el PMOD en Abril de 2014, con trazabilidad al patrón mundial (WRR) mantenido por el World Radiation Center en Davos, Suiza. La estación LU esta ubicada en Luján, Prov. de Buenos Aires, en el Laboratorio del Grupo de Estudios de Radiación Solar, de la Universidad Nacional de Luján, Argentina. Los datos de GHI fueron tomados por un piranómetro Kipp & Zonen CM11 y los de DNI por un pirheliómetro Eppley NIP montado en un seguidor solar SOLYS2 de Kipp & Zonen. Como se aprecia en la Tabla 1, todas las estaciones tienen latitudes entre 30 S y 35 S y alturas menores a 160 m snm. El área de interés para este trabajo incluye todo el territorio del Uruguay, y es una llanura pampeana homogénea sin accidentes geográficos importantes. Sin embargo, se distingue un clima templado-frío en la zona costera (Sureste) y un clima templado-cálido en la zona Noroeste del territorio. Esta diferencia puede manifestarse, por ejemplo, en los niveles medios de vapor agua precipitable en la atmósfera.

METODOLOGÍA

Como se mencionó en la introducción la metodología para estimar T_L a partir de datos de I_h para cielo claro, se basa en modelar esta magnitud usando el modelo ESRA dejando T_L como un parámetro ajustable. Luego se define un indicador de bondad de ajuste entre el valor de I_h modelado y medido y se minimiza con respecto a T_L .

EST Cod.	LAT grados	LON grados	ALT m snm	período temporal	admin	cadencia min	horas válidas	horas claras
AR	-30.40	-56.51	136	12.2011 - 12.2015	LES/INIA	1	11718	5370
LB	-34.67	-56.34	37	10.2010 - 12.2015	LES/INIA	1	18719	7981
RO	-34.49	-54.31	20	06.2011 - 07.2015	LES/INIA	1	13171	5011
SA	-31.27	-57.89	50	06.2010 - 03.2015	LES/INIA	1	16914	8457
TT	-33.28	-54.17	35	05.2010 - 12.2015	LES/INIA	1	19638	7660
RB	-32.80	-56.42	72	04.2010 - 07.2015	UTE	10	19250	9119
BU	-31.06	-55.60	160	04.2010 - 07.2015	UTE	10	18946	7221
RM	-34.34	-57.58	74	05.2010 - 12.2015	UTE	10	14929	6851
LU	-34.59	-59.06	69	01.2011 - 06.2012	GERSolar	1	6503	2731
LE	-31.28	-57.92	50	01.2015 - 06.2016	LES	1	6507	1392

Tabla 1: Ubicación de las estaciones de medida. Código de estación, latitud (LAT), longitud (LON) en grados decimales, altura sobre el nivel del mar (ALT) en metros. Período de datos utilizados, propietario y mantenimiento, número de horas válidas y número de horas claras. Todas las estaciones miden GHI y las estaciones LU y LE miden además DNI.

En esta sección describimos los detalles de esta implementación. El primer paso es la selección de horas claras en la serie horaria de GHI.

Criterios de selección automática de horas claras

Para identificar los datos correspondientes a condiciones de cielo claro se utiliza el algoritmo descrito en (Remund, 2003) sobre los datos GHI para hallar las horas claras de forma automatizada. Este algoritmo propone una serie de 5 filtros sucesivos que se aplican sobre los datos de GHI horarios:

1. DNI < 200 W/m². En los casos en los que no se cuenta con información simultánea de DNI se estima esta componente usando la correlación de Erbs (Erbs et. Al, 1982). Si bien esto es solo aproximado, resulta adecuado para discriminar horas con baja DNI.
2. El índice de cielo claro k_t' debe ser menor a un valor umbral igual a 0.7 (Molineaux y Delaunay, 1995). Este índice se define como (Perez et al., 1990)

$$k_t' = \frac{k_t}{0.1 + 1.031 \exp\left(\frac{-1.4m}{9.4 + 0.9m}\right)} \quad (1)$$

Siendo $k_t = I_h / I_0$ el índice de claridad horario usual y m la masa de aire.

3. El índice de claridad diario, $K_t = H_h / H_0$, debe ser mayor a 0.4
4. Si, para un día dado, las horas claras seleccionadas no superan el 40% de las horas diurnas, el día es desechado.
5. Se descartan las horas con altura solar menor a 10 grados.

Luego de aplicado el conjunto de filtros 1 a 5, resulta el conjunto de horas seleccionadas como claras por cada estación. En la última columna de la Tabla 1 se indica el total de horas claras por estación.

