

DESEMPEÑO DE LA PERSISTENCIA PARA LA PREDICCIÓN DEL RECURSO SOLAR EN URUGUAY

Gianina Giacosa – gianinagiacos@gmail.com

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

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

Resumen. La persistencia del recurso es la forma más simple de elaborar una predicción, y por ello establece un límite superior para el desempeño de técnicas de pronóstico más elaboradas. En este trabajo se realizó un análisis detallado del desempeño de la persistencia sobre la región de Uruguay. El estudio se realiza para la predicción en 4 escalas temporales: minutal, 10-minutal, horaria y diaria, para los pasos de pronóstico relevantes. Se encuentra que la persistencia establece límites exigentes para los primeros pasos de pronóstico intra-día, presentando un rRMSD de 17.6% para el primer paso minutal, de 21.3% para el primer paso 10-minutal y de 22.9% para el primer paso horario. Se analiza el desempeño discriminado por condición de cielo, encontrándose que en condiciones de cielo despejado la incertidumbre de la persistencia es menor que en condiciones de nubosidad, para toda escala temporal y horizonte de pronóstico. Se observa sobrestimación sistemática para cielo despejado y subestimación sistemática para cielo nublado. Este análisis forma parte de una serie de acciones destinadas a diagnosticar con alto grado de detalle el desempeño de técnicas de pronóstico en Uruguay, y busca generar información para combinar de forma óptima la persistencia con otras formas de pronóstico.

Palabras clave: Irradiación Solar, Pronóstico Solar, Persistencia.

1. INTRODUCCIÓN

Uruguay se encuentra culminando un proceso de cambio de su matriz de generación eléctrica en donde las energías renovables no convencionales tienen un rol central. Para finales de 2017 se habrán incorporado a la red eléctrica 1450 MW de energía eólica y 230 MW de energía solar fotovoltaica (PV), lo que representa respectivamente un 30% y 5% de la capacidad instalada en el país (BEN, 2018). La incorporación de un alto porcentaje de este tipo de energías en las redes eléctricas requiere manejar las fluctuaciones en la generación que son introducidas por la meteorología local, para lo cual se necesitan herramientas de pronóstico. El pronóstico de estos recursos permite un despacho eficiente de la energía eléctrica, reduciendo costos, y una mayor valorización de los excedentes de generación para su comercialización.

La predicción del recurso solar es un problema particularmente complejo debido a la dificultad que existe para anticipar el movimiento, formación y deformación de las nubes. La base para pronosticar la generación PV es la predicción de la irradiación solar en un plano horizontal a nivel de superficie (GHI, Global Horizontal Irradiation). Para su pronóstico existen distintas técnicas cuyo desempeño depende fuertemente del horizonte de pronóstico que se considere (Coimbra et al., 2013; Diagne et al., 2013). Los modelos numéricos de atmósfera (NWP, Numerical Weather Prediction) son capaces de pronosticar un gran número de variables atmosféricas, incluyendo la irradiación solar, resolviendo numéricamente las ecuaciones que gobiernan los procesos físicos en la atmósfera. Con el poder de cómputo adecuado, estos modelos permiten elaborar pronósticos operacionales desde 1 hora a varios días en adelante, y son los de mejor desempeño para el pronóstico de GHI para horizontes mayores a 6 horas (Lorenz et al., 2009; Kühnert et al., 2013; Perez y Hoff, 2013). Para el pronóstico entre 1 y 6 horas las técnicas por satélite son las preferidas (Kühnert et al., 2013; Perez y Hoff, 2013). Estas técnicas anticipan el movimiento nuboso a corto plazo utilizando el campo de velocidades estimado a partir de la secuencia de imágenes anteriores (Lorenz et al., 2004). La predicción de nubosidad es convertida en un pronóstico de irradiación solar utilizando un modelo operacional para tal fin (Perez et al., 2002; Rigollier et al., 2004; Ceballos et al., 2004; Alonso-Suárez et al., 2012; Qu et al., 2017). Las cámaras todo-cielo utilizan un enfoque similar, con la diferencia de que las imágenes son adquiridas desde tierra con una lente ojo de pez que capta el movimiento nuboso en la bóveda celeste (Chow et al., 2011; Yang et al., 2014). Esta técnica permite pronosticar al muy corto plazo (≈ 20 minutos) y en escalas espaciales pequeñas. Finalmente, existen varias propuestas para el pronóstico a corto plazo basadas en el análisis de series temporales (Bacher et al., 2009; Mellit y Pavan, 2010; Coimbra y Pedro, 2013; Lauret et al. 2015). Estas técnicas pueden tomar como insumo la propia serie temporal de irradiación medida, o incluir variables exógenas como predicciones por NWP o satélite u otras variables meteorológicas.

La persistencia del recurso establece un límite superior para el desempeño de estas técnicas de pronóstico. Esta técnica asume que las condiciones atmosféricas permanecerán constantes respecto al paso temporal anterior, y es la forma más simple de establecer una predicción. Dado su sencillez, las otras formas de pronóstico deben presentar un mejor desempeño para que se justifique la complejidad introducida. Esto es particularmente difícil para horizontes de

pronóstico pequeños, donde la persistencia suele ser una estrategia exitosa (Jolliffe y Stephenson, 2011). El desempeño de la persistencia depende fuertemente de la variabilidad local de la nubosidad, y se debe evaluar en cada sitio por separado. En Perez y Hoff (2013) se reporta el desempeño de la persistencia para el pronóstico horario y diario evaluado en 7 sitios con diferentes climas, apreciándose importantes diferencias de desempeños dependiendo del sitio. A modo de ejemplo, el desvío cuadrático medio (RMSD) para la persistencia a 1 hora varía entre 80 y 130 Wh/m² en diferentes estaciones de medida, lo que es respectivamente un 22% y un 35% de la media de GHI de cada sitio. A 6 horas estos valores se incrementan, variando desde 160 Wh/m² (32%) a 207 Wh/m² (56%). En este trabajo se analizó en forma detallada el desempeño de la persistencia en Uruguay ante la variabilidad meteorológica local, como forma de establecer las cotas superiores de desempeño admitido para las demás técnicas de pronóstico, que se encuentran en desarrollo en el país. Se analiza el desempeño en términos de las métricas comúnmente utilizadas en el área, y se discrimina por horizonte temporal y condición de nubosidad. Se abordan los horizontes de pronóstico minutales, 10-minutales, horarios y diarios, para sitios específicos en el territorio de Uruguay. El análisis permite identificar condiciones en las cuáles la persistencia presenta límites de desempeño exigentes, siendo posible combinarla en estas condiciones con otras técnicas de pronóstico como forma de reducir la incertidumbre de las predicciones.

