

IMPACTO DE LA INCERTIDUMBRE DE LAS VARIABLES ATMOSFÉRICAS DE LA BASE MERRA-2 EN EL MODELADO DE LA IRRADIANCIA SOLAR EN CIELO DESPEJADO

Agustín Laguarda¹, Gonzalo Abal²

¹Laboratorio de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, UDELAR, Herrera y Reissig 565, CP:11300, Montevideo, Uruguay, agu.laguarda@gmail.com

²Laboratorio de Energía Solar, CENUR LN, UDELAR, Av. Luis Batlle Berres km 508, CP 50000, Salto, Uruguay, gonzalo.abal@gmail.com

RESUMEN: Un modelo realista de irradiancia solar en cielo claro incluye el efecto de varios componentes atmosféricos con concentración variable en la atmósfera (como los aerosoles o el vapor de agua). Esta información no se encuentra disponible, salvo en sitios puntuales (por ejemplo, la red Aeronet), por lo que se recurre a estimativos por satélite. La precisión de la información de entrada puede afectar significativamente el desempeño de un modelo. Aquí se presenta una validación para la región centro-este de Sudamérica (Pampa Húmeda) de estimativos de profundidad óptica de aerosoles, exponente de Angström y concentración de vapor de agua de la base de reanálisis MERRA-2 contra datos de tierra de la red Aeronet. Se asigna una incertidumbre típica a la información MERRA-2 necesaria para el modelado de la irradiancia solar en cielo claro y, en segunda instancia, se estudia el impacto de esta incertidumbre en los estimativos de irradiancia solar en cielo claro en la región utilizando dos modelos de referencia (REST-2 y ESRA).

Palabras clave: Modelos de cielo claro, MERRA-2, aerosoles, vapor de agua, sensibilidad.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de irradiancia global bajo cielo despejado son la base de modelos de irradiancia por satélite bajo toda condición de cielo (Laguarda et al., 2020) y son usados en algoritmos de pronóstico de recurso solar (Yang, 2020; Alonso-Suárez, 2020) y en control de calidad de datos tierra. Existen varios modelos de irradiancia solar en cielo claro (MCC) en uso (Gueymard, 2012) y su desempeño depende, en parte, de la precisión de la información de entrada que describe el estado de la atmósfera local. Además de la dispersión Rayleigh, un modelo MCC debe contemplar la atenuación por componentes variables de la atmósfera, como aerosoles y vapor de agua (Polo-2019). Para que un MCC alcance su máximo desempeño, es necesario alimentarlo con información atmosférica de entrada precisa y con la distribución espacial y cadencia temporal adecuadas. Diferentes fuentes de información atmosférica pueden afectar significativamente el desempeño de un MCC (Engerer-2015). En última instancia, la elección del mejor MCC en una región dada queda condicionada por la calidad de la información disponible sobre el estado de la atmósfera. Información de aerosoles y vapor de agua a partir de mediciones sistemáticas de calidad controlada está disponible públicamente en algunas ubicaciones. Por ejemplo, la red Aeronet (Aerosol Robotic Network - <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) es una federación de estaciones terrestres gestionada por la NASA y otras contrapartes y provee información con control de calidad sobre la atmósfera y el océano en más de 250 sitios actualmente operativos, distribuidos en el planeta.

Cuando no hay estaciones de medida cercanas a los sitios de interés se debe recurrir a otras fuentes como estimativos satelitales (basados en algoritmos de inversión de medidas de radiancia espectral e interpolación espacial) para la información atmosférica necesaria. Un ejemplo es la base MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer - <https://modis.gsfc.nasa.gov/>) gestionada por NASA y basada en el instrumento MODIS montado en los satélites Terra y Aqua. Existen además bases de re-análisis, que incorporan información atmosférica obtenida a partir de diversos satélites y observaciones a modelos numéricos y ofrecen la posibilidad de contar con series temporales regulares y físicamente consistentes de varias décadas.

Este trabajo considera la base de datos consistidos de libre acceso de la NASA, MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version-2), que provee diversas variables atmosféricas a nivel horario para el período 1980-actualidad (sin huecos), para todo el globo. En particular aquí consideramos los estimativos de concentración de vapor de agua (w), profundidad óptica de aerosoles (AOD) y coeficiente de Angström (α). La región de interés es la zona de la Pampa Húmeda (latitud entre 28° S y 38° S), un área semi-rural, de clima templado y baja altitud que incluye el territorio de Uruguay y partes de Argentina y Brasil. El objetivo es cuantificar la incertidumbre asociada al uso de estas variables en la región y estimar su impacto en la precisión de los estimativos de irradiancia solar de cielo claro. El trabajo se divide en dos partes: i) Validación de los estimativos MERRA-2 de w , AOD₅₅₀ y α utilizando como referencia información de Aeronet para tres sitios cercanos a la zona de interés (Ceilap-Buenos Aires, Argentina; San Martino da Serra, Rio Grande do Sul, Brasil; y CETT-Córdoba, Argentina). Esta validación nos permite asignar una incertidumbre típica a los estimativos MERRA-2 para estas variables en la región. ii) Evaluación del impacto de estas incertidumbres sobre los estimativos de DNI (irradiancia solar directa en incidencia normal) y GHI (irradiancia solar global sobre plano horizontal) generados a partir de dos modelos de cielo claro frecuentemente utilizados: REST-2 (Gueymard, 2008) y ESRA (European Solar Radiation Atlas, Rigollier, 2000) para un sitio representativo de la zona de interés en Salto, en el noroeste de Uruguay.

