

PRONÓSTICO DEL DÍA SIGUIENTE DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA REGIÓN DE LA PAMPA HÚMEDA: ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL MODELO GFS

Vívian Teixeira-Branco – vivian.teixeira@utec.edu.uy

Laboratorio Solar, UTEC, Uruguay

Rodrigo Alonso-Suárez – r.alonso.suarez@gmail.com

Laboratorio de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, UdelaR, Uruguay

Gabriel Cazes – agcm@fing.edu.uy

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UdelaR, Uruguay

Resumen. Este trabajo evalúa las predicciones de radiación solar provistas por el modelo global GFS en diferentes sitios de la Pampa Húmeda. El análisis se realiza para el pronóstico de las primeras 24h del día siguiente utilizando medidas con calidad controlada. El modelo GFS presenta un mejor desempeño para la región que el procedimiento de persistencia tanto a escala horaria como para el integrado diario. No se observa variabilidad significativa de desempeño entre los sitios evaluados. A escala horaria el modelo presenta un sesgo hacia la sobreestimación y valores de rRMSD entre 27.2% y 37.2%. Para el integrado diario se encuentra la misma tendencia y un rRMSD entre 21.0% y 22.9%. La discriminación por distintas condiciones de cielo muestra que el desempeño del modelo empeora con el aumento de la nubosidad. Al considerar el funcionamiento bajo toda condición de cielo el modelo GFS presenta un peor desempeño que el modelo ECMWF para la región, pero es competitivo en condiciones de cielo despejado.

Palabras-clave: Pronóstico solar, GHI, NWP, GFS, Pampa Húmeda

1. INTRODUCCIÓN

La creciente expansión de la energía solar fotovoltaica (PV) se destaca en varias partes del mundo. Los factores por detrás de este crecimiento están relacionados principalmente con la rápida caída en los costos de esta tecnología. Los modelos de prospectiva que generan escenarios futuros sobre la rentabilidad de la energía en el mundo destacan que una de las razones para subestimar la contribución solar en las próximas décadas son las restricciones en su penetración en la red eléctrica debido a su intermitencia y escasa predictibilidad (Victoria et al., 2021). Anticipar las fluctuaciones generadas por fuentes renovables, como solar y eólica, a partir de técnicas de pronóstico es necesario para garantizar la gestión inteligente del despacho de la energía y las reservas del sistema eléctrico.

Pronosticar la generación solar PV requiere como paso inicial predecir la irradiación solar global en un plano horizontal a nivel de superficie (GHI, Global Horizontal Irradiation). Para su pronóstico existen distintas técnicas que están divididas en cuatro grandes grupos: cámaras todo-cielo, nowcasting satelital, modelos numéricos de atmósfera (NWP, Numerical Weather Predictions) y pronóstico por técnicas estadísticas o de aprendizaje automático. Los modelos numéricos de atmósfera, objeto de este trabajo, son capaces de predecir desde 1 hora a varios días en adelante, resolviendo numéricamente las ecuaciones físicas que gobiernan los procesos en la atmósfera. Los NWP pueden ser clasificados como globales (GFS, ECMWF, entre otros) o regionales o de mesoescala (WRF, NAM, entre otros), según su dominio espacial de resolución. Para la predicción de radiación solar los NWP presentan un desempeño destacado frente a otras técnicas de pronóstico para horizonte temporales superiores a las 4-5 horas en adelante (Lorez et al., 2007; Perez et al., 2010). Conocer y reducir la incertidumbre del pronóstico se traduce directamente en la toma de decisiones en el despacho y comercialización óptima de la electricidad, impactando así en los costos e ingresos del sistema (Lorenz et al., 2009; Bridier et al. 2014). Como consecuencia, la mejora de los sistemas de pronóstico es de alto interés, dado su valor en el sistema eléctrico (David et al., 2021). En este trabajo se analiza el desempeño del pronóstico provisto por el modelo global GFS (Global Forecast System) en la Pampa Húmeda del sureste de Sudamérica. Se considera el primer día de pronóstico (i.e. sus primeras 24 horas) para la predicción del acumulado diario (irradiación diaria) y de la irradiancia promedio hora a hora. Se compara el desempeño obtenido con el reportado en trabajos previos para esta región, detectando en qué condiciones de cielo el modelo ofrece un desempeño competitivo en comparación a otros.

El trabajo se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 presenta las mediciones de GHI que se utilizarán como referencia, registradas en la región de la Pampa Húmeda. Luego, la Sección 3 detalla la configuración del modelo GFS utilizado y presenta algunos conceptos importantes. La Sección 4 define la referencia de desempeño utilizada, conocida como persistencia, y las métricas para la evaluación. La Sección 5 presenta los resultados y se divide en tres partes, (5.1) la evaluación a escala horaria, (5.2) la evaluación a escala diaria, y (5.3) la evaluación con discriminación diaria según el índice de cielo claro. Finalmente, las conclusiones se resumen en la Sección 6.