2. DATOS UTILIZADOS

El estudio está basado exclusivamente en medidas de irradiancia solar global en plano horizontal (GHI) registradas en tierra. Se utilizan las medidas de GHI registradas en 16 sitios distribuidos en el territorio de Uruguay. Esta es una región con clima templado sub-tropical con características climáticas homogéneas, cuyo recurso solar presenta una variabilidad inter-anual intermedia (Alonso-Suárez, 2017), similar a la encontrada en la cuenca del Río Mississippi, en algunas zonas de la costa oeste de EEUU y en varios estados de la zona centro-este (Gueymard y Wilcox, 2011).

Se utilizaron los datos registrados en las dos redes de medida de irradiancia solar que existen en Uruguay: (i) la Red de Medida Continua de Irradiancia Solar (RMCIS) que administra el Laboratorio de Energía Solar (LES) de la Universidad de la República y (ii) la red de medida de la empresa eléctrica estatal (UTE). La RMCIS consta de 8 puntos de medición distribuidos en el país, de los cuáles se utilizaron 5 debido a la estadística de datos disponible en cada sitio. La red está equipada con piranómetros Kipp & Zonen de primera clase o superior para la medida de GHI que son calibrados cada dos años contra un estándar secundario que el LES mantiene con trazabilidad al patrón primario mundial en el World Radiation Center (Davos, Suiza). Las estaciones cuentan con adquirentes automáticos que registran datos con cadencia minutal y los envían diariamente a un servidor central del LES a través de la red de telefonía celular. La red de medida de UTE cuenta con varios sitios que cubren el país donde se mide a varias alturas el recurso eólico. En algunos sitios cuenta además con radiómetros de silicio LiCor LI-200R para la medida de GHI. La información de esta red es registrada con cadencia 10-minutal. El LES colabora con la empresa para la calibración de los sensores fotovoltaicos de la red. La ubicación de los sitios de medida utilizados en este trabajo se ilustra en la Fig. 1 y sus coordenadas se presentan en la Tab. 1. Se utilizaron los periodos anuales completos más largos en cada estación comprendidos entre enero de 2011 y diciembre de 2015.

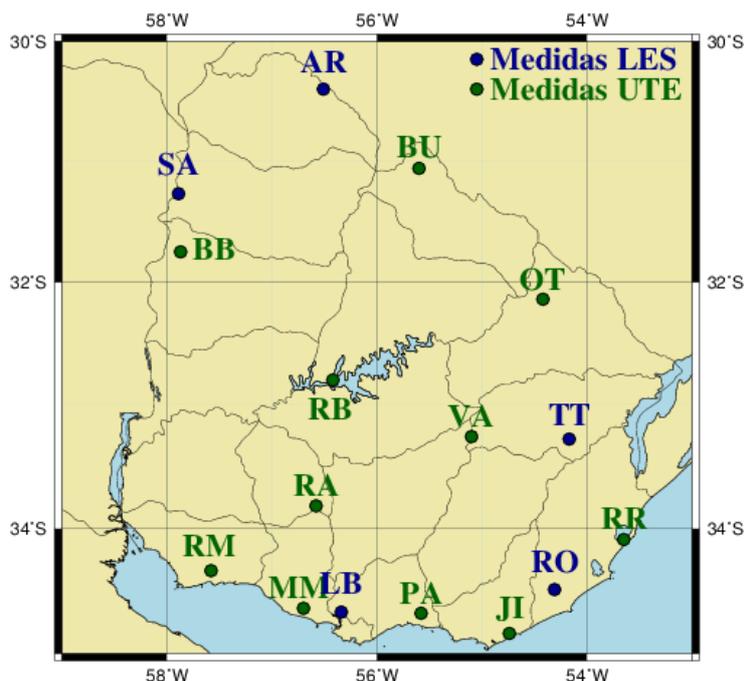


Figura 1- Ubicación de las estaciones de medida en el territorio de Uruguay

Tabla 1- Detalle de las estaciones de medida.

código	latitud	longitud	admin.	cadencia
SA	-31.27	-57.89	LES	minutal
TT	-33.28	-54.17	LES	minutal
RO	-34.49	-54.31	LES	minutal
AR	-30.40	-56.51	LES	minutal
LB	-34.67	-56.34	LES	minutal
OT	-32.14	-54.42	UTE	10-minutal
BU	-31.06	-55.60	UTE	10-minutal
RB	-32.08	-56.42	UTE	10-minutal
RA	-33.82	-56.58	UTE	10-minutal
RM	-34.34	-57.58	UTE	10-minutal
VA	-33.26	-54.73	UTE	10-minutal
MM	-34.64	-56.70	UTE	10-minutal
BB	-31.75	-57.87	UTE	10-minutal
PA	-34.68	-55.58	UTE	10-minutal
JI	-34.86	-54.73	UTE	10-minutal
RR	-34.09	-53.65	UTE	10-minutal