Modelo ESRA de cielo claro

El modelo de cielo claro ESRA (Rigollier et al., 2000) estima las componentes directa y difusa de la irradiancia sobre un plano horizontal y luego las suma para obtener la irradiancia global,

$$I_h = I_{bh} + I_{dh} \quad (2)$$

El modelo utiliza como entradas la ubicación geográfica (latitud, longitud y altura) y el valor de T_L únicamente. Al utilizarlo para irradiación horaria se usa la altura solar (α_s) y la masa de aire (m) en el punto medio de la hora correspondiente. La componente directa esta dada por

$$I_{bh} = I_0 f_n \sin \alpha_s \exp(-0.8662 T_L \delta_R m) \quad (3)$$

donde $I_0 = 1367 \text{ Wh/m}^2$ es la constante solar horaria, f_n es la corrección orbital con respecto al valor medio de 1 Unidad Astronómica que depende solo del día juliano y se usó la expresión de Spencer descrita en (Duffie y Beckman, 2013) y $\delta_R(m)$ es el espesor óptico de Rayleigh, que es función de la masa de aire, como se describe más adelante. Como se mencionó en la introducción en esta expresión T_L esta asociado a una masa de aire $m=2$. El factor 0.8662 en la ec. (2) es producto de la evolución de la parameterización de δ_R . Cuando se utiliza para δ_R la relación pirheliométrica originalmente propuesta por Kasten (Kasten, 1984), la absorción por gases permanentes en la atmósfera no es tenida en cuenta, por lo que los efectos asociados a estos gases quedarían atribuidos a la turbidez (Inechien y Perez, 2002; Mavromatakis y Franghiadakis, 2007). Parametrizaciones más recientes han resuelto este problema (Louche et al., 1986; Grenier et al., 1994; Kasten, 1996). Es decir que δ_R aumenta con los ajustes al pasar a incluir los efectos de gases permanentes, y por tanto, $T_L(m)$ disminuye ya que el producto $T_L(m) \times \delta_R(m)$ debe ser invariante. Para $m=2$ el cociente entre las parametrizaciones (antigua y nueva) del espesor óptico de Rayleigh es 0.8662. La expresión usada para $\delta_R(m)$ es la dada en (Kasten, 1996) y la masa de aire m , corregida por efectos de difracción y de altura, se calcula a partir de la expresión de (Kasten y Young, 1989) según se indica en (Rigollier, 2000). No se implementan las correcciones por efectos de altura propuestas en (Remund, 2003), dado que los efectos de altitud no son muy relevantes en la región considerada en este trabajo (la mayor elevación entre las estaciones de datos es de 160 m snm).

La radiación difusa incidente sobre plano horizontal se expresa como el producto de la radiación que llega al tope de la atmósfera, por un factor de transmitancia difusa en un camino vertical T_z ($\alpha_s = 90$ grados) por un modificador angular de difusa F_d ,

$$I_{dh} = I_0 f_n T_z(T_L) F_d(\alpha_s, T_L) \quad (4)$$

Las expresiones utilizadas para la transmitancia difusa T_z y el modificador angular F_d son las propuestas en (Rigollier, 2000).

Cálculo de T_L a partir de datos de superficie

Método I: determinación a partir de medidas de DNI

La ec. (3) permite obtener T_L a partir de medidas de DNI bajo condiciones de cielo claro,

$$T_L = \frac{1}{0.8662 m \delta_R(m)} \ln \left(\frac{I_0 f_n}{DNI} \right) \quad (5)$$

Esta ecuación puede utilizarse en ausencia de nubosidad en torno al mediodía solar para determinar valores instantáneos de T_L . Una vez obtenidos los valores candidatos a T_L para las horas previamente seleccionadas como claras, se realiza un segundo filtrado que contiene dos criterios (Gueymard and Garrison, 1998) diseñados para descartar horas en las que T_L tiene un valor demasiado alto, producido en general por la presencia de nubosidad tenue. En otras palabras, se corrigen posibles defectos del proceso de filtrado de horas claras:

1. Si la diferencia entre los valores T_L de dos horas consecutivas supera 0.5, el segundo valor se descarta. Este criterio se basa en que T_L describe turbidez de la atmósfera y se espera que varíe poco a escala horaria.
2. Todos los valores de T_L de cierto día que supere la mediana +1 para el día, se descartan como outliers. Los T_L dentro de un día sufren ciertas variaciones, como mostramos más adelante. Sin embargo, si el día es claro, se espera que esa variación difiera de la mediana en menos de una unidad.

Como puede verse en la Fig. 2, ambos criterios resultan razonables dados los niveles de variación diaria esperables. Por último, los valores filtrados se separan por mes. Dentro de cada mes se halla la mediana, más robusta ante outliers que la media, y de esa forma se determina el T_L para ese mes. A efectos de caracterizar la incertidumbre, se utilizó una versión robusta del desvío absoluto medio (MAD), ec. (5), basada en la mediana en vez del promedio.

Método II: determinación a partir de medidas de GHI

Partiendo de la ec. (2), pueden obtenerse estimativos horarios de GHI para un valor dado de T_L . Comparando estos estimativos con medidas de GHI en condiciones de cielo claro, es posible hallar el valor óptimo de T_L (promedio mensual) que da el mejor ajuste a los datos.