2. DATOS

Este estudio utiliza como referencia un conjunto de medidas registradas en tierra a lo largo de tres años de irradiancia solar global en plano horizontal. Estos datos de GHI forman parte de la red nacional de medida administrada por el Laboratorio de Energía Solar (LES, <http://les.edu.uy/>) que está distribuida en siete sitios del territorio uruguayo (Tabla 1). Las estaciones de medida están equipadas con piranómetros Kipp & Zonen de clase A o B según la norma ISO 9060:2018 y reciben mantenimiento básico en forma aproximadamente mensual. La calibración de los instrumentos se realiza cada dos años bajo la norma ISO-9847:1992, contra un estándar secundario con trazabilidad al patrón primario mundial en el World Radiation Center (Davos, Suiza). Los adquisidores registran las medidas en un intervalo de 1 minuto como promedio de medidas instantáneas cada 15 segundos, a partir de las cuales se calculan los promedios horarios. El control de calidad de las medidas se realiza a partir de chequeos básicos basados en el índice de claridad y filtros de la BSRN (Baseline Surface Radiation Network). La incertidumbre de los datos medidos está entre 4-5% en escala diaria, valores significativamente inferiores al desempeño del pronóstico a evaluar.

Tabla 1 - Detalle de las estaciones de medida en tierra utilizadas en este trabajo.

Estación	Código	Latitud (deg)	Longitud (deg)	Altitud (m)
Salto	LE	-31.28	-57.92	42
Artigas	AR	-30.40	-56.51	136
Tacuarembó	TA	-31.71	-55.83	140
Canelones	LB	-34.67	-56.34	32
Rocha	RC	-34.49	-56.17	24
Colonia	ZU	-34.34	-57.69	81
Treinta y Tres	PP	-33.26	-54.49	58

El clima en la región se caracteriza como templado y húmedo, y según la clasificación actualizada de Köppen Geiger pertenece a la clase Cfa (Peel et al. 2007). Este clima se puede considerar representativo de la amplia región subtropical denominada Pampa Húmeda. En lo que se refiere a la intermitencia a corto plazo del recurso solar, la región presenta una variabilidad solar intermedia (Alonso-Suárez et al., 2020).

3. PRONÓSTICO GFS

El modelo GFS fue desarrollado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) a través del NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Sus pronósticos globales están disponibles gratuitamente en su sitio web con actualización cada 6 horas para horizontes de pronóstico tri-horarios desde 3 hasta 180 horas hacia el futuro (<http://nomads.ncep.noaa.gov/>). El GFS realiza la predicción de GHI utilizando el Modelo de Transferencia Radiativa Rápida (RRTMG_SW v2.3), que ha sido objeto de sucesivas mejoras y adaptaciones (Iacono et al., 2008; Mlawer et al., 1997; Iacono et al., 2000; Clough et al., 2005). En este trabajo los pronósticos de GHI utilizados se inicializan a las 00 UTC (inicio de la corrida del modelo global), con una resolución espacial de 0.5°. La asignación de la predicción desde la grilla de 0.5° x 0.5° al sitio específico objetivo para la evaluación (ubicación del sitio de medida) se realiza por vecino más cercano. De las 180 horas de pronóstico disponibles, se evalúa aquí las primeras 24 horas (predicción del día actual al inicio del día, lo que se conoce como predicción *day-ahead*). En la Tabla 2 se presenta un resumen de la configuración del modelo y los datos utilizados en este trabajo

Tabla 2 - Resumen de la configuración del modelo de pronóstico.

Característica	Modelo GFS
Resolución espacial	0.5°
Modelo de transferencia radiativa	RRTMG_SW (v2.3)
Nombre de la variable GHI	dswrfsfc
Horizonte de pronóstico considerado	24 h
Paso temporal de la predicción	3 h
Período de estudio	01/2017-12/2019

Las predicciones del GFS cada 3 h necesitan ser interpoladas en el tiempo para generar el pronóstico horario. Para eso se utilizan las estimaciones de GHI de cielo despejado obtenidas con el modelo McClear (Lefèvre et al., 2013), descargadas de la web del Servicio de Monitoreo de la Atmósfera Copernicus (CAMS). Con esta información se calcula el índice de cielo despejado cada 3 horas, $(k_c)_{3h}$, que se utilizará como objeto de la interpolación. Éste se define como:

$$(k_c)_{3h} = \frac{(G_{h,GFS})_{3h}}{(G_{h,CKS})_{3h}} \quad (1)$$

donde $(G_{h,GFS})_{3h}$ es la salida del modelo de pronóstico cada 3h y $(G_{h,CKS})_{3h}$ es la irradiancia de cielo claro instantánea cada 3h. Luego, se aplica la interpolación lineal simple en el índice de cielo despejado, debido a que en esta variable no están presentes las dependencias geométricas que tiene la irradiancia solar. A partir del índice de cielo despejado horario, $(k_c)_{1h}$, se calcula la irradiancia promedio horaria como:

$$(G_{h,GFS})_{1h} = (k_c)_{1h} \cdot (G_{h,CKS})_{1h} \quad (2)$$

4. DESEMPEÑO DEL PRONÓSTICO

Para cuantificar el desempeño del pronóstico de GHI se aplican métricas comunes que derivan directamente de la diferencia entre las observaciones en tierra y las predicciones (Yang et al., 2018). Para medir el sesgo sistemático del modelo se utiliza el desvío medio (MBD). La dispersión del modelo se cuantifica a partir de dos métricas con distintas ponderaciones de los desvíos más elevados, que son: el desvío medio absoluto (MAD) y del desvío cuadrático medio (RMSD). Desde el punto de vista operacional, el RMSD es más sensible a grandes desvíos de la predicción, lo que lo hace más relevante para las aplicaciones de pronóstico a larga escala, con enfoque en el mercado energético y gestión de la red (Lorenz et al., 2016). Las métricas MBD, MAD y RMSD se definen en las Ecs. (3), (4), (5), respectivamente:

$$MBD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}(i) - y(i)) \quad (3)$$