3. METODOLOGÍA

La irradiancia solar a nivel de superficie presenta variaciones geométricas conocidas debido al movimiento de la Tierra respecto al Sol y variaciones intermitentes debido al efecto de la atmósfera, principalmente a través de la nubosidad. El análisis estadístico de series temporales requiere utilizar series que tengan débil estacionalidad, para lo cual es necesario eliminar el comportamiento geométrico conocido (Coimbra et al., 2013). Para ello es común normalizar la serie de GHI, G_h , respecto a la irradiancia solar en un plano horizontal en el tope de la atmósfera, G_{oh} , obteniendo el índice de claridad (Duffie y Beckman, 2006), k_T , según,

$$k_T = \frac{G_h}{G_{oh}} \tag{1}$$

El pronóstico por persistencia de irradiancia solar supone que el índice de claridad se mantiene constante entre el tiempo (t) y el tiempo ($t + \Delta t$), lo que es: $k_T(t + \Delta t) = k_T(t)$. Esta hipótesis resulta en que,

$$\hat{G}_h(t + \Delta t) = k_T(t) \times G_{oh}(t + \Delta t), \tag{2}$$

donde \hat{G}_h es la irradiancia solar pronosticada y Δt es el horizonte de tiempo al cual se está realizando la predicción. Esta técnica, la más simple posible, asume que la nubosidad va a ser aproximadamente constante entre ambos instantes de tiempo. A modo de ejemplo, en la Fig. 2 se muestra una serie temporal de GHI y su correspondiente predicción por persistencia a 1 hora. Se puede observar que en condiciones permanentes de cielo despejado el pronóstico es muy bueno y en presencia de nubosidad existen mayores desvíos.

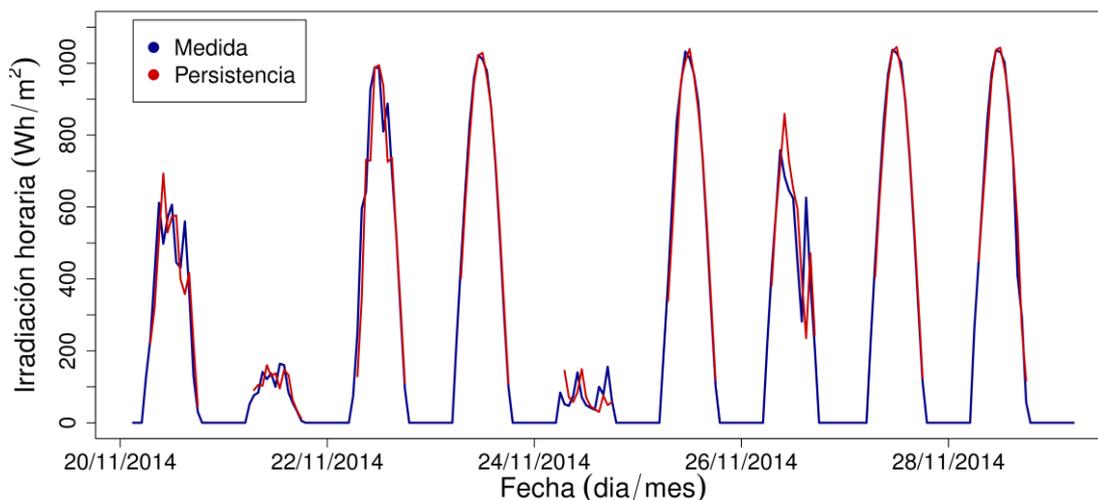


Figura 2- Ejemplo de aplicación de la persistencia para el pronóstico a 1 hora.

El error en tiempo (t) de la predicción a tiempo ($t + \Delta t$) se obtiene comparando el valor pronosticado con el valor medido, según,

$$e_{\Delta t}(t) = \hat{G}_h(t + \Delta t) - G_h(t + \Delta t), \quad (3)$$

por lo que desvíos positivos se corresponden con una sobrestimación de la persistencia y desvíos negativos con una subestimación. Para caracterizar los desvíos se utiliza el desvío promedio (MBD, Mean Bias Deviation), que cuantifica el sesgo sistemático, y el desvío cuadrático medio (RMSD, Root Mean Square Deviation), que cuantifica la dispersión. Estos indicadores se definen respectivamente en las Ecs. (4) y (5). Los valores relativos para estas cantidades, rMBD y rRMSD, se expresarán como porcentaje del valor medio de G_h .

$$MBD_{\Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\hat{G}_h(t + \Delta t) - G_h(t + \Delta t)) \quad (4)$$

$$RMSD_{\Delta t} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\hat{G}_h(t + \Delta t) - G_h(t + \Delta t))^2} \quad (5)$$

Para cada horizonte de pronóstico Δt se tiene una pareja de indicadores que cuantifica su desempeño. En este trabajo se analiza el desempeño de la persistencia a escala minutal para Δt desde 1 a 60 minutos, a escala 10-minutal para Δt desde 10 a 300 minutos (5 horas), a escala horaria hasta 6 horas y a escala diaria hasta 5 días. A escala 10-minutal se utiliza el promedio de la irradiancia minutal en W/m^2 . A escala horaria y diaria se utiliza la irradiación (energía en la hora y en el día) y se expresan en Wh/m^2 y MJ/m^2 , respectivamente. Todas las expresiones se pueden utilizar en las diferentes escalas temporales sin necesidad de adaptación. Para las escalas intra-diarias sólo se utilizan las muestras donde en tiempo (t) y en tiempo ($t + \Delta t$) el coseno del ángulo cenital es mayor a 0.10, lo que se corresponde con una altura solar de aproximadamente 5° .

4. RESULTADOS

La incertidumbre de la persistencia se evaluó a escala minutal para las 5 estaciones que registran con esa cadencia (estaciones LES) y a escala 10-minutal, horaria y diaria para las 16 estaciones contempladas en este trabajo. Se analiza el desempeño para toda condición atmosférica en términos promedio sobre el territorio y luego se discrimina el desempeño ante distintas condiciones de nubosidad, utilizando el índice de claridad.