Recientemente se ha realizado una validación de la información de aerosoles en bases de re-análisis a escala global (Gueymard, 2020), pero la sensibilidad de los modelos a variaciones en las variables atmosféricas de entrada es un aspecto en el que se ha puesto poca atención en la literatura. Algunos ejemplos en esta dirección son los estudios realizados por Polo (2014) o, más recientemente, Gueymard (2019). Éste estudio integra ambos aspectos con foco en una región relativamente poco relevada.

DATOS Y MODELOS UTILIZADOS

Las variables seleccionadas para validar son la profundidad óptica de aerosoles a 550 nm (AOD₅₅₀), el exponente de Angström α (relacionado con la distribución de tamaños de los aerosoles) y la columna de agua precipitable (w). Estas variables son un insumo frecuente en modelos de irradiancia solar de cielo claro y contienen la información necesaria para modelar la atenuación producida por aerosoles y vapor de agua. Se utiliza AOD₅₅₀ por ser esta la variable reportada usualmente por la base MERRA-2. A través de la relación de (Angström, 1929)

$$AOD_{\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad (1)$$

donde λ se expresa en micras y la turbidez de Angström, β , se interpreta como la profundidad óptica a 1 micra. Las profundidades ópticas a diferentes longitudes de onda se relacionan según

$$AOD_{\lambda_1} = AOD_{\lambda_2} (\lambda_2/\lambda_1)^{\alpha}. \quad (2)$$

La dispersión por aerosoles es un fenómeno continuo en términos de longitud de onda, y cualquier AOD que se utilice contiene información similar con respecto a la extinción por aerosoles. Los

fenómenos de *absorción* de aerosoles son espectralmente selectivos, pero su peso relativo en la profundidad óptica en comparación a la dispersión es pequeño.

Base de datos de re-análisis MERRA-2

El re-análisis asimila en forma sistemática observaciones de variables climáticas a modelos numéricos climáticos para obtener conjuntos físicamente consistentes de información para el monitoreo del sistema climático e investigación en general. Observaciones desde la superficie o desde sensores en el espacio se combinan en una base de datos consistida o de re-análisis. Se destacan dos bases de acceso libre: la del Copernicus Atmospheric Modelling System (CAMS), del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF (Innes et al.2019) y MERRA-2 (Gelaro et al.,2017), de la National Aeronautics and Space Administration de EUA, NASA. Este trabajo se centra en la base MERRA-2, resultado de un re-análisis basado en el modelo atmosférico GEOS-5 (Global Earth Observing System Version 5). MERRA-2 incluye información de los instrumentos satelitales MODIS (desde el 2000), MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) y AVHRR (Advanced Very-High Resolution Radiometer) en los periodos 2000-2014, y 1980-2002, respectivamente, así como de observaciones en superficie de Aeronet del período 1999-2014. A partir de esta información provee varias variables a nivel horario en el período 01/01/1980-presente con resolución espacial de $0.5 \times 0.625^\circ$ sobre todo el globo. La representatividad espacial de las variables de entrenamiento que asimila MERRA-2, puede variar notablemente según la región (Buchard et al., 2017), por lo que es necesario explorar la validez de la base a nivel local (Gueymard and Yang, 2020). La base MERRA-2 es de libre acceso a través del portal Giovanni <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/> y sus características se resumen en la Tabla 1.

El reciente estudio de Gueymard and Yang (2020) evalúa los estimativos asociados a aerosoles de CAMS y MERRA-2, específicamente AOD_{550} y α , a nivel 3-horario en 25 climas según la clasificación Koppen Geiger actualizada (Peel, 2007) para el período 2003-2017 utilizando medidas de casi 800 estaciones Aeronet. Se concluye que ambos conjuntos de datos son globalmente similares, siendo la base MERRA-2 un poco más precisa a la hora de estimar AOD_{550} . Para climas clasificados como Cfa en Koppen Geiger, como la mayor parte de la Pampa Húmeda, los estimativos de AOD_{550} de MERRA-2 muestran un sesgo medio (MBD) de -0.003, y un desvío cuadrático medio (RMSD) de 0.098 (adimensionadas), mientras que para α es -0.151, y 0.373 (adimensionadas), respectivamente.

Resolución Especial	Resolución temporal	Período disponible	Información asimilada
$0.5^\circ \times 0.625^\circ$	1 h	1980 - hoy	MODIS, MISR, AVHRR, Aeronet

Tabla 1. Detalles sobre base MERRA-2. En este trabajo se usan los productos AOD_{550} , w y α (500-870).

