

# Evaluación del pronóstico de índice UV de Copernicus-ECMWF con mediciones en superficie de estaciones del SMN

Nota Técnica SMN 2024-189

**Fernando Nollas<sup>1</sup>, Eduardo Luccini<sup>2,3</sup>, Pablo Orte<sup>2,4</sup>, Gerardo Carbajal Benitez<sup>1</sup>, Elian Wolfram<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Servicio Meteorológico Nacional. Argentina*

<sup>2</sup> *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET. Argentina*

<sup>3</sup> *Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica. Argentina*

<sup>4</sup> *Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa, CITEDEF. Argentina*

Diciembre 2024



## Resumen

Esta nota técnica presenta una evaluación de pronósticos del índice ultravioleta (UVI) a través de la comparación con mediciones de superficie en Argentina. El pronóstico a evaluar se obtiene del modelo Copernicus-ECMWF el cual calcula el UVI utilizando modelos numéricos para diferentes horizontes temporales. Las mediciones en superficie utilizadas para la comparación pertenecen a nueve estaciones del Servicio Meteorológico Nacional en colaboración con el Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa, tomadas entre 2022 y 2024. Estas mediciones se compararon con los pronósticos de UVI, tanto a cielo claro como con nubosidad pronosticada, para el día siguiente y el mismo día. Los resultados muestran un mejor desempeño en condiciones de cielo claro, con métricas más favorables ante estas condiciones, pero con la desventaja de tener una menor cantidad de datos para el análisis. Por otro lado, el análisis realizado con pronósticos que consideran condiciones nubosas obtiene que el pronóstico al día siguiente es adecuado para la mayoría de los sitios, con un coeficiente de correlación (R) superior a 0.9 en la mayoría de los casos. No obstante, se observan variaciones significativas según la latitud a la hora de considerar el pronóstico con nubosidad: los sitios del sur, como Ushuaia y Río Gallegos, muestran mayores dificultades para el modelo, con errores RMSD más elevados (hasta un 52% en Ushuaia). Estas mayores diferencias pueden atribuirse a factores como la nubosidad, proximidad al mar, el terreno montañoso y la presencia de nieve. En contraste, estaciones como La Quiaca, ubicada en el norte, presentan los resultados más precisos, con un RMSD del 16%. El estudio resalta que el pronóstico al día siguiente es suficiente para implementar medidas de prevención, ya que los valores del pronóstico a corto plazo (el mismo día) no mejoran significativamente los resultados. Esto es relevante en la práctica, ya que permite la planificación anticipada para los tomadores de decisión sin requerir pronósticos de última hora.

## Abstract

This technical note presents an evaluation of ultraviolet index (UVI) forecasts through comparison with surface measurements in Argentina. The forecast to be evaluated is obtained from the Copernicus-ECMWF model, which calculates the UVI using numerical climate models for different time horizons. The surface measurements used for the comparison belong to nine stations of the National Meteorological Service in collaboration with the Institute of Scientific and Technical Research for Defense, taken between 2022 and 2024. These measurements were compared with UVI forecasts, both with clear skies and with forecast cloudiness, for the following day and the same day. The results show a better performance in clear sky conditions, with more favorable metrics under these conditions, but with the disadvantage of having a smaller amount of data for the analysis. On the other hand, the analysis carried out with forecasts that consider cloudy conditions shows that the following day forecast is adequate for most sites, with a correlation coefficient (R) greater than 0.9 in most cases. However, significant variations are observed depending on the latitude when considering the forecast with cloudiness: sites in the south, such as Ushuaia and Río Gallegos, show greater difficulties for the model, with higher RMSD errors (up to 52% in Ushuaia). These greater differences can be attributed to factors such as cloudiness, proximity to the sea, mountainous terrain and the presence of snow. In contrast, stations such as La Quiaca, located in the north, present the most accurate results, with an RMSD of 16%. The study highlights that the following day forecast is sufficient to implement prevention measures, since the real-time forecast values (on the same day) do not significantly improve the results. This is relevant in practice as it allows for advance planning for decision makers without requiring last minute forecasts.

**Palabras clave:** evaluación, pronóstico, índice UV, Copernicus

**Citar como:** Nollas, F., E. Luccini, P. Orte, G. Carbajal Benitez, E. Wolfram, 2024: Evaluación del pronóstico de índice UV de Copernicus-ECMWF con mediciones en superficie de estaciones del SMN. Nota Técnica SMN 2024-189.

## 1. INTRODUCCIÓN

La radiación solar ultravioleta (UV) es un factor clave en la salud humana, ya que la sobreexposición puede generar efectos negativos, como cáncer de piel, envejecimiento prematuro y daño ocular, entre otros. Si bien la radiación espectral emitida por el sol abarca longitudes de onda en el rango UVC, UVB y UVA, solo las últimas dos alcanzan la superficie terrestre. La respuesta de la piel humana es diferente en función de la longitud de onda, por eso es que se ha estudiado y establecido el espectro de acción eritemico (Mckinlay y Diffey, 1987; Webb y otros, 2011). De esta manera, se define la irradiancia solar UV eritémica de banda ancha (UVE) como la obtenida mediante la integral en longitud de onda de la convolución entre la irradiancia solar UV espectral total multiplicada por el espectro de acción eritémico.

En 2002, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) establecieron el índice UV (UVI, por sus siglas en inglés), que representa una medida de la intensidad de la radiación UV y su capacidad de producir eritema en los humanos. El UVI es un parámetro adimensional que posee una escala de colores y acciones preventivas sugeridas de acuerdo al valor que alcanza (WHO, 2002). El UVI se obtiene matemáticamente al multiplicar por 40 a la irradiancia eritémica en  $W/m^2$ . En su versión original se establece un único color para los valores de  $UVI > 11$ , sin embargo, recientemente se propuso una revisión de la paleta de colores con la finalidad de dar mayor claridad a las definiciones inconclusas y faltas de coherencia original (Luccini y otros, 2022; Luccini y otros, 2023).

Conocer el comportamiento histórico de los valores de radiación solar UV en un determinado sitio brinda un marco de referencia y permite adecuar las políticas públicas hacia la prevención, ya sea por sobreexposición o una subexposición a la misma (Orte y otros, 2011). Uno de los trabajos más completos relacionado con la cantidad de radiación solar UV que alcanza la superficie en el país fue realizado por Luccini y otros (2006), donde se presenta una climatología de radiación solar UV, la cual se usó de base en Nollas y otros (2020). En este último trabajo, se presentan mapas de UVI en diferentes escalas temporales y geográficas, pensando en que sirva como información para diferentes usos.

Por otro lado, conocer de antemano los valores esperables de UVI permite tomar acciones preventivas a los tomadores de decisión (ya sean del ámbito de salud, seguridad e higiene, trabajo, etc) para mitigar los riesgos ante la sobreexposición a la radiación UV. Los valores de UVI en condiciones de cielo claro (sin nubosidad) pueden obtenerse en base a modelos de mayor o menor complejidad, los cuales dependen principalmente de la columna de ozono (Madronich, 2007; Madronich y Flocke, 1997). Los valores esperados bajo estas condiciones son normalmente publicados por organismos acreditados en cada país debido a que se corresponden con la situación de mayor riesgo a la población. Por otro lado, estimar la radiación solar UV que alcanza la superficie en condiciones esperables de nubosidad requiere el uso de parametrizaciones más complejas que involucran la cobertura nubosa y la interacción de la radiación con la misma. No existen en la actualidad muchos portales que permitan obtener estimaciones o pronósticos de los valores de radiación UVE con cobertura espacial completa sobre nuestro país. Asimismo, la mayoría de ellos presenta estimaciones únicamente para condiciones de cielo claro, siendo muy pocos los que ofrecen estimaciones de radiación UVE considerando nubosidad. El portal Tropospheric Emission Monitoring Internet Service (TEMIS), operado por el KNMI, pone a disposición pronósticos tanto a cielo claro como con nubosidad, con la particularidad de que guarda los pronósticos en algunas ciudades selectas y de manera diaria. Por otro lado, el programa Copernicus, del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) es otra de las agencias que estiman radiación solar UVE con una anterioridad de hasta 120 hs y tanto para cielo claro como con nubosidad. Algunas de las bondades del pronóstico de ECMWF es que los datos son libres, abiertos y gratuitos, tiene guardadas estimaciones de radiación UVE desde 2015 a la actualidad de manera horaria y no posee faltantes en sus datos.