4.1 Desempeño general sobre la región

La evaluación se realizó para cada estación por separado. Por compactidad, se presenta en las Tab. 2 y Tab. 3 los indicadores promedio sobre todas las estaciones. Para la predicción minutal y 10-minutal se muestran sólo algunos pasos temporales representativos. Los indicadores para todos los pasos temporales y desglosados por estación se pueden descargar del siguiente link: <http://les.edu.uy/forecast/>. Para las escalas intra-diaras se observa que los primeros pasos de pronóstico presentan un límite exigente para las demás técnicas de pronóstico, con un rRMSD de 17.6% a 1 minuto, de 21.3% a 10 minutos y de 22.9% a 1 hora. El rRMSD de la persistencia a escala minutal crece rápidamente en los primeros pasos, aumentando en 5 minutos del valor de 17.6% a 29.9%. A 60 minutos la predicción minutal tiene un rRMSD de 41.4%. A escala 10-minutal el rRMSD de la persistencia varía desde 21.3% a 10 minutos (primer paso) hasta 52.0% a 300 minutos (último paso). A escala horaria este indicador varía desde 22.9% a 1 hora a 47.9% a 6 horas. Es interesante observar que el desempeño de la predicción minutal se encuentra por encima del pronóstico 10-minutal para iguales horizontes temporales. Lo mismo ocurre para la predicción 10-minutal en comparación con la horaria. Esto se debe a que el recurso solar presenta más variabilidad a medida que se reduce la escala temporal, por lo que es más difícil pronosticar la irradiancia en un minuto específico que la irradiancia promediada en un intervalo de 10 minutos. Para las escalas intra-diarias se observa una tendencia creciente a la subestimación conforme aumenta el paso temporal Δt . El rMBD varía desde valores despreciables para los primeros pasos de predicción en todas las escalas hasta -0.8% para el último paso minutal, -3.7% para el último paso 10-minutal y -9.4% para el último paso horario. A escala diaria es donde se observan los mayores desvíos: el rRMSD varía entre 42.9% para la predicción a 1 día y 53.3% para la predicción a 5 días. El desvío rMBD es despreciable para todos los horizontes diarios de pronóstico. En la Fig. 3 se presentan a modo de ejemplo los diagramas de dispersión para la persistencia a 1 hora y a 1 día en adelante. Se identifica en escala de colores la cantidad de puntos en cada zona del diagrama. En ambas escalas se observa una gran dispersión en torno a la diagonal de ajuste perfecto y una acumulación de puntos en torno a ella, que representan muestras de cielo despejado o muy nublado.

Tabla 2- Indicadores de desempeño para las escalas minutal y 10-minutal.

MINUTAL					10-MINUTAL				
Δt (minutos)	MBD		RMSD		Δt (minutos)	MBD		RMSD	
	W/m ²	%	W/m ²	%		W/m ²	%	W/m ²	%
1	≈ 0	≈ 0	77	17.6	10	+1	+0.1	89	21.3
2	≈ 0	≈ 0	100	23.8	20	+1	+0.2	108	25.9
3	≈ 0	≈ 0	113	26.8	30	+1	+0.2	117	28.2
4	≈ 0	≈ 0	121	28.6	40	+1	+0.1	125	30.0
5	≈ 0	≈ 0	126	29.9	50	≈ 0	+0.1	131	31.6
6	≈ 0	≈ 0	130	30.8	60	≈ 0	-0.1	137	33.0
7	≈ 0	≈ 0	133	31.5	80	-1	-0.4	148	35.7
8	≈ 0	≈ 0	135	32.1	100	-3	-0.7	159	38.1
9	≈ 0	≈ 0	137	32.5	120	-5	-1.1	168	40.4
10	≈ 0	≈ 0	139	32.9	150	-7	-1.7	180	43.4
20	≈ 0	-0.1	150	35.6	180	-10	-2.3	192	46.1
30	-1	-0.2	157	37.3	210	-12	-2.9	201	48.3
40	-2	-0.4	164	38.9	240	-14	-3.3	208	50.1
50	-2	-0.6	169	40.1	270	-15	-3.5	213	51.3
60	-4	-0.8	175	41.4	300	-15	-3.7	216	52.0

Tabla 3- Indicadores de desempeño para las escalas horaria y diaria.

HORARIO					DIARIO				
Δt (horas)	MBD		RMSD		Δt (días)	MBD		RMSD	
	Wh/m ²	%	Wh/m ²	%		MJ/m ²	%	MJ/m ²	%
1	-5	-1.2	96	22.9	1	≈ 0	≈ 0	7.2	42.9
2	-14	-3.4	136	32.5	2	≈ 0	≈ 0	8.5	50.6
3	-24	-5.6	165	39.5	3	≈ 0	≈ 0	8.9	53.5
4	-31	-7.5	186	44.5	4	≈ 0	≈ 0	8.9	53.5
5	-36	-8.7	198	47.3	5	≈ 0	≈ 0	8.9	53.5
6	-39	-9.4	200	47.9	--	--	--	--	--

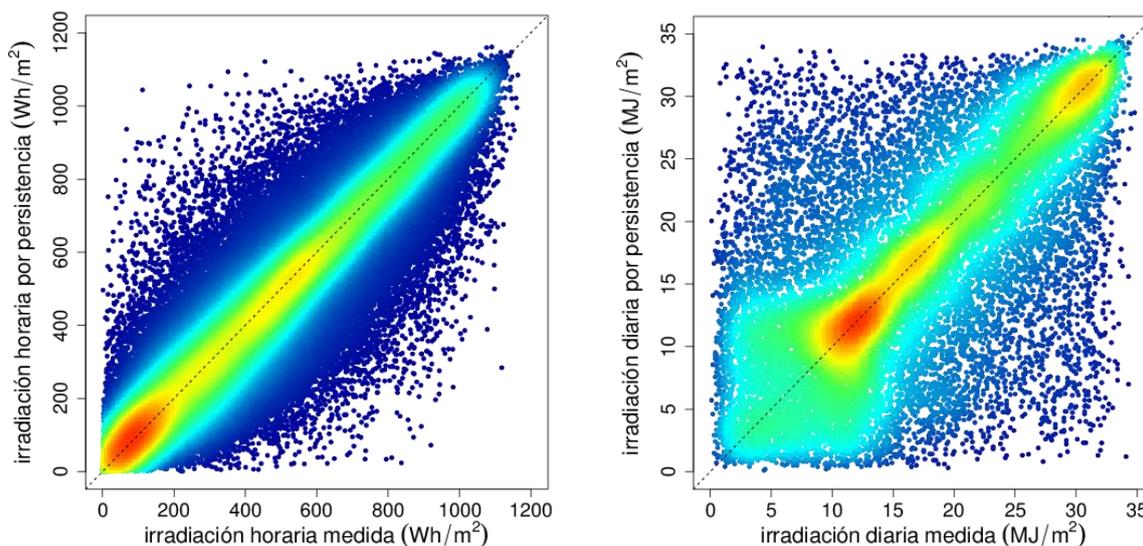


Figura 3- Diagramas de dispersión entre la medida (eje x) y la persistencia (eje y).
Izquierda: Predicción a 1 hora hacia adelante. Derecha: Predicción a 1 día hacia adelante.