Existen diversos posibles indicadores de concordancia entre n valores medidos \hat{Y}_i y n valores estimados Y_i . Por ejemplo, el desvío cuadrático medio (RMSD), MAD o el desvío promedio (MBD), definidos por

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i| \quad MBD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i - Y_i \quad (5)$$

Otro indicador útil es el estadístico KSI (parámetro de Kolmogorov-Smirnov) ya que es más sensible que los otros indicadores. Para una variable positiva z , el parámetro KSI se define como

$$KSI = \int_{z_{min}}^{z_{max}} D(z) dz \quad \text{donde} \quad D(z) = |F_{\hat{Y}}(z) - F_Y(z)| \quad (5)$$

donde F_Y es la función de probabilidad acumulada para la variable Y , siendo Y e \hat{Y} los vectores de medidas y valores estimado por el modelo, respectivamente. En este caso, la variable Y es GHI horaria y la variable z varía entre 0 y el máximo de GHI registrado. De esta forma el indicador KSI (que tiene dimensiones de irradiancia, W/m^2) es una medida de la distancia entre las distribuciones de

los datos de tierra y de los estimativos. A menor KSI, mejor ajuste y mejor capacidad predictiva del modelo. En este trabajo se hallan valores mensuales de T_L en cada estación a partir de series horarias de GHI, utilizando un método de minimización basado en el estadístico KSI. El uso de KSI para esta tarea se debe a que su mínimo esta mejor definido que en el caso de MAD o RMSD, como se muestra en la Fig. 1. El valor mensual de T_L y su incertidumbre asociada fue determinada por validación cruzada, dividiendo el conjunto de datos en diez subconjuntos al azar, usando nueve de ellos como conjunto de entrenamiento para determinar T_L , y el 10 % de los datos restantes como conjunto de validación. Este proceso se repite diez veces, cambiando el conjunto de validación, y son los promedios de los resultados obtenidos en cada iteración los que se consideran como T_L y como indicador de incertidumbre.

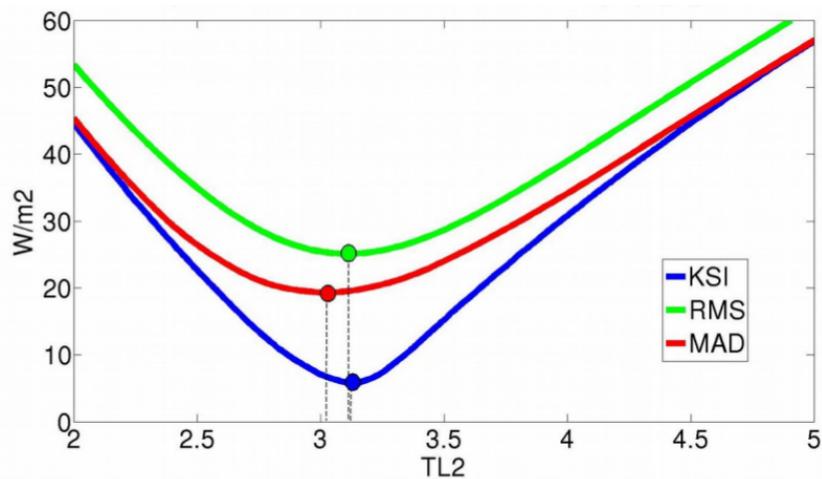


Figura 1: Dependencia de los indicadores KSI, RMS y MAD (ecs. (5) y (6)) del modelo ESRA utilizando T_L como variable independiente para la estación LB en términos absolutos. Los círculos marcan el mínimo en cada caso.

RESULTADOS y ANÁLISIS

Variación horaria de T_L

Usando el método I, es posible obtener valores de T_L a partir de información minutal de DNI bajo condiciones de cielo claro. Esto es útil ya que nos permite evaluar la variabilidad de este parámetro a lo largo de un día claro, como se muestra en la Fig. 2 para un día claro de otoño 2015 en la estación LE (Salto). La variación de TL a lo largo del día es de $\pm 8\%$ de la media, con mínimos en la mañana y tarde y un valor máximo en torno al mediodía solar. Durante la mañana y tarde, la variación sucede a una tasa de aproximadamente ± 0.2 /hora.

Para cada mes, a partir de este método se obtienen series con 115 valores horarios de T_L en promedio. Estos valores se combinan para dar la media del mes usando la mediana, que resulta en un estimativo más robusto frente a outliers. Los valores de TL promedio obtenidos de esta forma se indican en la Tabla 3 y el ciclo anual de T_L se muestra en la Fig. 5. En la Fig. 3 se muestra un histograma con la frecuencia ocurrencia de valores de T_L para el mes de marzo obtenidos para la estación de LU (Luján) por el método I.