Si bien algunos trabajos han evaluado la performance del pronóstico de Copernicus utilizando mediciones en diferentes sitios (Pitkänen y otros, 2020; Eskes y otros, 2024), son escasos los estudios en el sur de Sudamérica. El único estudio que involucra validación de pronóstico de UVI en Argentina fue presentado por Orte y otros (2024) utilizando un modelo que usó como parámetros de entrada el ozono pronosticado y valores climatológicos de parámetros atmosféricos y albedo superficial. En ese trabajo se encontró un muy buen acuerdo entre el modelo y las mediciones en condiciones de cielo claro, mientras que las métricas desmejoraron cuando la nubosidad fue incluida.

Con la finalidad de que la población pueda conocer los valores esperables de UVI al día siguiente, el SMN publica en su página web diariamente el pronóstico obtenido del programa Copernicus tanto para cielo claro como con la nubosidad pronosticada. Por este motivo, en el presente trabajo se realizó una comparación de los valores pronosticados utilizando como referencia los datos obtenidos por la red solarimétrica del SMN.

## 2. DATOS

### 2.1 Mediciones

Si bien el SMN, con la colaboración del Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF), mide radiación solar UV en 11 sitios dentro del país, solo las estaciones con datos disponibles y confiables fueron seleccionadas para este trabajo. Las estaciones cuyos datos fueron utilizados para la comparación se presentan en la Tabla I en la cual se detallan las coordenadas y período utilizado para el presente informe. Debe tenerse en cuenta que, si bien figura el periodo con datos en cada sitio, el mismo puede no estar completo para cada año.

**Tabla I.** Estaciones del SMN que cuentan con datos de radiación solar UV, sus coordenadas y período considerado.

ESTACIÓN/ OBSERVATORIO	LATITUD	LONGITUD	PERÍODO
La Quiaca	-22.10	-65.60	2022-2023
Tucumán	-26.83	-65.23	2024
Pilar	-31.66	-63.88	2022-2024
Mendoza	-32.89	-68.87	2022-2024
Buenos Aires	-34.59	-58.48	2022-2024
Neuquén	-38.95	-68.14	2023
Comodoro Rivadavia	-45.78	-67.46	2022-2024
Río Gallegos	-51.61	-69.30	2022-2024
Ushuaia	-54.84	-68.30	2022-2024

Algunas de las estaciones están enmarcadas en el proyecto GAW mientras que otras pertenecen al proyecto SAVER-NET (Orte y otros, 2022). Las mediciones de radiación solar UVE que se adquieren en las estaciones listadas en la Tabla I son obtenidas por sensores robustos, los cuales son mantenidos por personal de las

estaciones. Los datos son adquiridos cada 1-minuto, completando 1440 datos diarios. Los radiómetros fueron calibrados en el 2022 utilizando como referencia radiómetros UVE con trazabilidad al World UV Calibration Center (WRC-WCC-UV) (Nollas y otros, 2023). En el presente estudio se utilizaron las mediciones a partir del año 2022 por ser más actuales y porque la última calibración de los equipos se llevó adelante ese año (Nollas y otros, 2023).

## 2.2 Modelo Copernicus-ECMWF

El modelo CY48R1 del Sistema Integrado de Previsión (IFS) del ECMWF emplea un sofisticado esquema de transferencia radiativa para la predicción del índice UV, como parte de la estimación de la composición atmosférica. Este esquema incorpora un modelado detallado de aerosoles, gases traza y su interacción con la radiación solar. La estimación del UVI se fundamenta en los procesos de absorción y dispersión de la radiación ultravioleta, principalmente debidos a la presencia de ozono y aerosoles en la atmósfera. Adicionalmente, el modelo simula la conversión de aerosoles y gases traza, así como la radiación absorbida y reflejada por la superficie y la atmósfera (Eskes et al., 2024). Para generar los datos de pronóstico de UVI primero se obtiene la irradiancia solar espectral en la superficie en el rango de 280 a 400 nm con una resolución de 5 nm, teniendo en cuenta el albedo de la superficie local, los aerosoles, las nubes y el ozono en el perfil del modelo.

El pronóstico de la radiación UV en CY48R1 se basa en el esquema de transferencia radiativa ecRad (Hogan y Bozzo, 2018), que también es utilizado para el cálculo de la radiación de onda corta y larga. Este esquema, implementado desde el ciclo CY43R3, permite una modelización flexible de las propiedades ópticas de gases, aerosoles y nubes, utilizando el método de Monte Carlo (McICA) para tratar la estructura subgrid de las nubes. Para los gases ópticamente activos, se emplea el modelo Rapid Radiation Transfer Model (Clough y otros, 2005), que parametriza los efectos de los aerosoles y gases traza en la transferencia radiativa.

La resolución espacial del pronóstico ECMWF para UVI es de  $0.4^\circ \times 0.4^\circ$  y tiene cobertura global. A su vez, dispone de estimaciones desde 2015 a la actualidad de manera horaria. Copernicus emite dos pronósticos diarios de UVI, con resolución temporal de 1 hora hasta 120 hs anticipadas, tanto para cielo despejado como con nubosidad estimada: a las 00:00 hs y 12:00 hs UTC de cada día (en Argentina 21:00 hs locales del día anterior y 9:00 hs del mismo día). Los datos pueden descargarse desde la página: <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/datasets/cams-global-atmospheric-composition-forecasts?tab=overview>

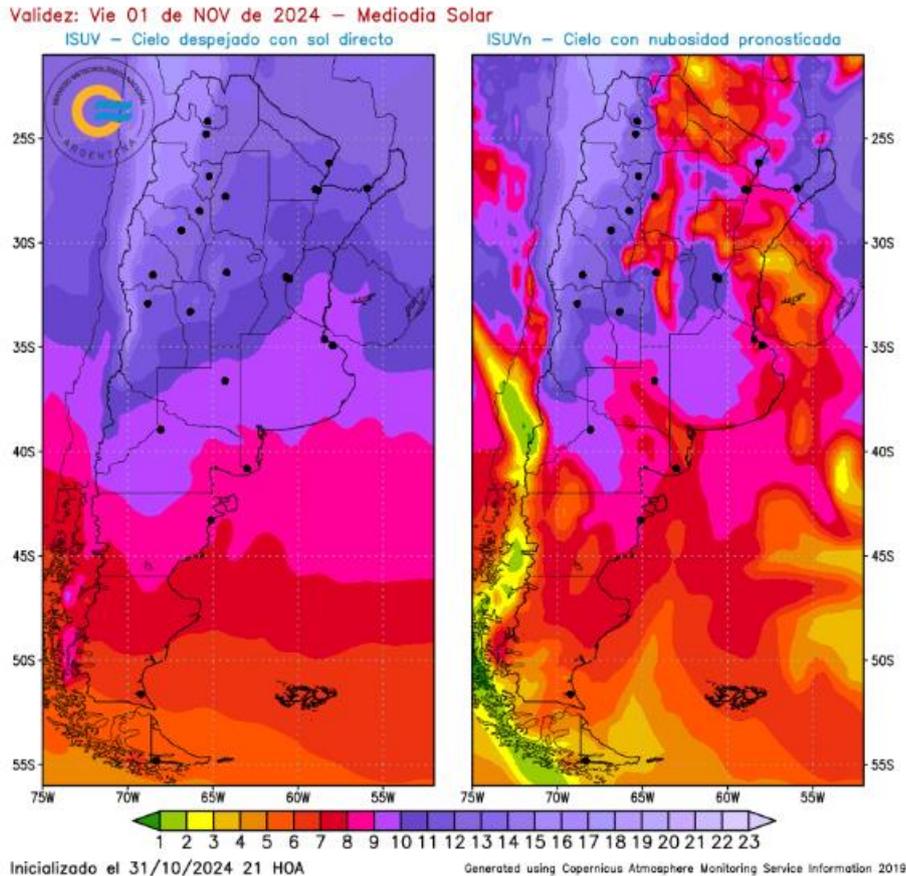
Para el análisis de esta nota técnica, se consideró el pronóstico al día siguiente del ciclo de las 12:00 hs UTC. Asimismo, y a modo de comparación, también se consideraron estimaciones de ECMWF correspondientes al mismo día en cuestión, por lo que, a partir de ahora, nos referiremos a “pronóstico a corto plazo” como el pronóstico obtenido en el ciclo de las 12:00 hs UTC para el día considerado. El hecho de usar el pronóstico correspondiente al mismo día busca establecer si las estimaciones hechas para el mismo día mejoran considerablemente respecto de las estimadas el día anterior.