Base de Datos de Aeronet

Aeronet es una red mundial de estaciones equipadas con fotómetros solares y otros instrumentos, que estiman a través de algoritmos de inversión propiedades de la atmósfera (aerosoles, vapor de agua, ozono) desde la superficie terrestre. La red es operada por un consorcio integrado por NASA y colaboradores de agencias nacionales, institutos y universidades en todo el mundo. Los nodos Aeronet cumplen con una estandarización de instrumentos y su calibración, así como el procesamiento de datos y su distribución. Las medidas se realizan con radiómetros espectrales CIMEL Electronique CE-318 de visión angosta, emplazados sobre seguidores solares automáticos de precisión, que miden la irradiancia directa del Sol y del cielo en varias bandas espectrales en la región visible e infrarroja. Utilizando algoritmos de inversión se obtiene información sobre profundidad óptica de aerosoles espectral, AOD y vapor de agua, w , entre otros productos. La información es computada en tres niveles de calidad: nivel 1.0 (sin filtrar), nivel 1.5 (control de calidad y filtro de nubosidad) y nivel 2.0 (calidad asegurada) con pre y post-calibración, filtro de nubosidad y control

visual. La red cuenta en la actualidad con más de 290 estaciones operativas que proveen información nivel 2 sobre todo el globo y cuenta con un histórico de casi 800 estaciones (Giles et al., 2019). La base nivel 2, utilizada en éste trabajo, cuenta con estimaciones instantáneas de α en los intervalos espectrales 340-440, 440-870, 380-500, 440-675 y 500-870 nm y de AOD_{550} .

Modelos de Cielo Claro (MCC)

A efectos de evaluar el impacto de la incertidumbre asociada a los estimativos MERRA-2, en este trabajo se utilizan dos MCC: REST-2 (Gueymard, 2008) y ESRA (Rigollier et al., 2000). El primero es un modelo que puede utilizar diversa información atmosférica de entrada y alcanzar un excelente nivel de precisión. El segundo es un modelo sencillo que engloba en forma efectiva en un único parámetro (la turbidez de Linke T_L), la información sobre aerosoles y vapor de agua.

REST2 es un algoritmo para estimar GHI y DNI basado en parametrizaciones del modelo espectral SMARTS (Gueymard, 2005). El modelo utiliza dos regiones espectrales: el UV-visible 290-700 nm, donde dominan efectos de dispersión por aerosoles y moléculas de aire, y el infrarrojo cercano 700-4000 nm donde predomina la absorción asociada por vapor de agua y otros gases. REST-2 estima DNI como un producto de transmitancias parametrizadas especialmente para cada región del espectro. Las transmitancias describen los efectos de la dispersión de Rayleigh, gases atmosféricos de mezcla uniforme, ozono, nitrógeno, vapor de agua y aerosoles. La radiación difusa hemisférica en cada sub-banda se estima como la suma de los efectos de dispersión de Rayleigh en la atmósfera alta, absorción y dispersión en la atmósfera baja por otros efectos y la múltiple reflexión de la radiación entre el suelo y la atmósfera.

El modelo ESRA fue desarrollado en el marco del European Solar Radiation Atlas usado junto con imágenes satelitales Meteosat como parte del método Heliosat-2 para estimar radiación solar en toda condición de cielo (Rigollier et al., 2000). Estima analíticamente DNI y la irradiancia difusa en un plano horizontal (DHI) usando un modelo fenomenológico sencillo y luego calcula GHI como su suma. El único parámetro utilizado para describir el estado de la atmósfera es el factor de Turbidez de Linke, T_L (para masa de aire igual a 2). T_L puede interpretarse como el número de atmósferas de Rayleigh (sin agua, ni aerosoles) que equivalen a la atenuación de la atmósfera real. Dada su simplicidad y el hecho de que puede alcanzar buena precisión si se cuenta con información local de T_L (Gueymard, 2012), el modelo ESRA es una opción muy utilizada. Remund et al. (2003) han propuesto una parametrización de T_L en términos de vapor de agua y β . Ineichen (2008) ha propuesto otra en función de w y AOD_{550} . Con estas parametrizaciones, no es necesario caracterizar T_L localmente, dado que ESRA puede considerarse función de estas variables atmosféricas.