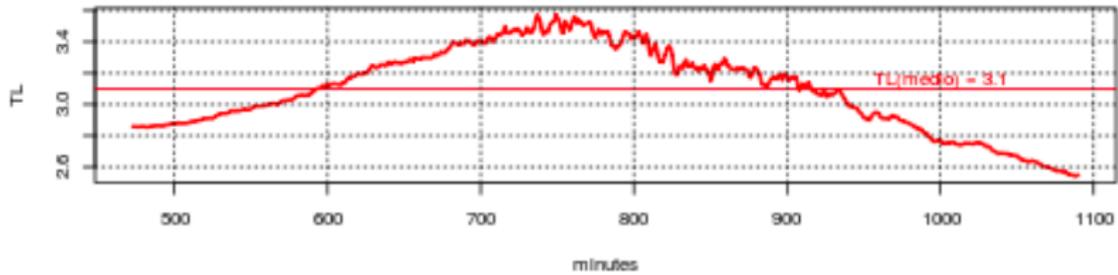


Figura 2: Valores de T_L la estación LE (Salto) para un día claro (01 de Abril de 2015) obtenidos de la ec. (2), usando DNI con $\alpha_s > 20$ grados. En ambos casos el eje horizontal representa el minuto del día.

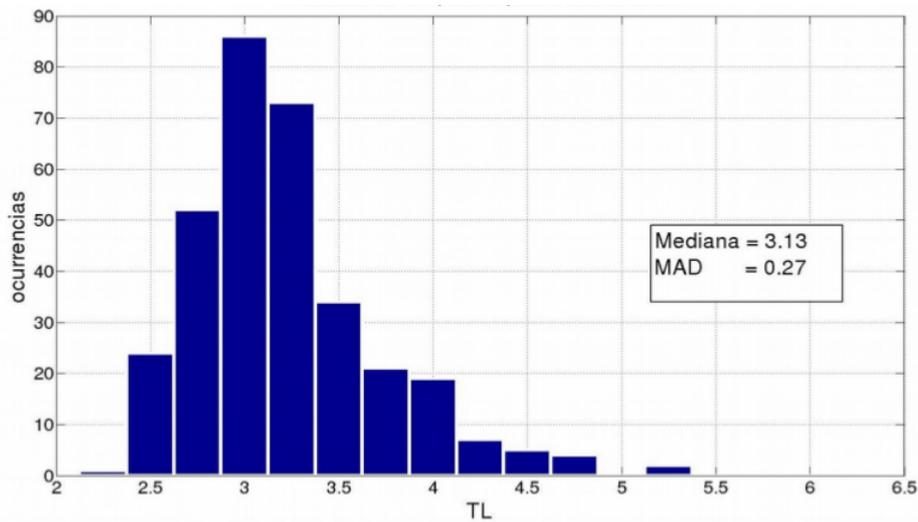


Figura 3: Histograma de ocurrencias de T_L para el mes de marzo obtenidos por el método I a nivel horario para la estación LU.

Promedio mensual de T_L a partir de GHI

Dado que la variabilidad de T_L no es muy grande, es frecuente que se recurra a trabajar con promedios mensuales de T_L . Dependiendo de la aplicación, esto puede dar información suficientemente precisa sobre la irradiancia de cielo claro.

En la Fig. 4 se muestran los ciclos de T_L para las diferentes ubicaciones, obtenidos por el método de minimización de KSI (método II). Se observa una variación estacional con atmósfera más clara en invierno que en verano. En la Tabla 2 se indican los valores de T_L medio por estación y sus desviaciones estándar, que son menores a 0.5 para todas las estaciones.

Mes\ estación	AR	LB	RO	SA	TT	RB	BU	RM	LU	LE	media	RMSD
enero	3.9	3.6	3.8	3.6	3.8	4.1	4.4	3.8	3.8	3.6	3.8	0.2
febrero	4.2	3.8	3.9	3.7	3.6	4.3	4.5	4.0	3.6	3.7	3.9	0.3
marzo	3.9	3.5	3.6	3.6	3.7	4.0	4.3	3.6	3.6	3.5	3.7	0.3
abril	3.7	3.4	3.3	3.5	3.4	3.7	3.8	3.2	3.4	3.2	3.5	0.2
mayo	3.4	3.2	3.1	3.3	3.3	3.5	3.4	3.0	3.0	3.3	3.2	0.1
junio	3.1	3.0	2.7	3.0	2.9	3.1	3.1	2.6	2.8	2.5	2.9	0.2
julio	3.1	3.0	2.7	3.0	2.9	3.1	3.0	2.6	2.9	2.8	2.9	0.2
agosto	3.2	3.2	3.1	3.1	3.0	3.3	3.3	2.8	2.8	2.9	3.1	0.2
setiembre	3.5	3.4	3.5	3.4	3.2	3.7	3.7	3.4	3.4	3.0	3.4	0.2
octubre	3.7	3.4	3.3	3.5	3.5	3.9	4.1	3.5	3.5	3.5	3.6	0.2
noviembre	3.4	3.5	3.7	3.6	3.8	4.0	4.3	3.7	3.8	3.3	3.7	0.3
diciembre	3.7	3.5	3.7	3.6	3.6	4.0	4.3	3.7	3.8	3.4	3.8	0.3
media anual	3.6	3.4	3.4	3.4	3.4	3.7	3.8	3.3	3.4	3.2	3.5	-
RMSD anual	0.3	0.2	0.4	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.4	0.3	-	0.2

Tabla 2: Promedios mensuales de T_L obtenidos a partir de medidas de GHI con el método de minimización de KSI.