## 3. METODOLOGÍA

Las mediciones de radiación solar UVE obtenidas en cada una de las estaciones del SMN fueron corregidas según los resultados obtenidos en Nollas y otros (2023). Luego, se realizó un control visual y analítico utilizando diagramas solares para verificar posibles problemas con corrimientos de hora y sombras indeseadas. Para el presente análisis solo los valores de ángulo solar cenital (SZA, por sus siglas en inglés) menores a  $70^\circ$  fueron considerados debido a que, para ángulos mayores, los valores de UVI son bajos y

presentan un error coseno considerable. Ushuaia y Río Gallegos fueron las únicas excepciones a esta regla debido a que, por su posición latitudinal, los momentos en los que  $SZA < 70^\circ$  son escasos en invierno. Únicamente para estos sitios se consideraron  $SZA < 80^\circ$ .

Debe tenerse en cuenta que esta nota técnica no apunta a una validación horaria de todos los valores pronosticados sino de los valores que finalmente se publican en la web del SMN. Por ello, es necesario introducir cómo se obtiene el mapa que muestra los valores de UVI que se publican en la web. La Fig. 1 muestra los mapas que se publican en la web del SMN, en este caso mapas para el día 01-11-2024 generado el día 31-10-2024.



**Fig. 1.** Mapa con los pronósticos de UVI para el día 01/11/2024 calculados por ECMWF para todo el territorio nacional.

El mapa de la izquierda muestra los valores de UVI máximos esperables para el día correspondiente al considerar condiciones de cielo claro o con sol descubierto. Ante estas condiciones, es esperable que los valores de UVI alcancen su valor máximo alrededor del mediodía solar, normalmente entre las 16 hs y 17 hs UTC. En caso de que el día en cuestión no presente nubosidad, o que el sol se encuentre descubierto en ese horario, esos son los valores esperables de UVI. Asimismo, debe tenerse en cuenta que las condiciones de cielo claro no siempre coinciden con las condiciones reales de nubosidad. Por ello, el mapa de la derecha muestra los valores de UVI considerando una cobertura nubosa que es obtenida en base a modelos numéricos. Los valores que se presentan en el mapa de la derecha no se obtienen a una hora específica, sino que se obtiene utilizando un rango de valores alrededor del mediodía solar, que es el momento en que se esperan valores máximos. Cuando los datos de pronóstico al día siguiente son descargados, se obtienen los datos para las 14 hs UTC hasta las 18 hs UTC. Esto representa aproximadamente un intervalo aproximado de  $\pm 2$  hs alrededor del mediodía solar. Entre estos cinco valores de UVI que consideran una nubosidad

media, se obtiene entonces el valor máximo y ese es el valor que se muestra en el gráfico que figura en la página web del SMN. De esta manera, lo que se muestra en el mapa de la derecha corresponde a los valores máximos esperables en condiciones de nubosidad pronosticada. Esto implica que, por día, se obtiene un valor correspondiente a las condiciones de cielo claro y otro a las condiciones de nubosidad (en caso de que hubiera nubosidad), calculando este último como el máximo entre cinco valores. Estos son los valores que, finalmente, son comparados contra las mediciones, por lo que el procedimiento de análisis de las mediciones debe tener en cuenta similares consideraciones.

### 3.1 Condiciones de nubosidad

Una vez que los datos minutales fueron corregidos y filtrados, fue el momento de obtener los valores horarios con los cuales comparar las estimaciones de Copernicus. Debe tenerse en cuenta que, de acuerdo con la documentación disponible en la página de Copernicus, los datos de pronóstico de UVI corresponden a valores instantáneos para la hora especificada. Por lo tanto, una primera aproximación habría sido obtener los valores de UVI correspondientes a cada hora exacta, por ejemplo 12 hs, 13 hs, etc. Sin embargo, debe recordarse que, en condiciones de nubosidad, la radiación solar puede presentar una variabilidad muy grande en cortos períodos de tiempo (Cede y otros, 2002; Gueymard, 2017). Por ello, en este trabajo se estableció que el valor correspondiente a una hora específica sería el promedio correspondiente a los valores de UVI en  $\pm 15$  minutos alrededor de una hora. Esto quiere decir, por ejemplo, que el valor correspondiente a la hora 15 se obtuvo como un promedio de los valores minutales de UVI entre las 14:45 hs y las 15:15 hs. De esta manera se espera que el valor obtenido se encuentre menos influenciado por efectos transitorios que no son percibidos dentro de los modelos.

### 3.2 Condiciones de cielo claro

Para poder comparar los valores pronosticados de UVI en condiciones de cielo claro contra las mediciones primeramente es necesario determinar, para cada uno de los valores minutales, si ese valor corresponde a este tipo de condiciones. Para ello se utilizó la metodología propuesta por Reno y Hansen (2016), que permite identificar momentos de cielo comparando mediciones de irradiancia solar global horizontal (GHI) con estimaciones del mismo parámetro, pero bajo condiciones de cielo claro ( $GHI_{cs}$ ). En este trabajo se utilizaron estimaciones del modelo de cielo claro McClear (Lefèvre y otros, 2013) debido a su buen desempeño en algunos sitios del país (Lusi y otros, 2023). Si bien esta metodología es muy precisa y sensible en cuanto a la detección de nubosidad, tiene la desventaja de necesitar los valores de GHI medidos en cada sitio. Esto representó una limitación en el presente análisis porque en algunos sitios hay períodos de tiempo en el que se cuenta con datos de UVE pero no de GHI por diferentes motivos. Por ello, se optó por utilizar los datos de GHI disponibles y determinar, para esos datos, si correspondían a momentos de cielo claro o no. Conociendo si la condición de cada dato 1-min era de cielo claro o no, se realizó un promedio horario de los datos de UVI igual al presentado en la sección 2.1 pero esta vez también se sumaron la cantidad de minutos que presentaban nubosidad detectada por la metodología de Reno y Hansen. De esta manera se pudo determinar la cantidad de minutos con nubosidad que cada promedio de UVI tenía. Si la cantidad de minutos con nubosidad resultaba igual a 0 entonces ese promedio correspondía a condiciones de cielo totalmente claro. Por otro lado, hubo promedios en los que se tuvo los 31 minutos con nubosidad. Finalmente, para hacer la comparación, se utilizaron los promedios horarios correspondientes a las 16 hs o 17 hs UTC (dependiendo del sitio) que tuvieran una cantidad menor a 10 minutos con nubosidad detectada por la metodología.