El desempeño de la persistencia en términos de rRMSD se presenta en forma unificada en la Fig. 4 para todas las escalas temporales. La línea sólida representa el desempeño promedio en todas las estaciones y la zona en transparencia representa una desviación estándar del desempeño entre estaciones. En todas las escalas temporales se puede apreciar el comportamiento creciente del rRMSD con el horizonte Δt . El pronóstico minutal es el que presenta mayor dispersión

entre estaciones. A escala minutal, 10-minutal y diaria la dispersión entre estaciones permanece aproximadamente constante como función de Δt . En cambio, a escala horaria existe una mayor dispersión entre estaciones para los últimos pasos de predicción. Se incluye a modo de referencia el rRMSD horario y diario de la caracterización por satélite disponible para Uruguay (Alonso-Suárez et al., 2012), que oficia a los efectos prácticos como un límite inferior para el desempeño de las técnicas de pronóstico. El rango comprendido entre el desempeño de la persistencia (superior) y la caracterización por satélite (inferior) brinda límites útiles como objetivo de desempeño para las técnicas de pronóstico. En la Fig. 5 se muestra la curva de desempeño promedio de la persistencia (en azul) acompañada por las curvas de desempeño obtenidas en cada estación (en rojo) para cada una de las 4 escalas temporales consideradas. A modo complementario, esta figura se presenta en términos del RMSD absoluto.

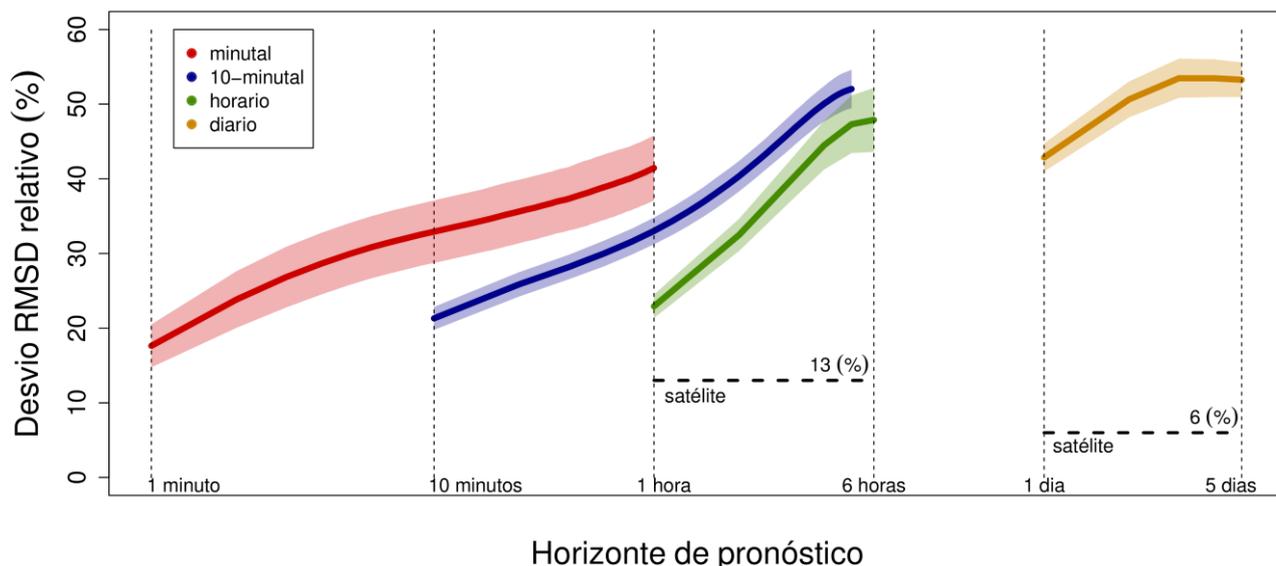


Figura 4- Desvío rRMSD porcentual para todas las escalas temporales y horizontes de pronóstico.

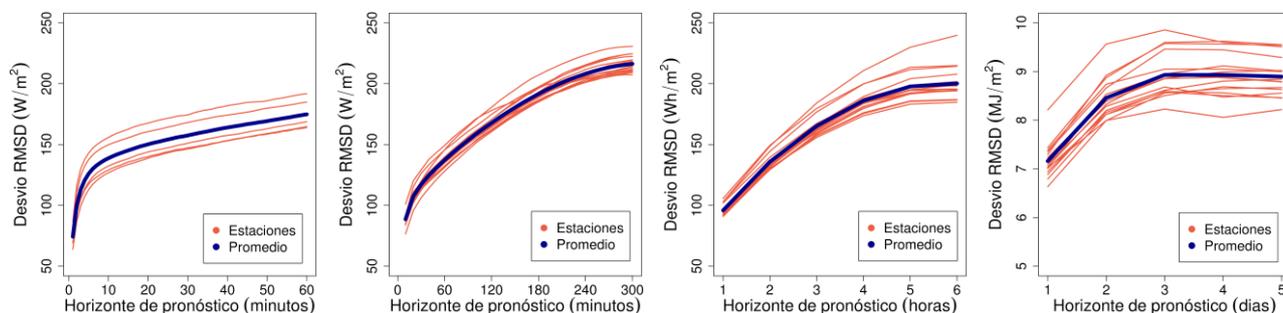


Figura 5- Desvío RMSD (absoluto) de la persistencia como función del horizonte de pronóstico Δt . De izquierda a derecha: escala minutal, escala 10-minutal, escala horaria y escala diaria.