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}(i) - y(i)| \quad (4)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} (\hat{y}(i) - y(i))^2} \quad (5)$$

donde \hat{y} son los valores pronosticados e y son valores medidos en tierra. Estas métricas se calcularán para el pronóstico de la irradiación diaria (energía acumulada diaria por unidad de área, en MJ/m²) y para la predicción hora a hora de la irradiancia promedio horaria (en W/m²). Los valores relativos de estas cantidades se expresan como un porcentaje del promedio de las medidas en tierra. En la evaluación hora a hora del pronóstico las métricas relativas se calculan utilizando el valor medio de GHI para cada hora del día.

Finalmente, se utiliza la habilidad de pronóstico (FS) para cuantificar la ganancia de la predicción respecto a una predicción de referencia, que en este caso es la de la persistencia. La persistencia implica considerar que las condiciones atmosféricas se mantendrán aproximadamente estacionarias respecto al paso temporal anterior (Yang et al., 2020) y en el caso de la irradiancia solar se genera a partir del índice de cielo claro. A escala diaria (para el valor de irradiación diaria) se supone que el índice de cielo despejado diario se mantiene constante respecto al día anterior. A escala horaria se toma el mismo valor hora a hora del día anterior. Con este procedimiento se pueden generar, para cada día, los valores de irradiación diaria y los valores hora a hora de irradiancia promedio asociados a la persistencia, y calcular las métricas de desempeño anteriores para dicho procedimiento. A partir de los RMSD del GFS y de la persistencia se obtiene FS como:

$$FS = 1 - \frac{RMSD_{GFS}}{RMSD_{PER}} \quad (6)$$

5. RESULTADOS

La evaluación de desempeño del modelo GFS en la región de la Pampa Húmeda se realiza aquí a escala horaria y diaria para el primer día de pronóstico. Se incluye además una evaluación a escala diaria con discriminación por las condiciones de nubosidad, utilizando el índice de cielo claro diario para establecer categorías de días (cielo despejado, parcialmente nublado y nublado). El análisis se realiza separadamente por sitio, para luego promediar los indicadores y obtener el desempeño promedio en la región. En los resultados presentados no se ha aplicado ningún postproceso para reducción de incertidumbre del pronóstico, de modo de evaluar la incertidumbre de las predicciones y como son distribuidas. Existen diversas formas de reducir la incertidumbre de las predicciones, en especial su sesgo, que no son objeto de estudio en este trabajo.

5.1 Evaluación del pronóstico hora a hora

Los indicadores de desempeño (rMBD, rMAD y rRMSD) del modelo GFS y de la persistencia para cada hora de pronóstico del día siguiente se muestran en la Figura 1. En esta figura se trazan las métricas de desempeño contra el horizonte de pronóstico en horas (eje x inferior) u hora local (eje x superior). La línea continua representa el desempeño promedio en los sitios de la Tabla 1 y el área en transparencia representa la desviación estándar del desempeño entre los sitios. El análisis general de los indicadores muestra que el modelo presenta mejor desempeño en las horas centrales del día y es superior a la persistencia. El GFS presenta un sesgo positivo que indica la sobreestimación del recurso. La persistencia subestima el recurso en todas horas del día, un comportamiento que ya se ha encontrado en trabajos previos para la región (Giacosa & Alonso-Suárez, 2018; Teixeira-Branco et al., 2021; Aicardi et al., 2022).