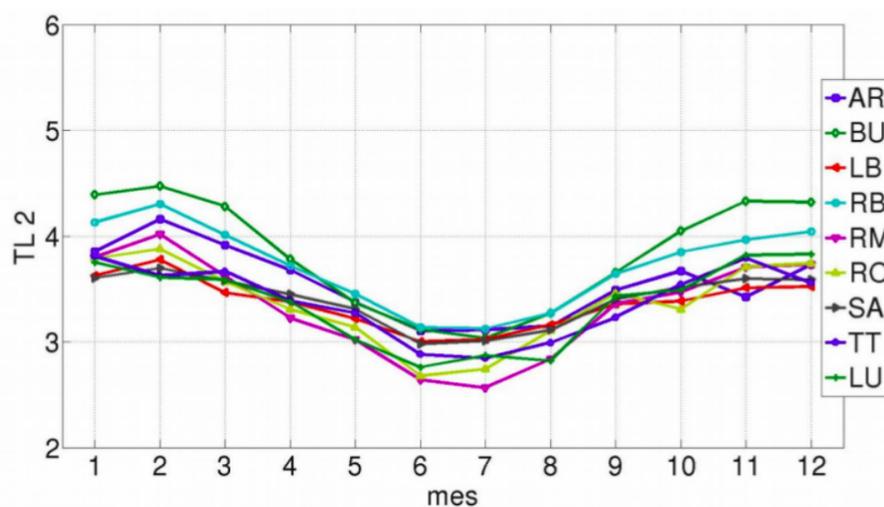


Figura 4: Valores medios mensuales de T_L obtenidos a partir de GHI de cielo claro para las estaciones consideradas en este trabajo (Tabla 1). Los valores numéricos e incertidumbres se muestran en la Tabla 3.

Los promedios mensuales de T_L obtenidos por el método II se validaron contra datos de tierra por validación cruzada (90-10). Este proceso asegura la independencia de la validación con los datos de entrenamiento. Por lo que el método es útil para evaluar inferir el rendimiento del modelo ESRA contra la base de datos utilizada. Promediando los indicadores mensuales para tener indicadores globales en cada estación, se obtienen los indicadores de la Tabla 3. Se puede observar que, en términos generales, el modelo ESRA con el parámetro de Turbidez Linke ajustado por el método II presenta un sesgo de -0.5% y un RMS menor a 5 % con respecto a la GHI media de cada estación.

indicador\ estación	AR	LB	RO	SA	TT	RB	BU	RM
MBD (%)	-0.4	-0.3	-0.5	-0.2	-0.4	-0.6	-0.6	-0.6
RMS (%)	4.6	4.4	5.1	4.0	4.7	4.1	4.4	5.1
GHI (W/m ²)	617	578	579	610	593	590	603	584

Tabla 3. Desempeño medio de modelo de cielo claro ESRA para diferentes ubicaciones. La última fila muestra la irradiancia promedio de las horas válidas para cada estación, con respecto a la cual se calculan los indicadores relativos.

Validación del método II

En las estaciones LU y LE se cuenta con información simultánea de GHI y DNI, por lo que se pueden comparar los valores de T_L promedio obtenidos por ambos métodos, a efectos de evaluar los resultados del método II. El resultado de esta comparación se muestra en la Fig. 5 y en la Tabla 4, donde se indican los valores medios de T_L para cada mes y estación obtenidos por ambos métodos. En el caso del método I, se usa la mediana para obtener el valor medio de T_L . Ambos métodos producen ciclos anuales similares. La media anual es la misma en LE y la diferencia entre medias es de 5.2 % (de la media del método I) en el caso de LU. Los desvíos medios son menores a 0.2 en ambas estaciones. En ambas estaciones se observa una tendencia del método II a dar valores mayores de T_L que los del método I.