4.2 Discriminación del desempeño a escala horaria y 10-minutal

Los desvíos en el procedimiento de persistencia son distintos dependiendo de la condición de nubosidad y el momento del día. Esto se puede apreciar en la Fig. 6 donde se muestra la distribución del MBD y RMSD para el pronóstico horario a 1 hora como función del índice de claridad (k_T) y el coseno del ángulo cenital ($\cos \theta_z$). Se observa que para condiciones de cielo despejado el MBD es positivo y para condiciones de nublado es negativo. Esto es coherente puesto que al pronosticar una condición de cielo despejado, los posibles resultados son un MBD aproximadamente cero si efectivamente está despejado en el futuro o un MBD positivo si está nublado. El razonamiento se invierte para una predicción de cielo nublado. Se observa que los mayores desvíos RMSD ocurren en condiciones de nubosidad intermedia ($0.25 < k_T < 0.55$) para alturas solares grandes ($\cos \theta_z > 0.7$), en torno al mediodía solar. En condiciones de cielo despejado, la dispersión RMSD es menor ($k_T > 0.65$). El MBD varía entre -14% y +13%, y el rRMSD máximo alcanza el 50%. En condiciones de cielo despejado y alturas solares intermedias el rRMSD alcanza valores tan bajos como 9-10%.

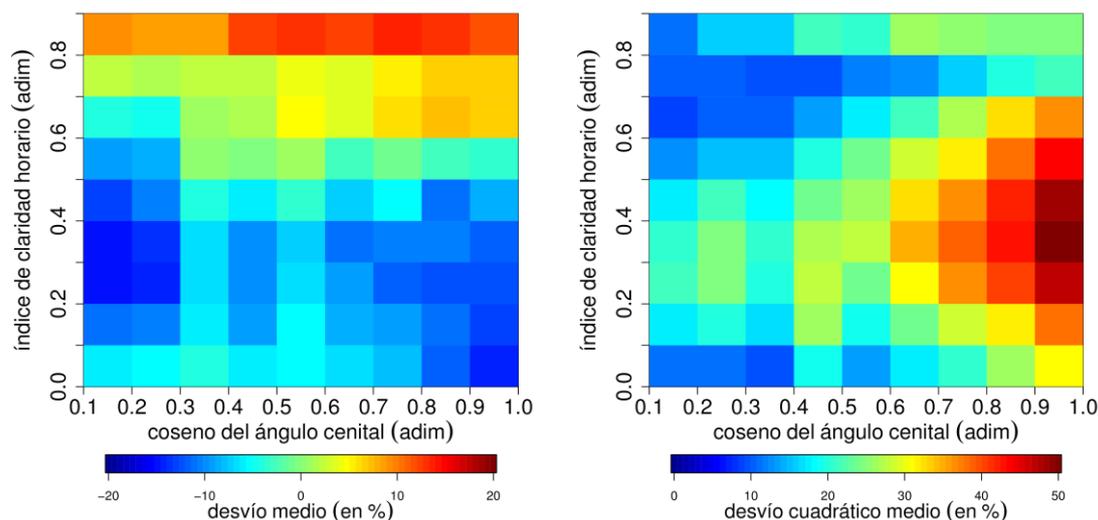


Figura 6- Desempeño de la persistencia a 1 hora discriminando índice de claridad y coseno del ángulo cenital. Izquierda: Desvío MBD porcentual. Derecha: Desvío RMSD porcentual.

Para cuantificar este comportamiento para los demás pasos de pronóstico, se discriminan los indicadores MBD y RMSD para condiciones de cielo despejado ($k_T > 0.65$) y de cielo nublado ($k_T \leq 0.65$). El resultado se presenta en forma resumida en la Tab. 4 y se ilustra en la Fig. 7. El comportamiento a escala horaria y 10-minutal es similar, observándose un peor desempeño en ambos indicadores a escala 10-minutal, como es esperado. Se observa que el sesgo sistemático es positivo para las condiciones de cielo despejado y es creciente con el horizonte de pronóstico. En cambio, para condiciones de cielo nublado el sesgo sistemático es negativo y decrece más rápidamente, explicando por qué en el sesgo general la subestimación aumenta con Δt creciente (para escalas intra-día). A escala 10 minutal el rango de variación (entre despejado y nublado) del rMBD crece desde -3.7% y +5.1% para el primer paso de pronóstico hasta -24.2% y +18.5% para el último paso. A escala horaria, estos rangos son menores a igual horizonte de pronóstico, y varían del rango entre -5.8% y +4.8% para la predicción a 1 hora al rango entre -24.4% y +12.8% para la predicción a 6 horas. El rRMSD es monótono creciente para ambas escalas temporales y condiciones de cielo. Para cielo despejado, el rRMSD 10-minutal varía desde 19.8% a 40.1% y el rRMSD horario desde 17.1% a 29.7%. Para condiciones de cielo nublado los rRMSD son mayores, estando para escala 10-minutal entre 22.5% y 61.0% y para escala horaria entre 26.6% y 56.8%. Se observa que para horizontes temporales mayores a 2 horas, la predicción 10-minutal en condiciones de cielo despejado presenta menor rRMSD que la predicción horaria en condiciones de cielo nublado. La diferencia de rRMSD entre las condiciones de cielo despejado y nublado se incrementan al aumentar el horizonte de pronóstico, y la diferencia es mayor a escala horaria que 10-minutal. Se observa que si bien la predicción horaria por persistencia a 1 hora muestra un rRMSD promedio de 22.9% (ver Tab. 3), éste puede variar entre 17.1% y 26.6% dependiendo de la condición de nubosidad. El desempeño de la persistencia es bueno para cielo despejado, y su combinación óptima con otras técnicas de pronóstico debe pasar por aprovechar esta propiedad en forma inteligente.

Tabla 4- Indicadores de desempeño discriminados por índice de nubosidad.