Debe tenerse en cuenta que filtrar datos de UVI en condiciones de cielo claro representa una disminución en la cantidad de datos para el análisis. A su vez, el hecho de que la metodología de Reno y Hansen (2016)

utilice datos de GHI en vez de UVE limitó el análisis a los datos disponibles de GHI, debiendo dejar de lado muchos datos de UVE y disminuyendo aún más la cantidad de datos para el análisis de cielo claro.

### 3.3 Métricas

La performance de los valores del pronóstico fue evaluada utilizando las siguientes métricas: desvío medio (MBD), desvío cuadrático medio (RMSD), desvío medio absoluto (MAD) y coeficiente de Pearson (R), los cuales se presentan en las ecuaciones 1 a 4.

$$MBD = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (1)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (4)$$

donde  $P_i$  representa el valor correspondiente a la predicción,  $O_i$  es el valor observado y  $\bar{O}$  el promedio de las observaciones y  $\bar{P}$  el promedio de los pronósticos.

El análisis de los datos consistió en un análisis global y general de todos los valores disponibles para cada sitio y para todos los meses disponibles, obteniendo así las métricas generales para todos los datos. Asimismo, se realizó un análisis mensual con el pronóstico que considera nubosidad con el fin de evaluar las incertidumbres en los diferentes meses del año, teniendo en cuenta el comportamiento estacional de la radiación solar. En este último caso, solo los meses con más de 10 datos fueron considerados ya que sitios con períodos disponibles cortos no presentaron una cantidad de datos que permitiera realizar un análisis estadístico. Se aclara que solo se realizó el análisis mensual con el pronóstico que considera nubosidad porque la cantidad de datos por mes correspondientes a cielo claro no es suficiente para realizar este tipo de análisis.

## 4. RESULTADOS

En la Tabla II se presentan las métricas obtenidas de la comparación entre los valores pronosticados de UVI que consideran nubosidad y las mediciones, tanto para el pronóstico al día siguiente como para corto plazo. Asimismo, también se presenta la cantidad total de datos considerados en el análisis.

Una de las primeras observaciones que se derivan de la Tabla II es que en la mayoría de las métricas se observa una mejora en el pronóstico a corto plazo en relación al pronóstico al día siguiente, sin embargo, en ninguno de los casos la mejora es significativamente considerable. Esto tiene una implicancia práctica

importante a la hora de tomar decisiones ya que la información brindada a los tomadores de decisión el día anterior será prácticamente la misma que la obtenida por ECMWF para el mismo día. Por ello, nos centraremos en el pronóstico al día siguiente que es el que permite evaluar acciones de prevención.

**Tabla II.** Métricas globales obtenidas para cada uno de los sitios utilizando pronóstico con nubosidad al día siguiente y a corto plazo.

ESTACIÓN/ OBSERVATORIO	PRONÓSTICO AL DÍA SIGUIENTE				PRONÓSTICO A CORTO PLAZO				CANT. DATOS
	MBD	MAD	RMSE	R	MBD	MAD	RMSE	R	
<b>La Quiaca</b>	0.98	1.31	1.53	0.93	1.03	1.37	1.59	0.93	432
<b>Tucumán</b>	-0.51	1.73	2.44	0.83	-0.17	1.50	2.09	0.87	179
<b>Pilar</b>	-0.31	0.99	1.64	0.90	-0.16	0.91	1.53	0.91	420
<b>Mendoza</b>	0.21	0.82	1.29	0.95	0.39	0.81	1.24	0.96	673
<b>Buenos Aires</b>	0.43	0.84	1.30	0.94	0.42	0.81	1.25	0.95	888
<b>Neuquén</b>	0.16	0.44	0.72	0.96	0.12	0.41	0.69	0.96	262
<b>Comodoro Rivadavia</b>	0.06	0.57	1.05	0.95	0.01	0.57	1.03	0.95	433
<b>Río Gallegos</b>	-0.23	0.60	1.08	0.93	-0.23	0.58	1.08	0.92	668
<b>Ushuaia</b>	-0.46	0.81	1.38	0.87	-0.45	0.77	1.31	0.89	770

En cuatro de los sitios se observa una subestimación estadística ( $MBD < 0$ ) del pronóstico al día siguiente respecto a las mediciones y la mayoría de los sitios presenta un  $R > 0.9$ . Debe tenerse en cuenta que las mediciones no presentan el mismo período temporal ya que se usan los datos disponibles, por ello la comparación de las métricas debería considerarse únicamente cualitativa. Por ejemplo, los resultados que se observan en la tabla II muestran una menor correspondencia entre el pronóstico y la medición para Tucumán, lo cual podría estar relacionado con la poca cantidad de datos disponibles. El siguiente sitio con menos cantidad de datos (Neuquén) es el que mejores métricas presenta y esto podría estar relacionado con la menor cantidad de datos, lo que vuelve el análisis menos representativo, aunque no por eso menos importante.

El RMSD es una métrica más sensible a grandes desvíos de la predicción, por lo que obtener valores de este parámetro mayores a 1 en casi todos los sitios, indicaría dificultades para el modelo en pronosticar valores altos de UVI.

Por otro lado, en la Tabla III se presentan las métricas obtenidas de la comparación entre los valores pronosticados de UVI que consideran cielo claro y las mediciones, tanto para el pronóstico al día siguiente como para corto plazo. La cantidad de datos, mostrados también en la tabla, evidencia la notable disminución que representa el filtrado de este tipo de condiciones y la metodología utilizada que depende de GHI.

A diferencia de las condiciones de nubosidad, la mayoría de los sitios presenta mejores métricas en el caso de cielo claro al día siguiente que en corto plazo. De cualquier manera, y al igual que bajo condiciones de nubosidad, los valores presentados en la Tabla III no muestran diferencias considerables en las métricas de los pronósticos al día siguiente en comparación a corto plazo, por lo que en adelante se analizará únicamente el pronóstico al día siguiente. Bajo condiciones de cielo claro los resultados confirman una subestimación en Pilar y Ushuaia, mientras que el resto de las estaciones muestra una sobreestimación por parte del modelo utilizado por Copernicus.

Comparando las tablas II y III puede corroborarse un mejor desempeño del pronóstico que considera condiciones de cielo claro, lo cual era esperable teniendo en cuenta las dificultades que representa la modelación de nubosidad y su interacción con la radiación solar.

**Tabla III.** Métricas globales obtenidas para cada uno de los sitios utilizando pronóstico a cielo claro al día siguiente y a corto plazo.