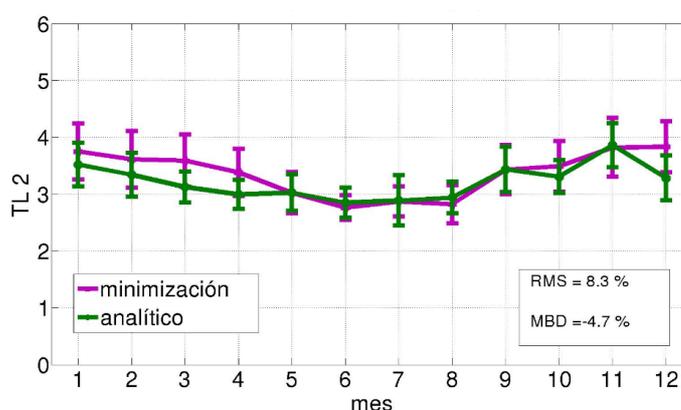


Figura 5: Ciclos para LU obtenidos por los dos métodos con sus barras de incertidumbre. Los indicadores RMS y MBD, caracterizan las diferencias en relación a la media, usando el método I como referencia.

El acuerdo entre los T_L determinados por ambos métodos es bueno y da soporte a la metodología usada en el método II, que es más indirecta. El método de minimización muestra una pequeña sobreestimación de 4% que puede estar asociada imperfecciones en el filtrado de horas claras. En términos absolutos anuales, la comparación entre ambos métodos tiene un MBD de 0.11 y un RMSD de 0.15, lo cual es similar a lo reportado por (Raichijk y Taddei, 2014) al comparar T_L de dos métodos diferentes para una ubicación.

Otra fuente de estimativos T_L a nivel global es servicio Soda (www.soda/is.com), que vincula información de tierra con estimativos satelitales de GHI de NASA/SSE para cielo claro para estimar T_L promedio mensual para cualquier parte del mundo (Remund, 2003).

Mes\ estacion	LE			LU		
	T _L (met 1)	T _L (met 2)	diferencia	T _L (met 1)	T _L (met 2)	diferencia
enero	3.4	3.6	0.2	3.5	3.8	0.3
febrero	3.4	3.7	0.3	3.3	3.6	0.3
marzo	3.4	3.5	0.1	3.1	3.6	0.5
abril	3.1	3.2	0.1	3.0	3.4	0.4
mayo	3.2	3.3	0.1	3.0	3.0	0.0
junio	2.7	2.5	-0.2	2.8	2.8	0.0
julio	-	2.8	-	2.9	2.9	0.0
agosto	-	2.9	-	2.9	2.8	-0.1
setiembre	-	3.0	-	3.4	3.4	0.0
octubre	3.4	3.5	0.1	3.3	3.5	0.2
noviembre	3.2	3.3	0.1	3.9	3.8	-0.1
diciembre	3.2	3.4	0.2	3.3	3.8	0.5
Media anual	3.2	3.2	0.1	3.2	3.4	0.2
MBD (%)	3.4			5.2		
RMSD (%)	4.6			8.6		

Tabla 4: Valores medios de T_L obtenidos por el método 1 para dos estaciones. Se muestran las diferencias mensuales entre las medias de cada método: $T_L(\text{met 2}) - T_L(\text{met 1})$. En las últimas dos filas se indica el desvío medio, MBD, y el RMSD entre ambos métodos expresados como % de la media del método 1. En el ciclo de la estación LE está incompleto por falta de datos durante algunos meses.

Mes\ estación	SA	RO	LB	SA	AR	Media
enero	3.9	3.6	3.8	3.6	3.8	3.3
febrero	4.2	3.8	3.9	3.7	3.6	3.4
marzo	3.9	3.5	3.6	3.6	3.7	3.3
abril	3.7	3.4	3.3	3.5	3.4	3.1
mayo	3.4	3.2	3.1	3.3	3.3	3.3
junio	3.1	3.0	2.7	3.0	2.9	3.2
julio	3.1	3.0	2.7	3.0	2.9	2.7
agosto	3.2	3.2	3.1	3.1	3.0	3.0
setiembre	3.5	3.4	3.5	3.4	3.2	3.3
octubre	3.7	3.4	3.3	3.5	3.5	3.4
noviembre	3.4	3.5	3.7	3.6	3.8	3.2
diciembre	3.7	3.5	3.7	3.6	3.6	3.3
media anual	3.6	3.4	3.4	3.4	3.4	3.2

Tabla 5: Estimativos de T_L promedio mensual para cuatro estaciones, obtenidos del servicio SODA (www.soda-is.com).

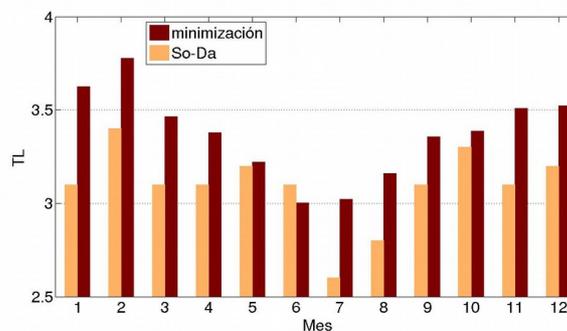


Figura 6: Comparación de estimativos SODA con el método II para la estación LB.