Ambos modelos, REST-2 y ESRA, han sido evaluados con datos de varias regiones y usando diferentes fuentes de información atmosférica. Engerer (2015) usando valores mensuales del proyecto Soda (<http://www.soda-pro.com/>), Antonanzas (2019) y Gueymard (2012) con datos Aeronet e Ineichen (2016) con datos CAMS. Todos distinguen a REST-2, mientras que los dos primeros distinguen además a ESRA, como los modelos más precisos de su tipo. En ellos REST-2 muestra un MBD en el rango -0.4% – 0.3% para GHI (-0.3% para DNI), y un RMSD entre 3.1% – 5.1% para GHI (6.2% – 7.9% para DNI). ESRA, muestra MBD entre 0.7% – 4.6% para GHI (-0.3% – 1.6% para DNI) y una dispersión de RMSD entre 2.9% – 5.7% para GHI (6.4% – 8.0% para DNI). Todos los % relativos a la media de las medidas. En la región de interés de este trabajo, Laguarda (2020) implementó el modelo ESRA utilizando ciclos anuales de T_L determinados específicamente para la región, alcanzando MBD ~0% en GHI (-0.5 % DNI) y RMSD de 3.0% en GHI (5.0 % en DNI). En el caso de GHI, el RMSD es comparable a la incertidumbre de las medidas en tierra. Estudios aún no publicados muestran que localmente el modelo REST-2 presenta un desvío de 1% en GHI (-5% para DNI) y una dispersión de 3.5 % en GHI (5.5% en DNI) cuando se implementa sobre información de MERRA-2. La diversidad de estos resultados resalta la necesidad de contemplar al origen y precisión de los datos atmosféricos locales como un aspecto relevante en el modelado de la irradiación de cielo claro.

METODOLOGÍA

La base de datos MERRA-2 se valida utilizando los estimativos de Aeronet como referencia en los tres sitios más cercanos a la región de interés. En la Tabla 2 se muestra la información básica para estas estaciones.

La información en estas estaciones se genera a partir de mediciones espectrales instantáneas en ciertos momentos del día, por lo que las series temporales tienen registros a intervalos irregulares que, en general, no incluyen exactamente las mismas variables que MERRA-2. Por lo tanto es necesario pre-procesar los datos de forma de obtener series de variables concordantes de paso temporal regular y simultáneas con MERRA-2.

Código	Dependencia	Lat. (°)	Lon. (°)	Alt. (m snm)	Período
CRD	Córdoba-CETT (Argentina)	-64.464	-31.524	730	10/1999 - 12/2010
CBA	Ceila-BA (Argentina)	-58.500	-34.567	10	10/1999 - 12/2018
SMN	Sao Martinho-SONDA (Brasil)	-53.823	-29.443	489	01/2008 - 12/2017

Tabla 2. Detalles sobre las estaciones Aeronet utilizadas.

Aeronet no provee AOD₅₅₀, por lo que se utilizan sus estimativos de AOD₅₅₀ y α para la ventana 440–675 nm para interpolar el valor de AOD₅₅₀ utilizando la Ec. (2). Para lograr una serie de datos horarios se realiza un promedio simple entre los datos que caen dentro de cada hora, con etiqueta temporal al inicio del intervalo. Por ejemplo, el dato correspondiente a las 13:00 hrs resulta del promedio de los datos entre las 13:00 y las 13:59 h. El exponente de Angström de la base MERRA-2 corresponde a la ventana 470-870 nm y se compara con α en el rango 500-870 nm de Aeronet (el que tiene más solapamiento con MERRA-2). Por último, la concentración de vapor de agua w provista por MERRA-2 se expresa kg/m² y se convierte a cm (altura de la columna de vapor de agua precipitable en condiciones normales). Finalmente, la cuantificación de la incertidumbre de las series de variables MERRA-2 se realiza a través de los indicadores usuales, el sesgo promedio MBD y el desvío cuadrático medio, RMSD, definidos en la Ec. (3),

$$MBD = \langle e_i \rangle, \quad RMSD = \sqrt{\langle e_i^2 \rangle}, \quad (3)$$

donde e representa la serie de desvíos (diferencia entre la serie evaluada y la serie de referencia). El subíndice i se refiere a cada una de las entradas del vector, y el operador $\langle \rangle$ indica el promedio simple (o la mediana cuando se especifique) sobre N observaciones. La dispersión RMSD se asimila a una incertidumbre típica. Cuando se expresan en forma relativa a la media (o la mediana) de las medidas se denotan rMBD y rRMSD.

Una vez asignada la incertidumbre a las variables MERRA-2 se analiza su impacto en el desempeño de los dos MCC (REST-2 y ESRA). Se utiliza la información MERRA-2 como entrada, en la ubicación correspondiente al Laboratorio de Energía Solar, Salto, Uruguay (Lat: -31.28°, Lon. = -57.92°, altura = 50 m snm), un punto cercano al centro de la región de interés. REST-2 se implementa utilizando algunos valores por defecto recomendados por Gueymard (2008) para las variables de bajo impacto como la concentración de dióxido de nitrógeno NO₂ ($u_n = 0.0002$ atm-cm), también se asume que el albedo terrestre es igual para las dos bandas del modelo ($\rho_{g1} = \rho_{g2} = 0.20$), donde se utiliza el valor por defecto para pradera. Se asume además que el exponente de Angström es el mismo para ambas bandas ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$) y el parámetro de Angström β se estima invirtiendo la Ec. (1) a partir de la información de AOD₅₅₀ y α . El modelo ESRA depende en su forma original del parámetro de turbidez