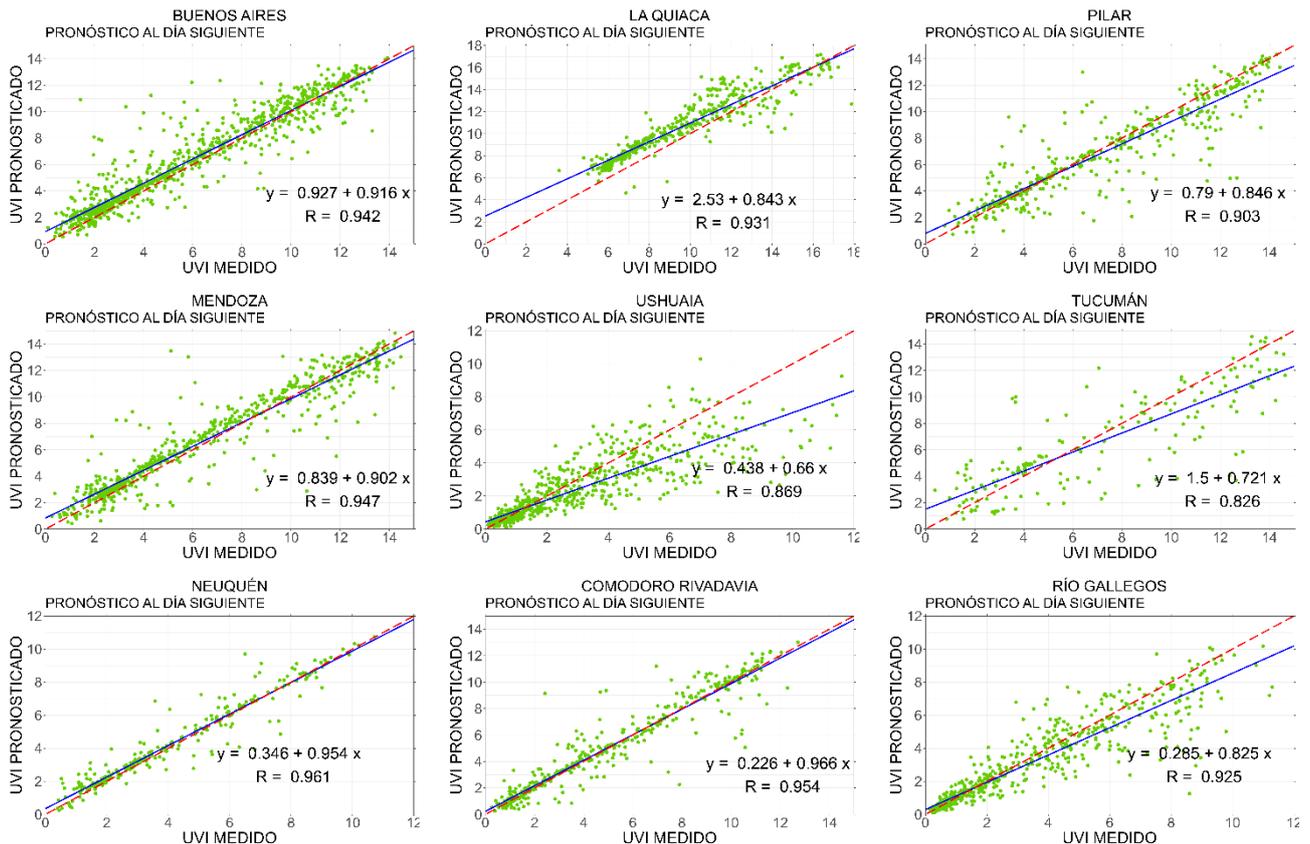
ESTACIÓN/ OBSERVATORIO	PRONÓSTICO AL DÍA SIGUIENTE				PRONÓSTICO A CORTO PLAZO				CANT. DATOS
	MBD	MAD	RMSE	R	MBD	MAD	RMSE	R	
La Quiaca	0.905	0.925	1.014	0.992	1.008	1.018	1.123	0.990	169
Tucumán	0.687	0.698	0.790	0.995	0.773	0.773	0.832	0.997	29
Pilar	-0.032	0.281	0.379	0.995	0.072	0.278	0.354	0.996	170
Mendoza	0.858	0.859	1.154	0.975	0.871	0.871	1.158	0.975	165
Buenos Aires	0.357	0.416	0.491	0.996	0.451	0.477	0.547	0.996	237
Neuquén	0.204	0.215	0.239	0.999	0.126	0.179	0.205	0.998	89
Comodoro Rivadavia	0.031	0.166	0.212	0.998	0.010	0.181	0.240	0.997	100
Río Gallegos	0.051	0.086	0.118	0.999	0.040	0.083	0.117	0.999	96
Ushuaia	-0.472	0.634	1.133	0.977	-0.483	0.649	1.157	0.976	38

Los valores de las métricas que se muestran en las Tablas II y III son absolutos, por lo que, por ejemplo, el valor de RMSD 1.38 obtenido para Ushuaia no es directamente comparable con el de 1.30 de Buenos Aires. Estas tablas permiten evaluar las incertidumbres por sitio de manera absoluta, pero debe tenerse en cuenta, además, el comportamiento latitudinal y estacional de la radiación UVE en cada sitio. Por ello, en la Tabla IV se presentan las mismas métricas para los pronósticos al día siguiente tanto para cielo claro como condiciones de nubosidad, pero relativas al valor medio de las mediciones.

**Tabla IV.** Métricas globales relativas al valor medio de las observaciones para cada uno de los sitios utilizando pronóstico al día siguiente para condiciones de cielo claro y con nubosidad pronosticada.

ESTACIÓN/ OBSERVATORIO	PRONÓSTICO AL DÍA SIGUIENTE NUBOSIDAD			PRONÓSTICO AL DÍA SIGUIENTE CIELO CLARO		
	MBD (%)	MAD (%)	RMSE (%)	MBD (%)	MAD (%)	RMSE (%)
La Quiaca	9.90	13.29	15.53	9.22	9.42	10.33
Tucumán	-7.05	24.08	33.91	7.43	7.55	8.55
Pilar	-4.39	13.76	22.87	-0.40	3.52	4.75
Mendoza	3.35	12.88	20.13	10.53	10.55	14.16
Buenos Aires	7.35	14.31	22.16	5.05	5.89	6.93
Neuquén	3.93	10.74	17.77	4.54	4.79	5.33
Comodoro Rivadavia	1.38	12.11	22.25	0.70	3.75	4.79
Río Gallegos	-7.86	20.06	36.30	2.43	4.06	5.58
Ushuaia	-17.34	30.64	52.39	-14.31	19.22	34.33

En la tabla IV puede verse una considerable mejora en la performance del modelo para condiciones de cielo claro, reflejado en las métricas estadísticas relativas para todos los sitios. Un aspecto llamativo es el hecho de que, en La Quiaca y Mendoza, si bien hubo mejoría en las métricas cuando se consideran condiciones de cielo claro, la misma no es tan marcada como en otros sitios. Esto posiblemente se deba a que ambos sitios presentan muchos días de cielo claro a lo largo del año. Ushuaia es otro sitio que presenta características particulares debido a la escasa cantidad de días de cielo claro que tiene a lo largo del año; menos del 5% de los datos totales fueron considerados de cielo claro. Por lo tanto, si bien se obtienen mejores métricas en este sitio bajo condiciones de cielo claro, debe tenerse en cuenta la poca cantidad de datos que se consideraron para obtener estos resultados.