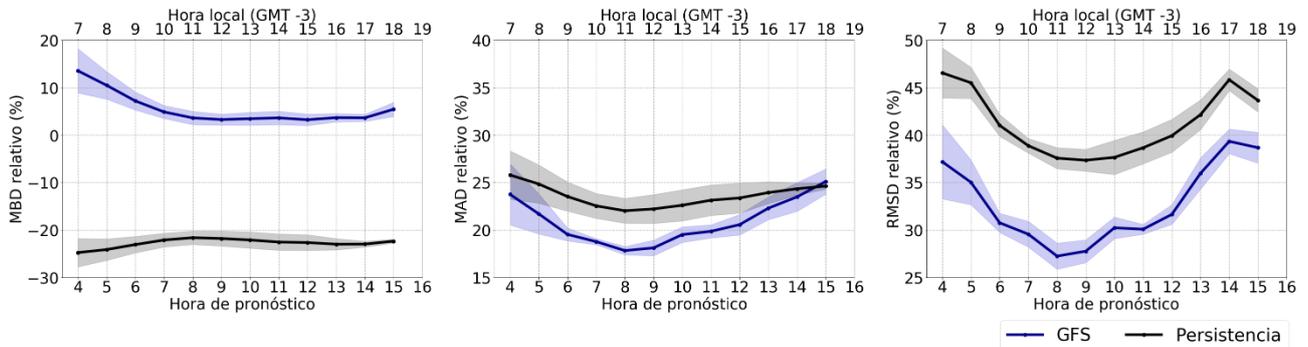


Figura 1 - Métricas de desempeño horario del pronóstico del día siguiente

En la Tabla 3 se detallan los indicadores de desempeño promedio (entre sitios) para cada hora del día en términos absolutos y relativos. Por más detalle, las métricas desglosadas por cada sitio se pueden encontrar en el siguiente enlace: https://les.edu.uy/RDpub/GFS_local_evaluation.xlsx. El indicador rMBD promediado entre sitios varía desde 3.2% a 13.5%, con mayores indicadores en las primeras horas del día y prácticamente estable después del mediodía. La métrica rMAD presenta valores que oscilan desde 17.8% hasta 25.1%, valores que están bastante cercanos a los obtenidos por persistencia, especialmente al principio y final del día. La variación del rRMSD se encuentra entre 27.2% y 39.3%, mostrando una franca ganancia frente a la persistencia, que presenta un comportamiento similar, pero con valores mayores entre 37.3% y 46.5%. La Figura 2 muestra que el FS que se obtiene para el GFS (promediado entre los sitios). Se observa una mayor ganancia de la predicción en torno al mediodía. Los valores del FS varían entre 11.4% y 27.5%.

Tabla 3 - Desempeño hora a hora de la predicción del GFS para el primer día de pronóstico

Hora local	MBD (W/m ²)	MAD (W/m ²)	RMSD (W/m ²)	rMBD (%)	rMAD (%)	rRMSD (%)	FS (%)
7	+21.9	36.9	57.9	+13.5	23.7	37.2	20.2
8	+25.1	51.9	83.7	+10.5	21.7	35.0	23.1
9	+27.8	75.5	118.8	+7.2	19.5	30.7	25.0
10	+24.9	96.1	151.4	+4.9	18.8	29.5	24.0
11	+21.6	106.6	163.0	+3.6	17.8	27.2	27.5
12	+20.7	114.8	176.1	+3.3	18.1	27.8	25.7
13	+21.3	120.6	187.1	+3.4	19.5	30.2	19.6
14	+20.0	110.1	166.9	+3.6	19.8	30.1	22.1
15	+14.5	92.9	143.1	+3.2	20.6	31.6	20.7
16	+11.5	70.1	113.2	+3.7	22.3	36.0	14.6
17	+6.8	43.7	73.2	+3.6	23.2	39.3	14.1
18	+6.2	28.6	44.1	+5.4	25.1	38.7	11.4

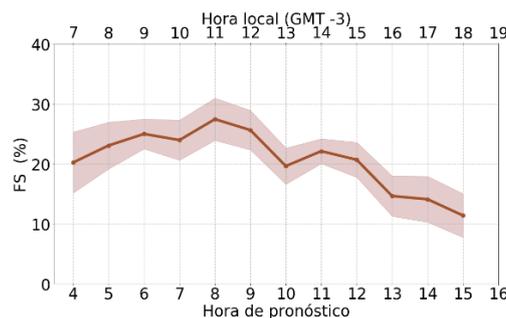


Figura 2 - Habilidad de pronóstico hora a hora para el modelo GFS.

En el contexto regional de la Pampa Húmeda los primeros estudios de desempeño de predicciones de radiación solar por NWP se realizaron en los últimos cinco años. La Tabla 4 muestra un resumen de los trabajos que abordan el problema hora a hora para el primer día de predicción (intra-día), indicando sus respectivos autores, configuraciones y métricas de desempeño. Las columnas de rMBD y rRMSD muestran el rango de variación (máximo y mínimo) de estos indicadores durante las horas del día y en su versión porcentual. En todos los trabajos los autores muestran que las horas centrales del día son los momentos en que los modelos presentan su mejor desempeño porcentual. El modelo de mesoescala WRF con condiciones iniciales y de borde tomadas del GFS con resolución de 1°, evaluado por Porrini et al. (2017), presenta un rMBD horario promedio en la región entre +2.4–14.5%, lo que indica un sesgo positivo hacia la sobreestimación igual que en este estudio, pero de mayor tamaño. La incertidumbre reportada por Porrini et al. (2017) es también superior a la encontrada aquí, con valores de rRMSD que oscilan entre 40–44%. Estas diferencias pueden estar relacionadas a la estadística temporal elegida en cada trabajo, a la discretización utilizada para el dominio espacial (1° vs 0.5°) y a las configuraciones escogidas para la corrida del modelo. Se destaca que en Porrini et al. (2017) se evalúan solamente los períodos de verano de los años 2014-2017, utilizando otros sitios de medida en la región que no forman parte de la red del LES y que son de mayor incertidumbre (los sitios utilizados son estaciones de campo que registran las mediciones con radiómetros fotovoltaicos, cuya incertidumbre diaria ronda el 6-7%). En particular, la resolución espacial más baja utilizada (grilla de 1° x 1°) puede dificultar el pronóstico de radiación solar (Mathiesen & Kleissl, 2011). En relación a esta comparación de modelos, en Verbois et al. (2018) se realizó una comparación entre el modelo WRF+GFS y el GFS, y encontraron que el modelo GFS presentó mejor desempeño en varios de los sitios evaluados, e incluso sugieren que para determinadas aplicaciones puede ser más razonable utilizar los pronósticos del GFS con post procesos que los del WRF+GFS, debido al costo computacional de este último. En Teixeira-Branco et al. (2021) se evalúa el modelo ECMWF en la región considerando los mismos sitios de la Tabla 1 y una estadística temporal parecida. El desempeño reportado para el ECMWF es mejor que el reportado aquí para el GFS, con un rMBD entre -3.5% y +3.9%, y un rRMSD entre 24.8% y 31.7%. Esto es similar a lo encontrado en otras partes del mundo, donde se ha comparado el desempeño entre diferentes modelos numéricos (Reimund et al., 2008; Mathiesen & Kleissl, 2011), encontrando que el ECMWF es el que presenta mejor desempeño para la predicción de radiación solar (al considerar todos los modelos sin post procesos). El presente trabajo aporta más evidencia en esa dirección.