de Linke, que aquí se calcula a través de la parametrización propuesta por Ineichen (2008) en función de AOD_{550} y w ,

$$T_L = 3.91 \exp(0.689/P_C) AOD_{550} + 0.376 \ln w + 2 + 0.54/P_C - 0.5/P_C^2 + 0.16/P_C^3, \quad (4)$$

$$P_C = P / P_0 \approx \exp(-z / 8434.5). \quad (5)$$

donde P_C es la presión atmosférica en superficie, estimada a partir de la altura sobre el nivel del mar z expresada en metros y normalizada por $P_0 = 101.325$ kPa, la presión estándar. La aproximación de presión atmosférica constante en el tiempo es razonable dado que su impacto en los estimativos de irradiancia es pequeño (Gueymard 2003). Como se muestra en la Tabla 3, implementados de esta forma, ambos modelos dependen de la información de aerosoles y vapor de agua.

Modelo	Variables originales	Variables usadas en este trabajo
REST-2	$\beta, \alpha_1, \alpha_2, u_o, u_n, w, \rho_{g1}, \rho_{g2}$	β, α, w
ESRA	T_L	AOD_{550}, w

Tabla 3. Variables atmosféricas de entrada para los MCC.

Para estudiar el efecto de la incertidumbre de cada variable en el modelado de DNI y GHI, se seleccionan 4 días (24/12/2017, 11/06/2016, 26/9/2016 y 16/03/2015, cercanos a equinoccios y solsticios) como representativos de la irradiancia solar local y se realiza un análisis de sensibilidad a variaciones independientes en cada una de las entradas en los modelos. Para ello se generan los estimativos de cada modelo modificando cada variable de entrada (v) por una cantidad $\pm\delta v$ o $\pm 2\delta v$ de forma independiente, donde las incertidumbres δv son las halladas en la parte I, asimiladas a la dispersión medida por el indicador RMSD. Se analiza el desempeño del MCC con una de sus entradas modificadas, usando como referencia los estimativos del modelo con sus entradas sin alterar.

RESULTADOS

I – Incertidumbre típica de los estimativos MERRA-2:

En la Tabla 4 se muestran los resultados de comparar los estimativos de AOD_{550} , α y w de la base MERRA-2 con la información de Aeronet para las estaciones CRD, CBA y SMN. La Fig. 1 muestra las gráficas de dispersión de estas variables para la estación Aeronet Ceilap-BA, a modo de ejemplo. Los indicadores promedio por variable se ponderan por el número de datos de cada estación. Se observa que w presenta sesgos entre 6.2 y 21.0% de la mediana, mientras que los $rRMSD$ varía entre 11.8 y 21.1% y queda claro que la estimación de vapor de agua es más precisa que la de aerosoles. MERRA-2 parece tener problemas para estimar AOD y α , especialmente cuando el contenido es alto (Fig. 1), con desvíos medios positivos y $rRMSD$ de hasta 38.5 %. En términos absolutos, se observan $RMSD$ en la región (media de las tres estaciones) de 0.0235 para AOD_{550} y de 0.293 para α . Son valores altos, pero significativamente menores a los reportados recientemente a nivel mundial para la zona climática Cfa por Gueymard y Yang (2020).

	AOD550 (adim.)				Vapor de agua, w (cm)				α (adimensionado)			
	CRD	CBA	SMS	media	CRD	CBA	SMS	media	CRD	CBA	SMS	media
rMBD (%)	4.8	22.8	20.8	17.5	6.2	4.4	21.0	7.1	8.2	-9.7	11.8	-2.9
rRMSD (%)	23.0	38.5	31.9	33.4	11.8	8.9	21.1	11.2	29.1	26.1	24.4	26.8
Corr.	0.78	0.67	0.81	0.72	0.92	0.95	0.97	0.95	0.31	0.38	0.43	0.36
#datos	11400	24457	5031	-	7091	24684	5249	-	11126	24520	2850	-
mediana	0.072	0.072	0.059	0.070	1.39	1.60	1.55	1.55	1.11	1.08	1.14	1.09

Tabla 4. Comparación de los productos MERRA-2 con los estimativos Aeronet. Los indicadores $rMBD$ y $rRMSD$ son relativos a la mediana de las medidas.

Las incertidumbres asociadas a cada variable, δv (donde v es la variable correspondiente) se asignan promediando los desvíos cuadráticos medios de las tres estaciones, obteniéndose los valores que se muestran en la Tabla 5. En el caso de la incertidumbre de β se calcula por propagación de errores en la Ec. (1), resultando en la Ec. (6),

$$\delta\beta = \beta [(\delta\text{AOD}/\text{AOD})^2 + (\alpha \cdot \delta\alpha/0.55)^2]^{1/2} \quad (6)$$