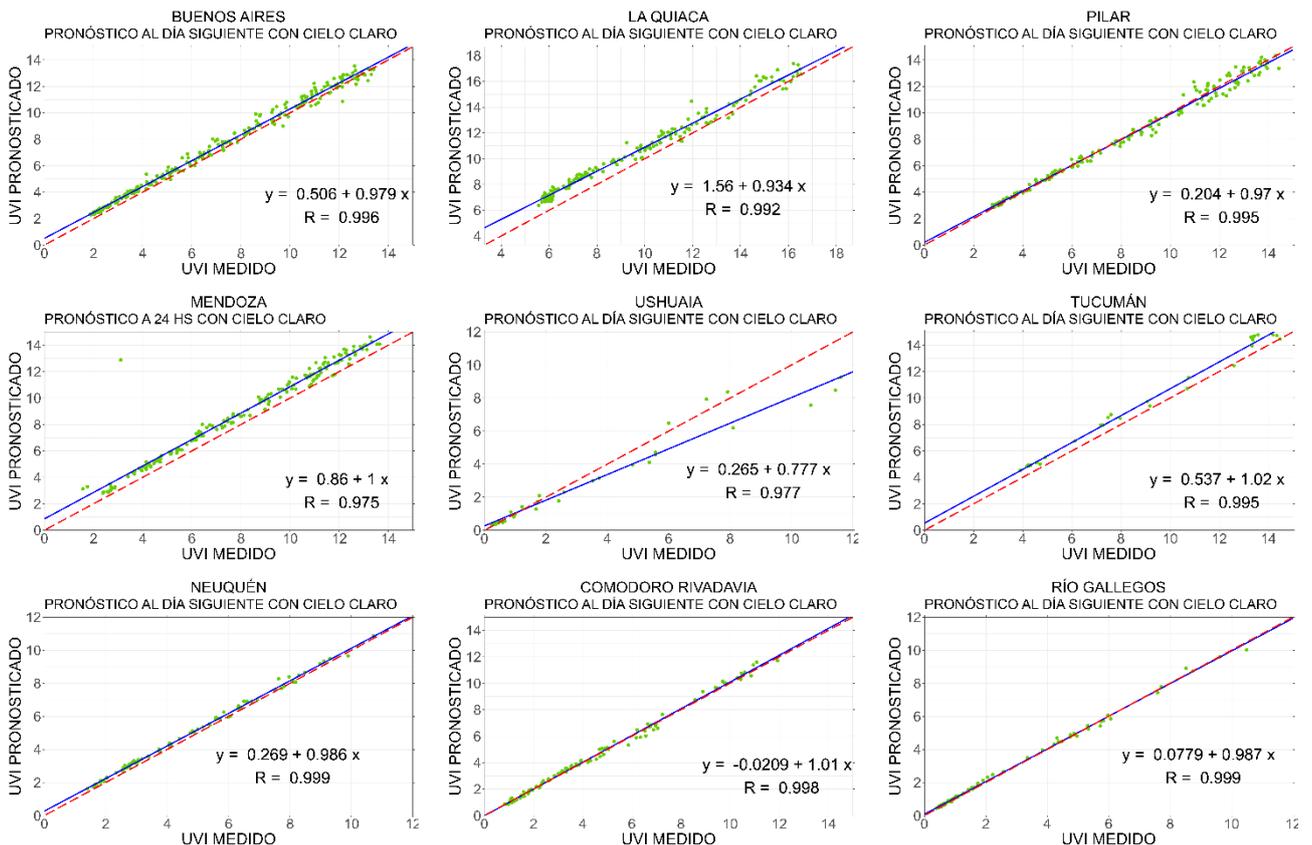


**Fig. 2.** Gráfico de dispersión entre pronóstico de UVI al día siguiente con nubosidad y mediciones para cada uno de los sitios de medición. La línea azul representa la recta de ajuste mientras que la línea roja punteada representa la recta  $y=x$ .

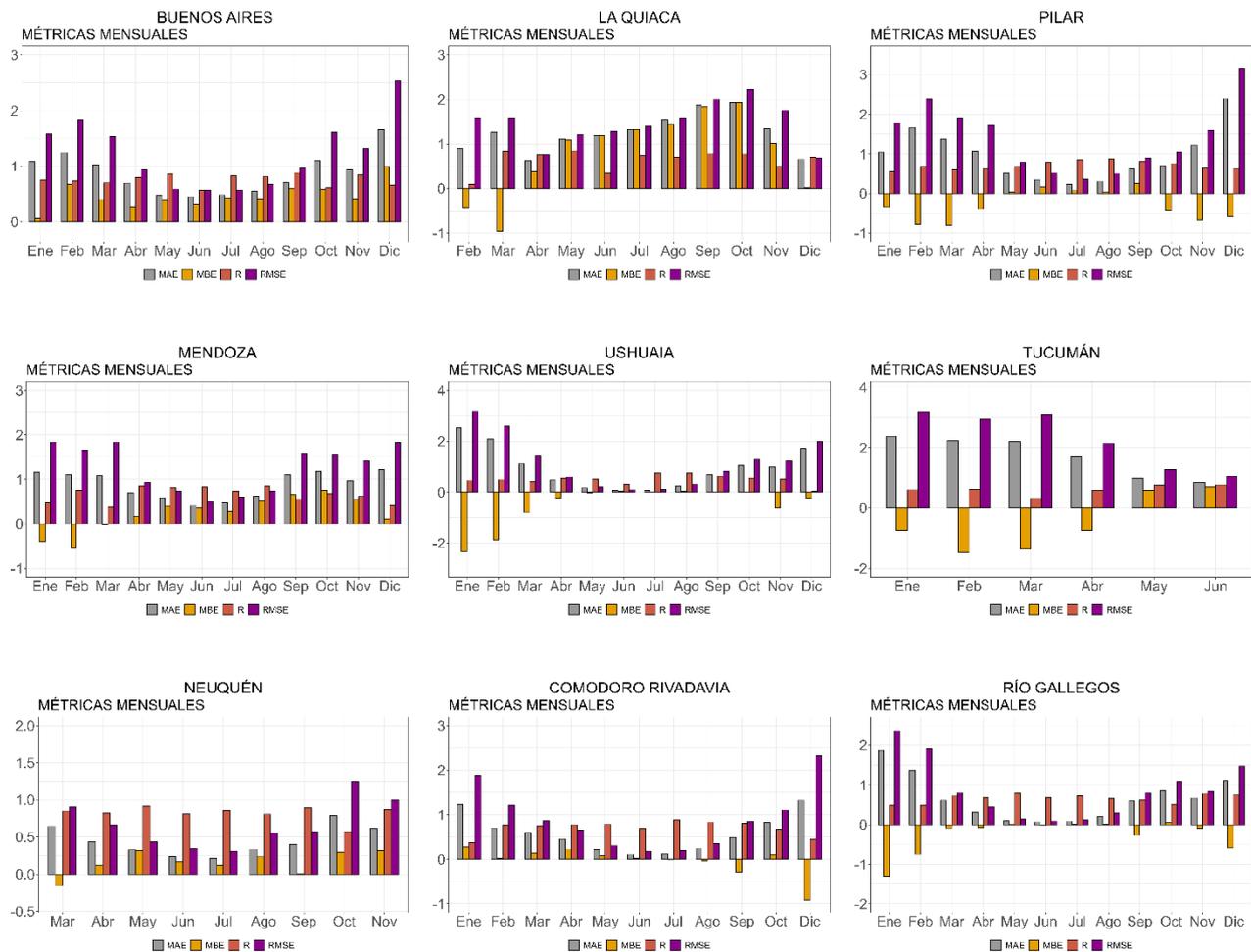
En términos generales, Ushuaia es el sitio que menor correspondencia presenta entre el pronóstico y la medición, alcanzando un RMSD de 52% bajo condiciones de nubosidad. Las dificultades a la hora de estimar radiación solar en Ushuaia son varias ya que se encuentra en una posición latitudinal en la que satélites geoestacionarios miden con errores considerables por problemas de paralaje. A su vez, la estación de Ushuaia se encuentra cerca del mar y de las montañas, con una superficie cubierta por nieve durante muchos meses del año. Otro sitio que presenta métricas por encima del resto bajo condiciones de nubosidad es Tucumán, sitio que se encuentra dentro de un valle, aunque sin superficie nevada por sus condiciones climáticas. Los tres sitios que, bajo condiciones de nubosidad, presentan un RMSD por encima de 30% tienen un MBE negativo, lo que muestra que tienden a subestimar los valores altos de UVI.

El resto de los sitios presentan RMSD similares a los encontrados en el trabajo de Orte y otros (2024) para el pronóstico danés NUV. Sin embargo, se debe tener en cuenta la diferencia en las metodologías de intercomparación entre datos pronosticados y datos medidos. En Pitkänen y otros (2020) los autores obtienen muy buenos resultados al evaluar el pronóstico de ECMWF contra mediciones en varios países para verano, lo que podría estar relacionado con la validación y adecuación del modelo fuera de Sudamérica. Teniendo en cuenta que el pronóstico de UVI provisto por ECMWF proviene de modelos numéricos del clima, las incertidumbres encontradas en este trabajo están dentro del rango encontrado incluso en otros parámetros radiativos (Teixeira-Branco y otros, 2021).