Tabla 4 - Desempeño hora a hora de otros NWP en la región.

Modelo	Tipo de modelo	Resolución espacial	rMBD (%)	rRMSD (%)	Referencia
WRF+GFS	mesoescala	1°	+2.4 – +14.5	40 – 44	Porrini et al. (2017)
ECMWF	global	0.25°	-3.5 – +3.9	25 – 32	Teixeira-Branco et al. (2021)
GFS	global	0.5°	+3.2 – +13.5	27.2 – 39.3	este trabajo

5.2 Evaluación del pronóstico diario

A escala diaria el modelo GFS presenta mejores indicadores de desempeño, como es usual. La Tabla 5 muestra la evaluación de desempeño para los totales diarios integrados en las primeras 24h de pronóstico, por sitio e incluyendo el promedio entre ellos y su desviación estándar.

Tabla 5 - Desempeño del modelo GFS a escala diaria.

Cód	N (días)	Mé dia (MJ/m ²)	MBD (MJ/m ²)	MAD (MJ/m ²)	RMSD (MJ/m ²)	rMBD (%)	rMAD (%)	rRMSD (%)	FS (%)
LE	1071	17.2	+0.8	2.5	3.9	+4.5	14.4	22.6	46.8
AR	1013	17.5	+0.9	2.6	4.0	+5.5	14.9	22.9	44.1
TA	1086	16.8	+0.9	2.4	3.8	+5.6	14.5	22.6	43.1
LB	1086	16.3	+0.6	2.3	3.5	+3.9	13.8	20.8	49.8
RC	1080	16.1	+0.9	2.4	3.5	+5.6	14.9	21.6	49.4
ZU	1084	16.9	+0.4	2.3	3.6	+2.6	13.8	21.6	49.6
PP	1078	16.6	+0.6	2.3	3.5	+3.9	14.2	21.0	46.6
mean	–	16.8	+0.7	2.4	3.7	+4.5	14.3	21.9	47.0
std	–	0.5	0.2	0.1	0.2	1.1	0.4	0.8	2.7

Los indicadores para los sitios individuales en general son similares. El desvío rMBD diario indica que las predicciones de las primeras 24 horas tienden a sobreestimar el recurso en todos los sitios, oscilando entre 2.6% y 5.6%. Este sesgo está relacionado con una subestimación de la nubosidad por parte del modelo, análisis que se realizará con mayor detalle en la Sección 2.3. En los distintos sitios el rRMSD de pronóstico del GFS se encuentra entre 21.0% y 22.9%, y el rMAD varía entre 13.8% y 14.9%. El FS presenta valores más altos que a escala horaria, variando entre 43.1% y 49.6%. Esto ocurre debido al bajo desempeño de la persistencia en esta escala temporal. Los valores promedios entre

los sitios de la región presentan una sobreestimación de aproximadamente $+0.7 \text{ MJ/m}^2$ y un RMSD de 3.7 MJ/m^2 . En porcentaje esto representa un rMBD de $+4.5\%$ y un rRMSD de 21.9% . El promedio entre los sitios de la habilidad de pronóstico a escala diaria es de 47% , significativamente mejor que a escala horaria.

Existe una mayor cantidad de artículos en la literatura que reportan el desempeño del pronóstico solar a escala diaria que en escalas intra-día (i.e. hora a hora, como en la sección anterior), por lo que existen más trabajos con los cuáles comparar. En términos generales los indicadores de desempeño diarios encontrados en este estudio para el GFS están dentro del rango de los encontrados en otras partes del mundo, donde se observan valores de rRMSD dentro de un rango amplio entre 17.5% y 37% (Mathiesen y Kleissl, 2011; Huang et al., 2018). La Tabla 6 presenta los resultados diarios reportados para la región de la Pampa Húmeda en distintos trabajos, incluyendo el actual. El rango de variación de las columnas rMBD y rRMSD es el máximo y mínimo de desempeño a escala diaria entre sitios. Los autores Porrini et al. (2017) y Teixeira-Branco et al. (2018) evalúan el modelo de mesoescala WRF+GFS con distintas mediciones de referencia y parametrizaciones del modelo WRF, pero con la misma resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$. Ambos modelos de mesoescala presentan desempeños cercanos, con rRMSD de $39\text{--}43\%$ (Porrini et al., 2017) y $30\text{--}36\%$ (Teixeira-Branco et al., 2018). El modelo GFS evaluado en este trabajo presenta ganancias con respecto a estos modelos, con rRMSD entre $21\text{--}23\%$, pero por debajo del desempeño reportado para el ECMWF. Con excepción del modelo ECMWF, todos los modelos evaluados presentan un sesgo hacia la sobreestimación. La evaluación a escala diaria es consistente con el análisis presentado a escala intra-día, destacando el desempeño de las predicciones ECMWF.

Tabla 6 - Desempeño diario de predicciones NWP en la región.