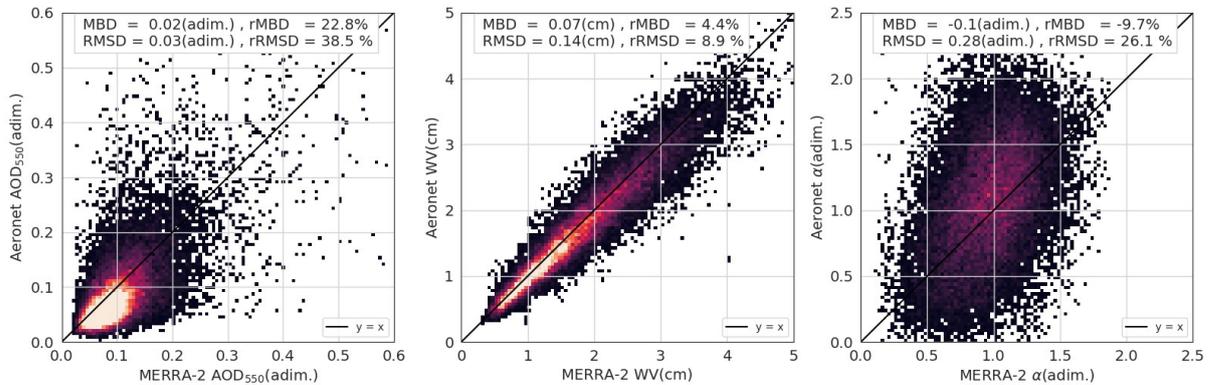


Fig. 1. Estimativos horarios MERRA-2 vs medidas en Aeronet Ceilap-BA. La escala de color refiere a la densidad de puntos.

La Fig. 2 muestra los histogramas de los desvíos e_i entre estimativos y las medidas. Las distribuciones son suaves y aproximadamente gaussianas para todas las variables, pero las curvas difieren según el sitio, lo que dificulta la posibilidad de una post-calibración de la base MERRA-2 en la región.

δAOD	δw	$\delta\alpha$
0.024 (adimensionado)	0.17 (cm)	0.29 (adimensionado)
33 %	11 %	27 %

Tabla 5. Asignación de incertidumbre a cada variable. En forma absoluta y en forma de porcentaje con respecto a la mediana (menos sensible a valores extremos atípicos).

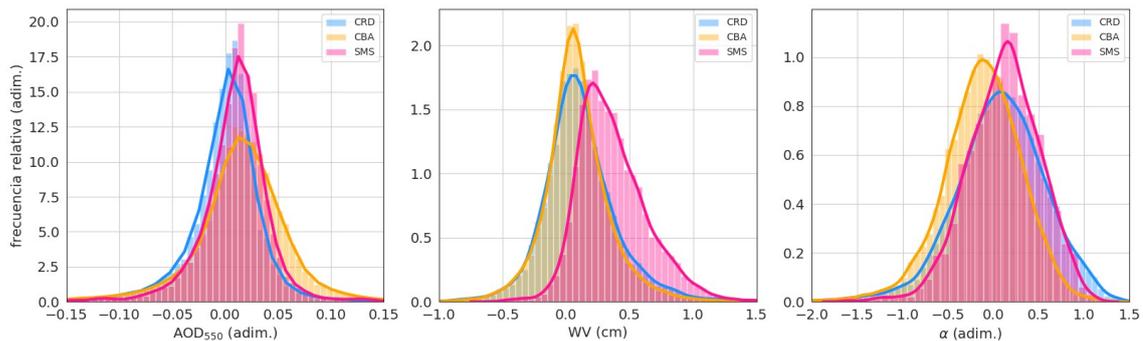


Fig. 2. Histograma (normalizado) de las diferencias entre estimativos MERRA-2 y medidas Aeronet, izq.: AOD_{550} (adim.), centro: vapor de agua (cm) y exponente de Angström (adim.). II – Impacto en estimativos de irradiancia solar en Cielo Claro:

El análisis de sensibilidad para las tres variables consideradas en GHI y DNI estimadas por REST-2 puede verse en las Figs. 3 y 4, se muestran los indicadores usuales rMBD y rRMSD (relativos a la media de la serie de referencia) al usar las variables MERRA-2 desplazadas por $\pm\delta v$ o $\pm 2\delta v$, usando los valores de la Tabla 5 para ambos MCC. Para ambos modelos la sensibilidad de los estimativos de GHI y DNI muestra un comportamiento cualitativamente similar.

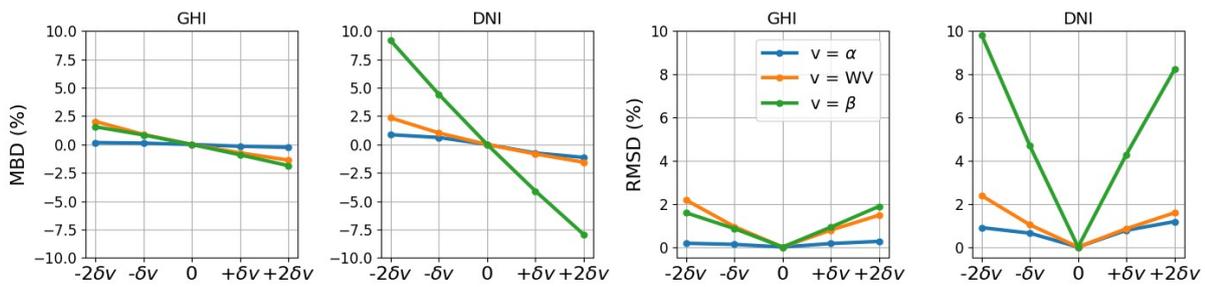


Fig. 3. Variación de indicadores para REST-2 al alterar las variables de entrada por su incertidumbre asociada (referencia: REST-2 con variables sin alterar).