En la Fig. 2 se presentan los gráficos de dispersión de puntos junto con un ajuste lineal del pronóstico de UVI bajo condiciones de nubosidad en comparación con las mediciones para el pronóstico al día siguiente. En la misma puede verse que la recta de ajuste no se aleja demasiado de la recta con pendiente unitaria a excepción de Ushuaia, Río Gallegos y Tucumán, donde hay una gran dispersión. Por otro lado, la Fig. 3 presenta el mismo tipo de gráficos pero utilizando los puntos con mediciones de cielo claro. Puede verse que las rectas se ajustan mucho más entre ellas aunque, en muchos sitios, puede verse la sobreestimación del pronóstico al día siguiente teniendo en cuenta el comportamiento de las rectas.



**Fig. 3.** Gráfico de dispersión entre pronóstico de UVI al día siguiente bajo condiciones de cielo claro y mediciones para cada uno de los sitios de medición. La línea azul representa la recta de ajuste mientras que la línea roja punteada representa la recta  $y=x$ .



**Fig. 4.** Métricas absolutas para cada mes en cada sitio de medición.

La Fig. 4 muestra las métricas absolutas correspondientes a un análisis mensual de comparación entre el UVI pronosticado bajo todo tipo de cielo y medido en cada sitio. En términos generales se puede ver que la mayoría de los sitios presenta incertidumbres más grandes durante los meses de verano, que es cuando mayores son los valores de UVI y por lo tanto mayores pueden llegar a ser las diferencias. Asimismo, muchos de los sitios presentan subestimación durante los primeros meses del año para luego tener una sobreestimación del pronóstico en relación a las mediciones con excepción de Pilar, Río Gallegos y Ushuaia, donde se observan bastantes meses con subestimación en los meses siguientes. La sobreestimación general de los valores de UVI podría estar marcando dificultades en el modelo ECMWF para interpretar el efecto que la nubosidad supone en la radiación UV. Valores muy bajos de R se presentan en prácticamente todos los meses en Ushuaia y Tucumán, los cuales finalmente se reflejan en los resultados de la Tabla II. En la Fig. 5 se muestran las métricas mensuales pero esta vez relativas al valor medio de las mediciones.

En la Fig. 5 se observa que las incertidumbres relativas aumentan, en términos generales, hacia los meses de invierno, donde la radiación solar en superficie disminuye. Salvo en Pilar, La Quiaca y Neuquén, la mayoría de los meses en el resto de los sitios superan el valor de RMSD de 20%. A su vez, el valor de MAD(%) supera el valor 10 en casi todos los meses de cada sitio y su valor es relativamente similar al MBE(%) en Buenos Aires, y La Quiaca, lo que muestra una considerable sobreestimación de los valores pronosticados en relación a los medidos.

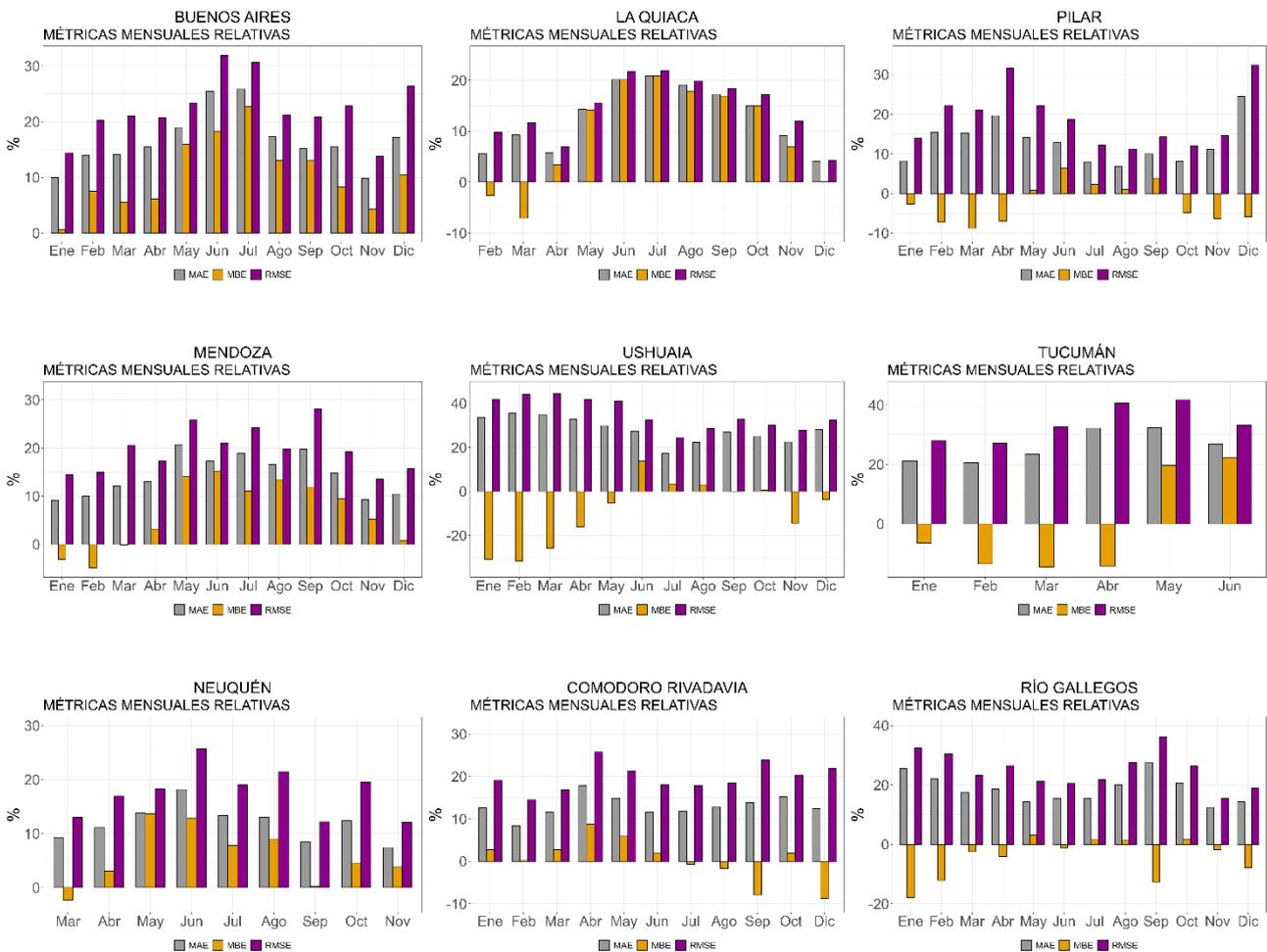


Fig. 5. Métricas relativas para cada mes en cada sitio de medición.

## 5. CONCLUSIONES

En esta nota técnica se presenta una comparación entre valores pronosticados al día siguiente por el modelo Copernicus-ECMWF para el índice UV considerando condiciones de cielo claro y nubosidad alrededor del mediodía solar y mediciones en superficie obtenidas en 9 sitios de Argentina, los cuales son operados por el SMN en colaboración con CITEDEF. Los datos considerados para la comparación abarcan el período 2022-2024 en casi todos los sitios, a excepción de Neuquén (solo 2023) y Tucumán (solo 2024).

Se encontraron valores de MBD entre -0.51 y 0.98, MAD entre 0.44 y 1.73, RMSD entre 0.72 y 2.44 y R entre 0.83 y 0.96 cuando se realizó la comparación entre las mediciones y el pronóstico al día siguiente en condiciones de nubosidad. Por otro lado, valores de MBD entre -0.47 y 0.91, MAD entre 0.09 y 0.93, RMSD entre 0.12 y 1.15 y R entre 0.975 y 0.999 cuando se realizó la comparación entre las mediciones y el pronóstico al día siguiente en condiciones de cielo claro.

El pronóstico a corto plazo (para el mismo día en cuestión) no arrojó resultados considerablemente mejores que el pronóstico al día siguiente bajo ambas condiciones de tipo de cielo, por lo que uno de los resultados más importantes de este trabajo es que el pronóstico al día siguiente es suficiente para tomar las medidas de prevención necesarias. Al analizar las métricas relativas al valor medio de las observaciones en condiciones

de nubosidad se encontró que Ushuaia es el sitio en el que peor desempeño mostró el modelo, alcanzando un RMSD(%) de 52.4% mientras que La Quiaca fue el sitio con mejor desempeño en cuanto al RMSD con un valor de 15.5%.