Modelo	Tipo de modelo	Resolución espacial	rMBD (%)	rRMSD (%)	Referencia
WRF+GFS	mesoescala	1°	$+26 - +29$	$39 - 43$	Porrini et al. (2017)
WRF+GFS	mesoescala	1°	$+19 - +24$	$30 - 36$	Teixeira-Branco et al. (2018)
ECMWF	global	0.25°	$-1.8 - +2.5$	$15 - 17$	Teixeira-Branco et al. (2021)
GFS	global	0.5°	$+2.6 - +5.6$	$21 - 23$	este trabajo

5.3 Discriminación por índice de cielo claro (escala diaria)

En esta sección se presentan los indicadores separados por tres categorías según el índice de cielo claro, a fin de evaluar el desempeño del pronóstico según las condiciones de nubosidad del día. Las categorías consideradas son: cielo despejado (K_C mayor a 0.65), parcialmente nublado (K_C entre 0.65 y 0.35) y nublado (K_C menor a 0.35). En la Figura 3 se muestran los resultados en términos absolutos del MBD (a la izquierda) y del RMSD (a la derecha) para cada sitio. Los indicadores absolutos promedio entre los sitios se presentan en la Figura 4 y se desglosan en la Tabla 7. Para las condiciones de cielo despejado (des) el modelo de pronóstico presenta los sesgos más bajos y tiende a subestimar levemente el recurso en todos los sitios. En términos promedios la subestimación representa -0.7 MJ/m^2 y el RMSD es de 1.8 MJ/m^2 . Los sesgos aumentan hacia la sobreestimación bajo condiciones de cielo parcialmente nublado (pnu) y nublado (nub) en todos los sitios. Esto indica que la sobreestimación diaria general obtenida en la sección anterior (para todas las condiciones de cielo) tiene su explicación en condiciones de nubosidad y resulta de días con nubosidad no pronosticada. El sesgo hacia la sobreestimación incluso aumenta con el aumento de la nubosidad. En la Tabla 7, para los días parcialmente nublado, se observa un MBD de $+1.3 \text{ MJ/m}^2$ y un RMSD de 4.2 MJ/m^2 . Para la condición de días totalmente nublado los errores del modelo GFS se incrementan en 1.5 MJ/m^2 con respecto a los días parcialmente nublados. En consecuencia, el RMSD también aumenta, a un valor de 5.3 MJ/m^2 .

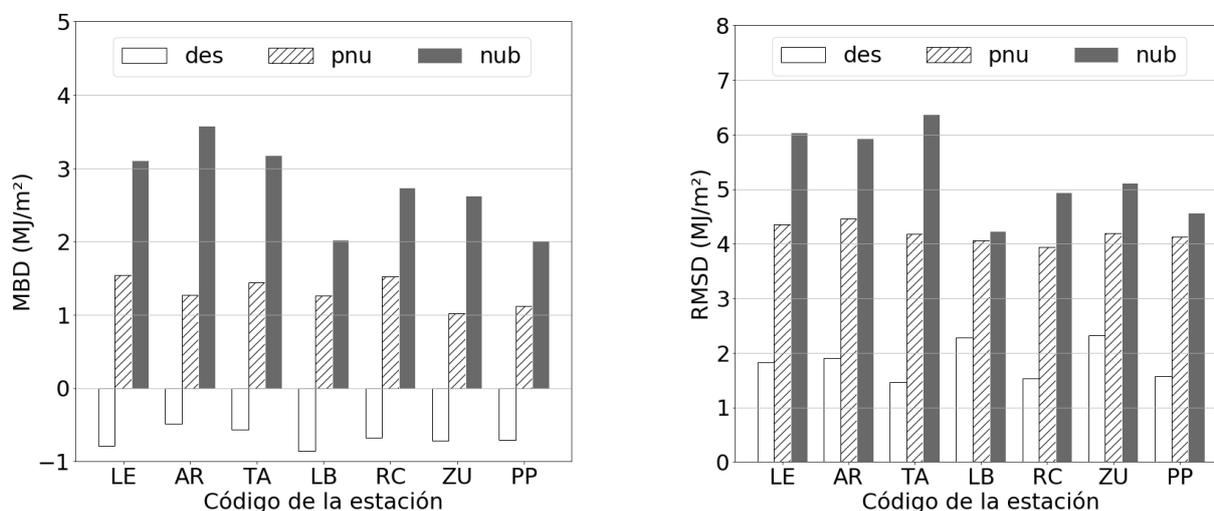


Figura 3 - Desempeño del modelo GFS a escala diaria discriminado según el índice de cielo despejado.

Tabla 7 - Desempeño diario discriminado por las condiciones de cielo del día.