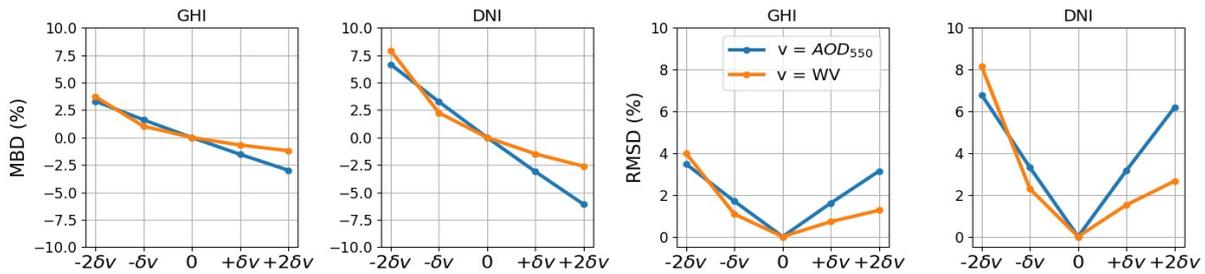


Fig. 4. Variación de indicadores para ESRA al alterar las variables de entrada por su incertidumbre asociada (referencia: ESRA con variables sin alterar).

DNI es más sensible que GHI ante la incertidumbre en las entradas: un factor de 4 para REST-2 y de 2 para ESRA para el caso de AOD. Esto se explica por el efecto opuesto que genera un incremento en la turbidez en las componentes difusa y directa, lo que implica un efecto compensatorio en términos de GHI. Como era de esperar, el sesgo de GHI y DNI es de signo opuesto al incremento de la variable bajo estudio en todos los casos (mayor turbidez implica menor irradiación en superficie). Ambos modelos se muestran más sensibles a sub-estimaciones en las entradas que a sobre-estimaciones. La profundidad óptica de aerosoles (β o AOD₅₅₀) y vapor de agua (en ese orden) son las variables cuya incertidumbre más afecta al rendimiento de estos MCC. Siendo la incertidumbre en β la más determinante para DNI de REST-2. Por otro lado, la sensibilidad a variaciones en el exponente de Angström es pequeña, lo cual explica que sea una variable útil a pesar de la alta incertidumbre en su estimación por satélite (del orden de 27 %). Si se compara entre los modelos, se observa que tanto para GHI como DNI, el modelo REST-2 es más robusto a incertidumbres en las variables atmosféricas de entrada que ESRA.

CONCLUSIONES

Se cuantifica la incertidumbre de los estimativos de aerosoles y vapor de agua de la base consistida MERRA-2 y se analiza la sensibilidad de dos modelos de irradiancia solar de cielo claro para la región de la Pampa Húmeda (Centro-este de América Latina) entre las latitudes 28°S y 38° S. La región es homogénea, sin alturas significativas y con un clima templado, clasificado como Cfa en la clasificación Koppen-Geiger actualizada. Ante la falta de información local sobre la atmósfera, las bases de re-análisis son una opción interesante que provee información para una variedad de variables con gran cobertura espacial y sin huecos. Sin embargo, la naturaleza indirecta de estos estimativos hace que su precisión deba ser evaluada localmente. MERRA-2 es de las bases más precisas y más utilizada, pero se sabe que, a nivel global sus estimativos de concentración y tipo de aerosoles (AOD, α) presentan incertidumbres significativas al compararlos con estimativos basados en medidas terrestres de estaciones Aeronet (Gueymard and Yang, 2020). En este trabajo se evalúan las incertidumbres y sesgo de tres variables (AOD₅₅₀, α y vapor de agua w) comparando los estimativos de MERRA-2 con la referencia de tres estaciones Aeronet en la zona de interés. Los indicadores de desempeño no muestran diferencias sistemáticas que permitan un post-proceso de los estimativos

MERRA-2. Los desvíos medios son variables y en ocasiones con cambio en el signo. Para la región, el vapor de agua precipitable, w , es la variable que muestra menos dispersión con RMSD de $\sim 11\%$, mientras que α y AOD_{550} presentan RMSD entre 27 y 33% de la mediana de las medias, respectivamente.