Cuando se analizaron las métricas en los diferentes meses del año se encontró una subestimación general en Rio Gallegos, Ushuaia, Pilar y Tucumán. El resto de los sitios presenta una sobreestimación de los valores de UVI para la mayoría de los meses.

En conclusión, el estudio confirma que el modelo ECMWF tiene una precisión aceptable en Argentina, aunque muestra limitaciones en la modelación de la nubosidad. Estos resultados apoyan el uso de pronósticos de UVI en campañas de concientización y prevención, destacando la importancia de mejorar la precisión del modelo en regiones con condiciones geográficas complejas.

## 6. REFERENCIAS

Cede, A., Blumthaler, M., Luccini, E., Piacentini, R.D., Nuñez, L., (2002). Effects of clouds on erythemal and total irradiance as derived from data of the Argentine Network. *Geophys. Res. Lett.* 29. <http://dx.doi.org/10.1029/2002GL015708>.

Clough S., Shephard M., Mlawer E., Delamere J., Iacono M., Cady-Pereira K., Boukabara S, Brown P. (2005). Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Volume 91, Issue 2, 2005, Pages 233-244, ISSN 0022-4073, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.05.058>.

Eskes, H., Tsikerdekis, A., Ades, M., Alexe, M., Benedictow, A. C., Bennouna, Y., Blake, L., Bouarar, I., Chabrillat, S., Engelen, R., Errera, Q., Flemming, J., Garrigues, S., Griesfeller, J., Huijnen, V., Ilić, L., Inness, A., Kapsomenakis, J., Kipling, Z., Langerock, B., Mortier, A., Parrington, M., Pison, I., Pitkänen, M., Remy, S., Richter, A., Schoenhardt, A., Schulz, M., Thouret, V., Warneke, T., Zerefos, C., and Peuch, V.-H.: Technical note: Evaluation of the Copernicus Atmosphere Monitoring Service Cy48R1 upgrade of June 2023, *Atmos. Chem. Phys.*, 24, 9475–9514, <https://doi.org/10.5194/acp-24-9475-2024>, 2024.

Hogan, R. J., & Bozzo, A. (2018). ecRad: A new flexible radiation scheme for the IFS. ECMWF Technical Memorandum. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).

Gueymard C. (2017). Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance, *Solar Energy*. 153. 755–765. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.004>.

Lefèvre M., A. Oumbe, P. Blanc, B. Espinar, B. Gschwind, Z. Qu, L. Wald, M. Schroedter-Homscheidt, C. Hoyer-Klick, A. Arola, A. Benedetti, J.W. Kaiser, J.-J. Morcrette, McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions, *Atmospheric Measurement Techniques*. 6 (2013) 2403–2418. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013>.

Luccini, E., A. Cede, R. Piacentini, C. Villanueva, and P. Canziani (2006), Ultraviolet climatology over Argentina, *J. Geophys. Res.*, 111, D17312, doi:10.1029/2005JD006580.

Luccini E., F. Orte, J. Lell, F. Nollas, G. Carbajal, E. Wolfram, (2022): Una revisión integral a la paleta de colores del Índice UV. Nota Técnica SMN 2022-127

Luccini, F. Orte, J. Lell, F. Nollas, G. Carbajal, E. Wolfram (2023): The UV Index color palette revisited, *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 15 100180, <https://doi.org/10.1016/j.jpap.2023.100180>.

Lusi A., Orte F., Alonso Suarez R., D'Elia R., Wolfram E., Evaluación de los modelos de radiación solar global Heliosat-4 y McClear en dos sitios de argentina. Vol. 34 Núm. 3 (2023): Anales AFA. <https://doi.org/10.31527/analesafa.2023.34.3.76>

Madronich, S. and Flocke, S., (1997). Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the earth's surface. In: Zerefos, C. S. and Bais, A.F. (Eds.) *Solar Ultraviolet Radiation: Modelling, Measurements, and Effects*. Berlin: Springer, pp. 23–48.

Madronich S., 2007: Analytic Formula for the Clear-sky UV Index. *Photochemistry and Photobiology*, pp. 83: 15371538.

Mckinlay AF, Diffey BL., 1987: A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. En: Passchier WR, Bosjanokovic BFM (Eds), *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations*. Elsevier, Amsterdam. 83-7.

Nollas F., P. F. Orte, E. Luccini, E. Wolfram, M. M. Poggi, y G. Carbajal, 2020: Información sobre radiación solar UV en Argentina como base para distintas aplicaciones. Nota Técnica SMN 2020-83.

Nollas, F., J. Lell, S. Papandrea, G. Hülsen, J. Gröbner, P. Orte, E. Luccini, G. Carbajal Benitez, E. Wolfram, 2023: Intercomparación de radiómetros uva y eritémicos, Argentina-2022. Nota Técnica SMN 2023-156.

Orte, F., Wolfram, E.; Salvador, J.; D'elia, R.; Paes Leme, N. y Quel, E., (2011). Synthesis of vitamin D and erythema irradiance obtained with a multiband filter radiometer and annual variation analysis in Río Gallegos, Argentina. *J. Phys.: Conf.Ser.*274012099, doi: 10.1088/1742- 6596/274/1/012099.

Orte F., Wolfram E., Luccini E., D' Elia R., Lusi A., Pallota J., Nollas F., Carmona F., Papandrea S., Cabezas M., Carbajal Benítez G., Mizuno A., (2022). Saver-Net UV-total solar irradiance monitoring network in Argentina. *Revista Meteorológica, Argentina*, 47(2), e016, julio-diciembre 2022; ISSN 1850-468X <https://doi.org/10.24215/1850468Xe016>

Orte F., Jønch-Sørensen H., Luccini E., Lusi A., D'Elia R., Nollas F., Wolfram E. (2024); Evaluation of the NUV forecast performance against ground-based measurements in Southern South America. *AIP Conf. Proc.* 18 2988 (1): 090010. <https://doi.org/10.1063/5.0185364>

Pitkänen M., Wandji W., Arola A. (2020). Validation Report of the CAMS UV processor. Ref: CAMS72\_2018SC2\_D72.2.1.1-2020Q4\_UV\_VAL\_202012\_v1. Disponible en: [https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/custom-uploads/EQC-solar/20\\_CAMS72\\_2018SC2\\_D72.2.1.1-2020Q4\\_UV\\_VAL\\_202012\\_v1.pdf](https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/custom-uploads/EQC-solar/20_CAMS72_2018SC2_D72.2.1.1-2020Q4_UV_VAL_202012_v1.pdf)

Reno M.J., Hansen C.W. (2016). Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements, *Renewable Energy*. 90 (2016) 520–531. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.031>.

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*.

Webb AR, Slaper H, Koepke P, Schmalwieser AW. Know your standard: clarifying the CIE erythema action spectrum. *Photochem Photobiol.* 2011 Mar-Apr;87(2):483-6. doi: 10.1111/j.1751-1097.2010.00871.x. Epub 2011 Jan 4. PMID: 21366601.

World Health Organization, United Nations Environment Programme & International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2002). *Índice UV solar mundial: guía práctica*. Organización Mundial de la Salud. <https://iris.who.int/handle/10665/42633>

## Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía ([rdelia@smn.gov.ar](mailto:rdelia@smn.gov.ar)), Luciano Vidal ([lvidal@smn.gov.ar](mailto:lvidal@smn.gov.ar)) o Martin Rugna ([mrugna@smn.gov.ar](mailto:mrugna@smn.gov.ar)) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo ([macevedo@smn.gov.ar](mailto:macevedo@smn.gov.ar)).