Condición de cielo	MBD (MJ/m ²)	MAD (MJ/m ²)	RMSD (MJ/m ²)	rMBD (%)	rMAD (%)	rRMSD (%)
Despejado	-0.7	1.0	1.8	-2.9	4.5	8.0
Parcialmente nublado	+1.3	3.2	4.2	+8.3	20.6	26.6
Nublado	+2.7	3.7	5.3	+61.9	83.7	100

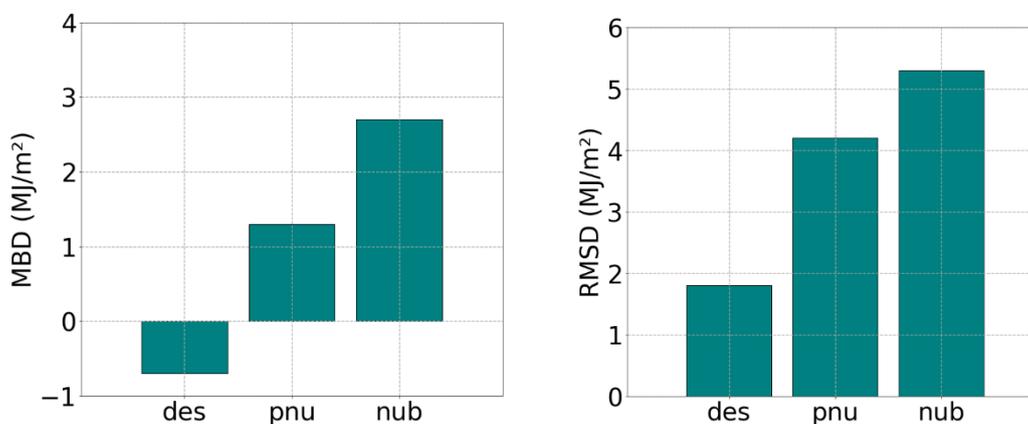


Figura 4 - Desempeño diario promedio en la región según la discriminación por condiciones de cielo.

La realización de estudios del desempeño de pronóstico de la GHI bajo distintas condiciones de cielo permite identificar las ganancias y deficiencias del modelo, además de verificar la posibilidad de aplicación de técnicas para reducir la incertidumbre de las predicciones. Los resultados reportados aquí indican que los días bajo condición de cielo despejado son considerados una fortaleza del modelo GFS cuando se lo compara con el modelo ECMWF evaluado previamente en la región (Teixeira-Branco et al., 2021). Sin embargo, no se observa lo mismo para las otras condiciones del cielo, donde el ECMWF presenta un mejor desempeño.

6. RESULTADOS

En este trabajo se realizó una evaluación de la performance del modelo GFS para distintos sitios representativos de la región de la Pampa Húmeda. Se evalúan tres años de pronóstico del día siguiente de la GHI utilizando medidas registradas tierra en siete sitios del Uruguay. Se reportó el desempeño de modelo a nivel horario, su integrado diario y también se incluye una evaluación por discriminación de condición de cielo utilizando el índice de cielo claro. Para el análisis se utilizan los indicadores más comunes en el área, MBD, MAD, RMSD y FS. Los resultados se presentan por sitio y también para el promedio entre los sitios, debido a la baja variabilidad espacial del desempeño.

A escala horaria el modelo GFS tiende a sobrestimar la GHI en las primeras horas del día y se muestra prácticamente estable después del mediodía. El desempeño del modelo es superior a la persistencia en todas las horas del día. En cuanto a la evaluación del integrado diario, se observa la misma tendencia hacia la sobreestimación, pero con menos desviación. Los FS obtenidos son significativamente superiores a los obtenidos para la escala horaria, como consecuencia de un peor desempeño de la persistencia diaria. En condiciones de cielo despejado se encuentra que el modelo presenta su mejor performance y empeora con altos índices de nubosidad. Esta evaluación permite identificar las fortalezas y debilidades del modelo GFS frente a otros modelos numéricos recientemente evaluados en región. En este caso, el desempeño general del GFS se encuentra por debajo del ECMWF, pero es competitivo para días de cielo despejado. Conocer, analizar y comparar el desempeño en la región de la Pampa Húmeda de la predicción de radiación solar provista por los distintos modelos numéricos de atmósfera al estado del arte es parte de nuestro trabajo actual, y tiene como objetivo aportar información al desarrollo de mejores técnicas de predicción solar en nuestra región.

REFERÊNCIAS

- Aicardi, D., Musé, P., Alonso-Suárez, R., 2022. A comparison of satellite cloud motion vectors techniques to forecast intra-day hourly solar global horizontal irradiation, aceptado para publicación en Solar Energy.
- Alonso-Suárez, R., David, M., Teixeira-Branco, V., Lauret, P., 2020. Intra-day solar probabilistic forecasts including local short-term variability and satellite information, Renewable Energy, vol 158, pp. 554-573.