La Tabla 5 muestra estimativos de T_L promedio mensual obtenidos del servicio SODA para cuatro de las estaciones usadas en este trabajo. Las Figs. 6 y 7 muestran gráficamente la comparación con los T_L estimados por el método II para la estaciones LB (ubicada en el Sur) y SA, en el Noroeste. En ambos casos el ciclo anual aparece menos definido en los estimativos SODA.

La Tabla 6 muestra los indicadores para esta comparación, tomando como referencia los promedios de T_L calculados por el método II para cada estación. Se observa un sesgo negativo importante en todos los casos: los estimativos T_L de Meteonorm tienden a ser menores que los medidos en tierra. El

fenómeno es más fuerte en las estaciones costeras de la subregión Sur, donde se observan desvíos de -10 % y -13 %. Esto puede estar vinculado a la descripción del vapor de agua en la atmósfera, que en zonas costeras puede presentar una variabilidad importante. Por otro lado, el desvío observado en la estación SA (Salto, al Noroeste) es muy bajo y la descripción Metenorm buena, con RMSD de 5 %. En términos absolutos, combinando todos los meses de las cuatro estaciones, la comparación resulta en un MBD de -0.25 y un RMSD de 0.31. Estos valores resultan ser similares a los reportados al comparar estimativos Meteonorm contra T_L por datos de tierra para Luján en (Raichijk y Taddei, 2014).

	SA	RO	LB	AR	media
MBD (%)	-0.5	-13.4	-9.9	-5.6	-7.3
RMSD (%)	5.2	16.5	11.5	9.1	10.5
MAD (%)	4.4	14.4	10.4	7.0	9.0
T_L (W/m²)	3.4	3.4	3.4	3.6	3.4

Tabla 6: Indicadores para la comparación de estimativos T_L de SODA/Meteonorm tomando como referencia los estimativos calculados en este trabajo, por el método II.

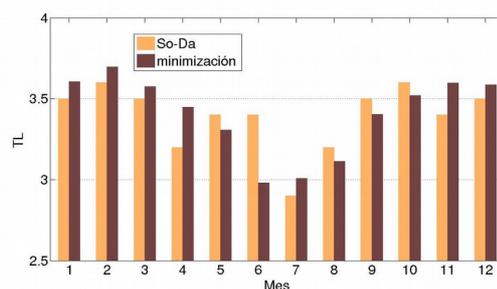


Figura 7: Comparación de estimativos SODA con el método II para la estación SA.

CONCLUSIONES

Se calcularon los ciclos anuales del coeficiente de Turbidez de Linke (T_L) para $m = 2$ para 9 ubicaciones en Uruguay y una cercana, en Argentina usando datos de irradiación global horaria sobre plano horizontal (GHI). Se utilizó un método propio basado en la minimización de los residuos entre GHI estimada por el modelo ESRA y GHI medida. El método de optimización se basa en validación cruzada (9-1) y minimiza el indicador KSI (índice de Kolmogorov-Smirnov). En dos estaciones para las cuales se cuenta con medidas de irradiancia directa en incidencia normal (DNI) se compararon los estimativos T_L obtenidos directamente de DNI con los obtenidos por GHI. Se observan diferencias menores a 10% de la media en términos de RMSD, usando el método basado en DNI como referencia. Ambos estimativos son consistentes, teniendo en cuenta su incertidumbre asociada.

Los resultados para T_L presentan un comportamiento estacional bien marcado, mostrando mínimos de 2.5 para los meses de invierno y máximos de 4.4 en los meses de verano, en concordancia con los obtenidos en otros trabajos (Raichijk, 2009; Raichijk, 2012) para estaciones cercanas a la región. El método propuesto de minimización muestra ser suficientemente preciso para caracterizar la variación temporal de T_L . Además es conveniente, ya que utiliza como insumo únicamente mediciones de GHI, que son más abundantes en comparación a las de DNI. Usando los valores de T_L óptimos, se evaluó además el desempeño del modelo de cielo claro ESRA contra datos de tierra independientes. El modelo presenta desvíos menores a 5 % de la media, con sesgo despreciable. Este nivel de ajuste lo hace adecuado para su uso en aplicaciones de control de calidad automatizado de datos de tierra.

También se compararon los estimativos de T_L generados con los proporcionados por el proyecto SoDa (www.soda-is.com). Los ciclos anuales aparecen menos definidos en los estimativos SODA/Meteonorm y se observa una subestimación de T_L en todas las estaciones consideradas, con un efecto más marcado en las estaciones cercanas a la costa atlántica, donde el sesgo llega a ser de -13 %. El desvío cuadrático medio entre estos estimativos es de 10 %, aunque en estaciones particulares, lejos

de la costa, la concordancia es mejor. En suma, los estimativos Meteronorm son indicadores útiles para modelar irradiancia de cielo claro globalmente, pero deben utilizarse con precaución en ya que no resuelven las anomalías climáticas locales.