10-MINUTAL – CIELO DESPEJADO					HORARIO – CIELO DESPEJADO				
Δt (minutos)	MBD		RMSD		Δt (horas)	MBD		RMSD	
	W/m ²	%	W/m ²	%		Wh/m ²	%	Wh/m ²	%
10	+21	+5.1	82	19.8	1	+20	+4.8	72	17.1
30	+34	+8.1	106	25.4	2	+31	+7.4	97	23.1
60	+42	+10.2	119	28.8	3	+39	+9.3	112	26.7
120	+54	+13.1	139	33.5	4	+45	+10.7	121	29.0
180	+63	+15.3	153	36.9	5	+50	+12.0	125	30.0
300	+77	+18.5	167	40.1	6	+54	+12.8	124	29.7
10-MINUTAL – CIELO NUBLADO					HORARIO – CIELO NUBLADO				
Δt (minutos)	MBD		RMSD		Δt (horas)	MBD		RMSD	
	W/m ²	%	W/m ²	%		Wh/m ²	%	Wh/m ²	%
10	-15	-3.7	93	22.5	1	-24	-5.8	111	26.6
30	-26	-6.2	126	30.3	2	-51	-12.2	161	38.5
60	-37	-9.0	151	36.4	3	-74	-17.8	198	47.4
120	-61	-14.7	191	46.0	4	-91	-21.8	224	53.6
180	-81	-19.4	223	53.5	5	-101	-24.1	237	56.7
300	-101	-24.2	254	61.0	6	-102	-24.4	238	56.8

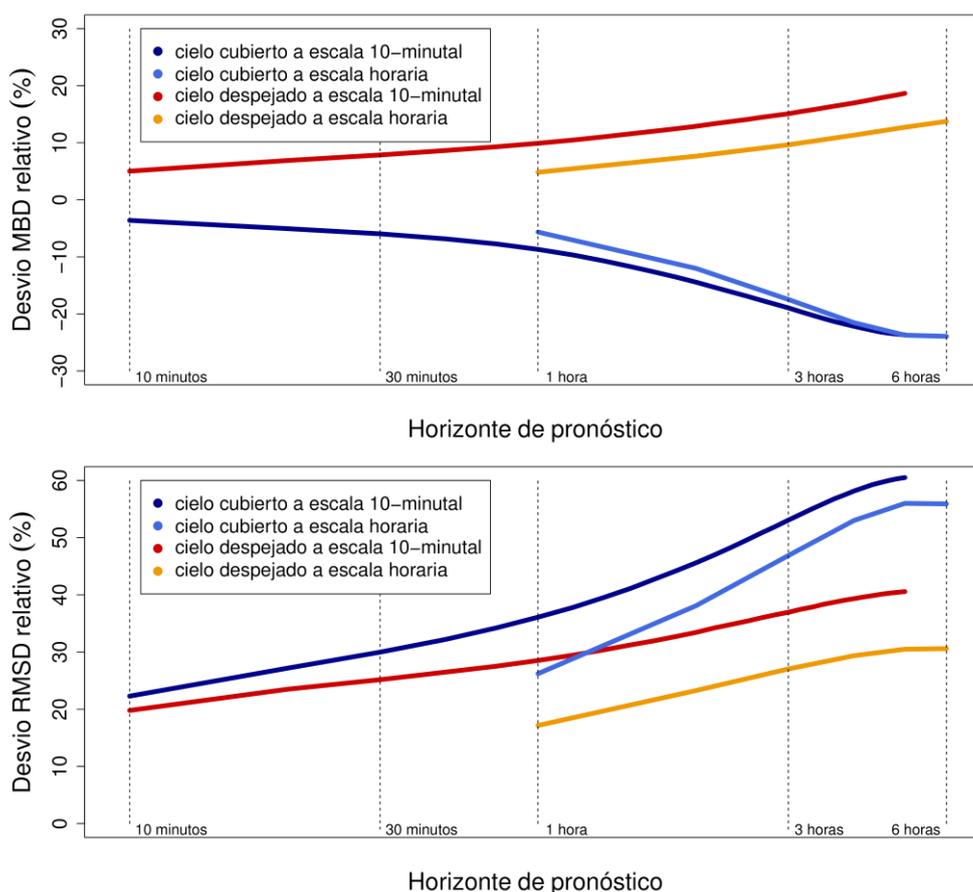


Figura 7- Evolución del desempeño como función de Δt para distintas condiciones de nubosidad. Arriba: Desvío MBD porcentual. Abajo: Desvío RMSD porcentual.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó en forma detallada el desempeño del procedimiento de persistencia para la predicción de irradiación solar sobre la región de Uruguay. Se encontraron límites superiores para la performance de técnicas de pronóstico más elaboradas. El rRMSD de la persistencia minutal varía desde 17.6% a 1 minuto a 41.4% a 60 minutos con un rMBD prácticamente despreciable. Este límite aplica a las técnicas de muy corto plazo basadas en series temporales o cámaras todo-cielo. A escala 10-minutal el rMBD es despreciable durante la primer hora y alcanza una subestimación máxima de -3.7% a 5 horas en adelante. En este rango, el rRMSD aumenta desde 21.3% a 52.0%. Este límite aplica a pronósticos de corto plazo, por ejemplo, basados en el análisis de series temporales o imágenes de satélite. A escala horaria el rMBD de la persistencia es mayor, encontrándose entre -1.2% y -9.4% para 1 y 6 horas a futuro, respectivamente. El rRMSD varía entre 22.9% y 47.9% para estos horizontes. Estos límites aplican a las técnicas de predicción horaria, basadas en satélite, NWP o series temporales. En todas estas escalas intra-diarias los límites establecidos por la persistencia para los primeros pasos temporales son exigentes para las técnicas existentes y su combinación óptima es una opción válida. A escala diaria el desempeño de la persistencia se degrada sensiblemente respecto a las demás escalas temporales, y no representa un límite particularmente exigente para el pronóstico por NWP. Los valores aquí encontrados se encuentran dentro del rango de valores reportados por Perez y Hoff (2013). El desempeño de la persistencia para la región de Uruguay se encuentra cercano a las estaciones con mejores indicadores de persistencia en dicho trabajo.