- Bridier, L., David, M., Lauret, P., 2014. Optimal design of a storage system coupled with intermittent renewables, *Renewable Energy*, vol 67, pp. 2–9.
- Clough, S. A., Shephard, M. W., Mlawer, E. J., Delamere, J.S., Iacono, M. J., Cady-Pereira, K., Boukabara, S., Brown, P. D., 2005. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the aer codes. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, vol 91, pp. 233–244.
- David, M., Boland, J., Cirocco, L., Lauret, P., Voyant, C., 2021. Value of deterministic day-ahead forecasts of PV + generation in PV Storage operation for the Australian electricity market, *Solar Energy*, vol 224, pp. 672-684.
- Giacosa, G., Alonso-Suárez, R., 2018. Desempeño de la persistencia para la predicción del recurso solar en Uruguay, *Revista Brasileira de Energía Solar*, vol 9, pp. 107-116.
- Huang, J., Rikus, L.J., Qin, Y., Katzfey, J., 2018. Assessing model performance of daily solar irradiance forecasts over Australia, *Solar Energy*, vol 176, pp. 615-626.
- Iacono, M.J., Mlawer, E.J., Clough, S. A., Morcrette, J. J., 2000. Impact of an improved longwave radiation model, rrtm, on the energy budget and thermodynamic properties of the near community climate model, ccm3. *Journal de Geophysical Research*, vol 105, pp. 14873–14890.
- Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M. W., Clough, S. A., Collins, W.D., 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the aer radiative transfer models, *Journal de Geophysical Research*, vol. 113, 2008.
- Lefèvre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Qu, Z., Wald, L., Homscheidt, M. S., Arola, A., 2013. McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions, *Atmospheric Measurement Techniques*, European Geosciences Union, vol 6, pp. 2403–2418.
- Lorenz, E., Heinemann, D., Wickramaratne, H., Beyer, H.G., Bofinger, S., 2007. Forecast of ensemble power production by grid-connected PV systems, 20th European PV Conference, Milano - Italia.
- Lorenz E, Hurka J, Heinemann D, Beyer HG., 2009. Irradiance forecasting for the power prediction of grid connected photovoltaic systems, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol 2, pp. 2–10.
- Lorenz, E., Kühnert, J., Heinemann, D., Nielsen, K.P., Remund, J., Müller, S.C., 2016. Comparison of global horizontal irradiance forecasts based on numerical weather prediction models with different spatio-temporal resolutions, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol 24, pp. 1626-1640.
- Mathiesen, P., Kleissl, J., 2011. Evaluation of numerical weather prediction for intra-day solar forecasting in the continental United States, *Solar Energy*, vol 85, pp. 967-977.
- Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M. J., Clough S. A., 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: Rrtm, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal de Geophysical Research*, vol 102, pp. 16663-16682.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A., 2007. Updated world map of the köppen-geiger climate classification, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, vol 11, pp. 1633–1644.
- Porrini, C., Boezio, G., 2017. Evaluación de modelos numéricos para pronósticos de radiación solar para plazos de hasta 120 horas en territorio uruguayo, Tesis de Grado, FING, UdelaR, Montevideo.
- Perez, R., Kivalov, S., Schlemmer, J., Hemker Jr., K., Renne, D., Hoff, T., 2010. Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US, *Solar Energy*, vol 84, pp. 2161–2172.
- Remund, J., Perez, R., Lorenz, E., 2008. Comparison of solar radiation forecasts for the USA, European PV Conference, Valencia, Spain.
- Teixeira-Branco, V., Alonso-Suárez, R., de Almeida, E., Porrini, C., Gutiérrez, A., Cazes, G., 2018. Evaluación del pronóstico de irradiación solar diaria en Uruguay utilizando el modelo WRF, *Anales del VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Gramado.
- Teixeira-Branco, V., Alonso-Suárez, R., David, M., 2021. Performance assessment of the ECMWF solar irradiation forecast in the Pampa Húmeda region of South America, *Proceedings of the ISES Solar World Congress*, Alemania (Congreso Virtual).
- Verbois, H., Huva, R., Rusydi, A., Walsh, W., 2018. Solar irradiance forecasting in the tropics using numerical weather prediction and statistical learning, *Solar Energy*, vol 162, pp. 265-277.
- Victoria, M., Haegel N., Peters I., Sinton R., Jäger-Waldau A., Cañizo C., Breyer C., Stocks M., Blakers A., Kaizuka I., Komoto K., Smets A., 2021. Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future, *Joule*, vol 5, pp. 1041-1056.
- Yang, D., Kleissl, J., Gueymard, C.A., Pedro, H.T.C., Coimbra, C.F.M., 2018. History and trends in solar irradiance and PV power forecasting: A preliminary assessment and review using text mining, *Solar Energy*, vol 168, pp. 60–101.
- Yang, D., Alessandrini, S., Antonanzas, J., Antonanzas-Torres, F., Badescu, V., Beyer, H. G., Blaga, R., Boland, J., Bright, J.M., Coimbra, C.F., David, M., Frimane, A., Gueymard, C.A., Hong, T., Kay, M.J., Killinger, S., Kleissl, J., Lauret, P., Lorenz, E., van der Meer, D., Paulescu, M., Perez, R., Perpiñán-Lamigueiro, O., Peters, I.M., Reikard, G., Renné, D., Saint-Drenan, Y.M., Shuai, Y., Urraca, R., Verbois, H., Vignola, F., Voyant, C., Zhang, J., 2020. Verification of deterministic solar forecasts, *Solar Energy*, vol 210, pp. 20-37.

**FORECASTING DAY-AHEAD SOLAR RADIATION IN THE PAMPA HÚMEDA REGION:
PERFORMANCE ANALYSIS OF THE GFS MODEL**

Abstract. *This article evaluates the solar radiation forecasts provided by the GFS global model in different sites of the Pampa Húmeda region. The analysis is performed for the first 24h of the day-ahead forecast using quality-controlled ground measurements. The GFS model shows a better performance in the region than the persistence procedure both at hourly and daily integrated time scales. No significant performance space variability is observed within the evaluated sites. At hourly scale, the model shows a bias towards overestimation and rRMSD values between 27.2% and 37.2%. The same tendency is observed for the daily integrated predictions, with rRMSD in the range of 21.0% and 22.9%. A discrimination by different sky conditions shows that the model performance downgrades with increasing cloudiness. When considering the performance under all sky conditions the GFS model shows a worse overall performance than the ECMWF model for the region, but it is competitive under clear sky conditions.*

Key words: *Solar forecast, GHI, NWP, GFS, Pampa Húmeda.*