Es posible continuar avanzando en una mejora en la precisión de la estimación de TL en la región, e incluso para avanzar hacia una estimación en tiempo real, basada en medidas pirheliométricas continuas ya existentes en la región. Métodos similares al sugerido por (Polo et al, 2009) pueden ser una alternativa interesante para montar un proceso de refinación continua de los estimativos de T_L basados en redes de medidas de GHI en tierra.

AGRADECIMIENTOS: Los autores agradecen a Raul Righini y Carlos Raichijk del GerSolar (UNL) por la cesión de los datos de GHI y DNI de la estación LU. Este trabajo contó con apoyo financiero del Fondo Sectorial de Energía (ANII) proy. FSE_2013_10919 y de la CSIC (Uruguay).

REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, G. Abal, R. Siri, P. Musé, (2012). Brightness-dependent Tarpley model for global solar radiation estimation using GOES satellite images: application to Uruguay. *Solar Energy* 86, pp. 3205–3215.
- Alonso-Suárez, R., G. Abal, R. Siri, P. Muse, Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay, *Energy Procedia* 57 (2014) pp. 1237-1246.
- Cucumo, M., Kaliakatsos, D., Marinelli, V., A calculation method for the estimation of the Linke turbidity factor. *Renewable Energy* (2000) 19, 249–258.
- Diabaté, L., Remund, J., Wald, L. Linke turbidity factors for several sites in Africa. *Solar Energy* (2003) 75, 111–119.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*, Wiley.
- Erbs, D., Klein, S., Duffie, J., (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy* 28, 293–302.
- Gueymard, C. A., (2012). Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models, *Solar Energy* 86 2145–2169.
- Inechien, P., (2006) . Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks, *Solar Energy* 80, pp. 468–478.
- Ineichen, P., Perez, R., (2002). A new air mass independent formulation for the linke turbidity coefficient. *Solar Energy* 73, 151–157.
- Kasten, F. (1984). Parametrisierung der Globalstrahlung durch Bedeckungsgrad und Trubungsfaktor. *Ann. der Meteorol. Neue* 20, 49–50.
- Kasten, F., (1996). The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness 56, 239–244.
- Louche, A., Peri, G., Sanguinares, R., (1986). An analysis of linke turbidity factor, *Solar Energy* 37, 393–396.
- Mavromatakis, F., Franghiadakis, Y., (2007). Direct and indirect determination of the Linke turbidity coefficient, *Solar Energy*, 81, 896–903.
- Molineaux, B., Delaunay, J.J., (1995). Direct luminous efficacy and atmospheric turbidity: improving model performance, *Solar Energy*, 55, 125–137.
- Pedros, 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, No. 1, pp. 11–20.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Zelenka, A., (1990). Making full use of the clearness index for

- parameterizing hourly insolation conditions. *Solar Energy* 1, pp. 3–6.
- Polo J., Zarzalejo, L.F., Martín, L., Navarro, A.A., Marchante, R., (2009). Estimation of daily Linke turbidity factor by using global irradiance measurements at solar noon, *Solar Energy* 83, 1177–1185.
- Raichijk, C., (2009) . Estimación del índice de turbidez de linke para distintas localidades de Argentina, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, 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.
- Raichijk, C., Taddei, F., (2014) . Cartas del índice de turbidez de Linke para la pampa húmeda argentina, *Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 2, pp. 11.01-11.08.
- Remund, J., Wald, L., Lefevre, M., Ranchin, T., Page, J., (2003). Worldwide Linke turbidity information. ISES Sol. World Congress.
- Rigollier, C., Bauer, O., Wald, L., (2000). On the clear sky model of the ESRA — European Solar Radiation Atlas — with respect to the heliosat method. *SE* 68, 33–48. Tiba, C. ;
- Pimentel, V. M., (2009). Estimating Atmospheric Linke Turbidity Index From Climatic Data For Pernambuco. *Proceedings of ISES Solar World Congress 2009, Johannesburg -South Africa. International Solar Energy Society.*
- Tiba, C. (2006). Estimating atmospheric Linke turbidity from climatic data for Amazonian tropical sites. In: *WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS IX, Florence - Italy. CD ROM.*

ABSTRACT

The ESRA clear-sky model is used to estimate monthly averages for Linke's Turbidity, T_L , using GHI ground data from 10 sites distributed over a geographical area which includes the whole territory of Uruguay and neighbouring areas. Once the clear-sky hours are selected, a simple minimization method based on the minimization of the KSI (Kolmogorov-Smirnov index) is used to obtain the optimum value of T_L for each month using cross-validation techniques to estimate the uncertainty in the estimates. The method is validated at two sites by comparing its estimates with those derived directly from DNI measurements. The ESRA model with locally adjusted T_L values provides clear-sky hourly irradiance with typical RMSD under 5 % of the mean. The monthly means for T_L are compared to those provided globally by Meteonorm at four sites. A systematic underestimation at all sites is observed, and at some sites close to coastal areas, large biases are found.

Keywords: solar resource assessment, Linke Turbidity, clear sky model, Uruguay.