Al discriminar los indicadores por índice de claridad se observa que el desempeño general es una combinación de un buen desempeño en condiciones de cielo despejado con uno peor en condiciones de cielo nublado. Dependiendo de la condición de nubosidad y el momento del día, el rRMSD de la persistencia puede alcanzar valores tan altos como $\approx 50\%$ para la predicción a 1 hora, cuando el rRMSD general es de $\approx 23\%$. Esto ocurre en condiciones de nubosidad intermedia cercano al mediodía solar (altura solar grande). Como contrapartida, en algunas condiciones de cielo despejado se obtienen rRMSD tan chicos como $\approx 10\%$. Estas particularidades se deben aprovechar en un sistema que combine la persistencia con otras técnicas de pronóstico, por ejemplo, con salidas de NWP. Este estudio brinda un marco de referencia para la incertidumbre típica de la persistencia en la región de Uruguay y su comportamiento, y establece objetivos de desempeño a ser alcanzado por las técnicas de pronóstico más elaboradas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del proyecto FSE-ANII-2015-109937 de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación de Uruguay (ANII) y del proyecto PRONOS FJR-ADME-CAF 001-2016 de la Corporación Andina de Fomento (CAF) y la Administración del Mercado Eléctrico de Uruguay (ADME).

REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, R., Abal, G., Siri, R., Musé, P., 2012. Brightness-dependent tarpley model for global solar radiation estimation using GOES satellite images: application to Uruguay, *Solar Energy*, vol. 86, n. 11, pp. 3205–3215.
- Alonso-Suárez, R., 2017. Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales, Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.
- Bacher, P., Madsen, H., Nielsen, H. A., 2009. Online short-term solar power forecasting, *Solar Energy*, vol. 83, n. 10, pp. 1772–1783.
- BEN, 2018. Balance Energético Nacional, Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), Uruguay.
- Ceballos, J. C., Bottino, M. J., de Souza J. M., 2004. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery, *J. Geophys. Res.*, vol. 109, D02211, doi:10.1029/2003JD003531.
- Chow, C. W., Urquhart, B., Lave, M., Dominguez, A., Kleissl, J., Shields, J., Washom, B., 2011. Intra-hour forecasting with a total sky imager at the UC San Diego solar energy testbed, *Solar Energy*, vol. 85, n. 11, pp. 2881–2893.
- Coimbra, C. F., Kleissl, J., Marquez, R., 2013. Chapter 8 - overview of solar-forecasting methods and a metric for accuracy evaluation. In Kleissl, J., editor, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pp. 171–194. Academic Press, Boston.
- Coimbra, C. F., Pedro, H. T., 2013. Chapter 15 - stochastic-learning methods. In Kleissl, J., editor, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pp. 383–406. Academic Press, Boston.
- Diagne, M., David, M., Lauret, P., Boland, J., Schmutz, N., 2013. Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 65–76.
- Duffie, J., Beckman, W., 2006. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, third edition.
- Gueymard, C. A., Wilcox, S. M., 2011. Assessment of spatial and temporal variability in the US solar resource from radiometric measurements and predictions from models using ground-based or satellite data, *Solar Energy*, vol. 85, n. 5, pp. 1068–1084.
- Jolliffe, I. T., Stephenson, D. B., 2011. *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, second edition.
- Kühnert, J., Lorenz, E., Heinemann, D., 2013. Chapter 11 - satellite-based irradiance and power forecasting for the german energy market. In Kleissl, J., editor, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pp. 267–297. Academic Press, Boston.
- Lauret, P., Voyant, C., Soubdhan, T., David, M., Poggi, P., 2015. A benchmarking of machine learning techniques for solar radiation forecasting in an insular context, *Solar Energy*, vol. 112(C), pp. 446–457.
- Lorenz, E., Hammer, A., Heinemann, D., 2004. Short term forecasting of solar radiation based on satellite data, *Proceedings of the EUROSUN 2004 (ISES Europe Solar Congress)*, pp. 841–848.
- Lorenz, E., Hurka, J., Heinemann, D., Beyer, H. G., 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, n. 1, pp. 2–10.
- Mellit, A., Pavan, A. M., 2010. A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected pv plant at Trieste, Italy, *Solar Energy*, vol. 84, n. 5, pp. 807–821.
- Perez, R., Hoff, T. E., 2013. Chapter 10 - SolarAnywhere forecasting. In Kleissl, J., editor, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pp. 233–265. Academic Press, Boston.
- Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., Vignola, F., 2002. A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation, *Solar Energy*, vol. 73, n. 5, pp. 307–317.
- Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, B., Klüser, L., Lefèvre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., Wald, L., 2017. Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method, *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 26, pp. 33–57.
- Rigollier, C., Lefevre, M., Wald, L., 2004. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images, *Solar Energy*, vol. 77, n. 2, pp. 159–169.
- Yang, H., Kurtz, B., Nguyen, D., Urquhart, B., Chow, C. W., Ghonima, M., Kleissl, J., 2014. Solar irradiance forecasting using a ground-based sky imager developed at UC San Diego, *Solar Energy*, vol. 103, pp. 502–524.

PERSISTENCE PERFORMANCE FOR SOLAR RESOURCE FORECASTING IN URUGUAY

Abstract. *The persistence is the simplest way to predict the solar radiation, and therefore establishes an upper limit for the accuracy of more elaborated forecasting techniques. In this work we present a detailed analysis of the persistence's performance in Uruguay. The study was done in 4 time scales: minutes, 10-minutes, hourly and daily, and for the relevant time steps. It was found that persistence's first time steps for intra-day forecast achieve performances which are difficult to improve, obtaining a rRMSD of 17.6% for the first minute step, of 21.3% for the first 10-minutal step and of 22.9% for the first hourly step. The performance was inspected in different sky conditions, finding that under clear sky the uncertainty of the persistence is less than under cloudiness, for all time scales and forecasting horizons. Systematic overestimation is observed for clear sky and systematic underestimation is observed for cloudy conditions. This analysis is part of a series of actions aimed to obtain a detailed performance diagnosis of forecasting techniques in Uruguay, and it is intended to generate information for an optimal combination of the persistence with other forecasting techniques*

Key words: *Solar Irradiation, Solar Forecast, Persistence*