Se ha investigado la sensibilidad de dos modelos de cielo claro (REST-2 y ESRA) a variaciones en las tres variables de entrada por separado. Las mayores sensibilidades corresponden al vapor de agua precipitable y la profundidad óptica de aerosoles (β en REST-2 y AOD_{550} en ESRA). El exponente de Angström (α) presenta alta incertidumbre, pero su impacto en los estimativos de irradiancia es bajo, lo que lo hace útil para discriminar el tipo de aerosoles. La DNI es mucho más sensible que GHI debido al efecto compensatorio que tiene una modificación de la turbidez en las componentes difusa y directa de la radiación solar. El modelo REST-2 es más robusto a incertidumbre en las entradas que ESRA y ambos modelos, son más sensibles a sub-estimaciones en las entradas que a sobre-estimaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los investigadores y técnicos de las estaciones Aeronet utilizadas en este trabajo: CEILAP-BA, Cordoba-CETT y SaoMartinho-SONDA, por su esfuerzo en mantener la calidad de las medidas.

REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, R., David, M., Branco, V., Lauret, P. (2020). Intra-day solar probabilistic forecasts including 2 local short-term variability and satellite information, submitted to Renewable Energy, may 2020, preprint available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120307448>.
- Ångström, A. (1929). On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air, *Geografiska Annaler*, 11:2, 156-166.
- Antonanzas-Torres, F., Urraca, R., Polo, J., Perpiñán Lamigueiro, O., and Escobar, R. (2019). Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models. *Solar Energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews*: 374–387.
- Buchard, V., Randles, C., Silva, A., Darmenov, A., Colarco, P., Govindaraju, R., Ferrare, R., Hair, J., Beyersdorf, A., Ziemba, L., and Yu, H. (2017). The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. part II: Evaluation and case studies. *Journal of Climate*, 30:6851–6872.
- Engerer, N. and Mills, F. (2015). Validating nine clear sky radiation models in Australia. *Solar Energy*, 120:9–24.
- Gelaro et. al, (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of climate*. 30:5419–5454.
- Giles, D., et al. (2019). Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database –automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12:169–209.
- Gueymard, C. and Yang, D. (2020). Worldwide validation of CAMS and MERRA-2 reanalysis aerosol optical depth products using 15 years of AERONET observations. *Atmospheric Environment*. 225:117216. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117216.
- Gueymard, C. (2019). Solar Resources Mapping: Fundamentals and Applications. Polo, J., Jesús, Martín-Pomares, L., Sanfilippo, A. (eds), pp 137–181, Springer Nature, Switzerland.
- 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(8):2145–2169.
- Gueymard, C. (2008). REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation, *Solar Energy* 82, 272–285.
- Gueymard, C. (2005). SMARTS code version 2.9.5: User's manual. Solar Consulting Services, USA, 2005.

- Gueymard, C. (2003). Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. part II: validation with high-quality measurements. *Solar Energy*, 74:381–395. corrigendum: *Solar Energy*, 376,515 (2004).
- Ineichen, P. (2016). Validation of models that estimate the clear sky global and beam solar irradiance. *Solar Energy*, 132:332–344.
- Ineichen, P. (2008). Conversion function between the Linke turbidity and the atmospheric water vapor and aerosol content. *Solar Energy*, 82, 1095–1097.
- Inness, A. et al. (2019). The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19:3515–3556.
- Laguarda, A, Giacosa, G, Alonso-Suárez, R., Abal, G. (2020). Performance of the site-adapted CAMS database and locally adjusted cloud index models for estimating global solar horizontal irradiation over the Pampa Húmeda. *Solar Energy*, 199, pp: 295–307.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 11, 1633–1644.
- Polo, J., Martín-Pomarés, L., and Sanfilippo, A. (2019). *Solar Resources Mapping. Fundamentals and Applications*. Springer, Hoboken, New Jersey, first edition.
- Polo, J., Antonanzas-Torres, F., Vindel, J.M., Ramirez, L. (2014). Sensitivity of satellite-based methods for deriving solar radiation to different choice of aerosol input and models. *Renewable Energy*, 68, 785-792.
- Remund, J., Wald, L., Lefevre, M., Ranchin, T., and Page, J. (2003). Worldwide Linke turbidity information. *Proceedings of ISES Solar World Congress 2003*.
- Rigollier, C., Bauer, O., Wald, L., (2000). On the clearsky model of the 4th ESRA with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, 68, 33-48.
- Yang, D. 2020, Choice of clear-sky model in solar forecasting, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 12, 026101 (2020).

ABSTRACT: A realistic clear-sky model must take into account the effect of several variable components of the atmosphere (like aerosols or precipitable water vapor). This information is not available, except for a few sites (for instance, those of the Aeronet network), so satellite-based estimates are frequently used. The precision of the input information can affect significantly the performance of a model. Here, a validation of the MERRA-2 re-analysis database estimates for aerosol optical depth, Angström exponent and water vapor concentration against ground data from Aeronet sites and a typical uncertainty is assigned on the MERRA-2 estimates. Furthermore, the impact of these uncertainties on the performance of two reference clear-sky solar irradiance models is evaluated.

Keywords: Clear sky models, MERRA-2, aerosols, water vapor, sensitivity