

## Artículo completo

## Ciencias Ambientales, Agroindustriales y de la Tierra

# Vapor de agua atmosférico calculado desde los productos troposféricos de SIRGAS y datos meteorológicos. Caso de estudio: Uruguay, período 2013-2022

## *Integrated water vapor calculated from SIRGAS tropospheric products and meteorological data. Study case: Uruguay, period 2013-2022*

Camisay, María Fernanda<sup>1,2,3</sup> ; Mackern, María Virginia<sup>1,2,3</sup> ; Mateo, María Laura<sup>1,2</sup> y Rosell, Patricia Alejandra<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Juan Agustín Maza. Facultad de Ingeniería y Enología; Argentina

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ingeniería; Argentina

<sup>3</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas; Argentina

DOI: <https://doi.org/10.59872/icu.v7i9.431>

Correo de correspondencia: [fernandacamisay@gmail.com](mailto:fernandacamisay@gmail.com)

Recepción: 21/06/2023; Aceptación: 07/12/2023;

Publicación: 20/12/2023

**Palabras claves:** Vapor de agua integrado; GNSS; retardo cenital troposférico; SIRGAS; observaciones meteorológicas

**Keywords:** IWV; GNSS; ZTD; SIRGAS; meteorological observations

### Resumen

SIRGAS, Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, nació como un proyecto colaborativo de diferentes países latinoamericanos, con el objetivo de establecer un único sistema de referencia con los mayores estándares de calidad. La realización actual de SIRGAS es una red de estaciones GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de funcionamiento continuo con coordenadas de alta precisión y sus cambios a través del tiempo (velocidades), denominada SIRGAS-CON. Por tal motivo esta red geodésica, y sus densificaciones nacionales, son utilizadas principalmente en la materialización de los marcos de referencia y en diversas actividades vinculadas a la agrimensura.

Así mismo, estas redes GNSS han ampliado su objetivo principal de brindar solución al posicionamiento preciso de puntos y están siendo utilizadas para analizar otros fenómenos del sistema Tierra, como por ejemplo para monitoreo atmosférico. En esta línea surge la técnica de estimación del vapor de agua integrado (IWV) desde los retardos cenitales troposféricos (ZTD), sobre la señal GNSS. La misma ha sido muy estudiada en las últimas dos décadas y está siendo utilizada en diferentes regiones como una importante herramienta de apoyo a otras ciencias orientadas a la investigación del clima, análisis meteorológico y pronóstico.

En este trabajo se presenta la estimación de las series de vapor de agua desde observaciones GNSS a partir de registros meteorológicos de temperatura y presión atmosférica, y su comparación con las series calculadas utilizando variables

atmosféricas desde el modelo de reanálisis ERA5. El caso de estudio se centra en 16 estaciones de la red uruguaya REGNA-ROU, para un período de 9 años (de enero de 2013 a junio de 2022), en algunos casos el período es menor en función de la disponibilidad de las estaciones meteorológicas. Se muestra también un análisis estadístico realizado sobre las variables meteorológicas utilizadas.

### Abstract

*SIRGAS, Geocentric Reference System for the Americas, is a collaborative project of different Latin American countries, with the aim of establishing a single reference system with the highest quality standards. The current realization of SIRGAS is a network of continuously operating GNSS (Global Navigation Satellite System) stations with high-precision coordinates and their changes over time (velocities), named SIRGAS-CON. For this reason, this network, and their national densifications, have been used mainly in the materialization of reference frames and many activities related to surveying.*

*Furthermore, GNSS networks have expanded their main objective of providing precise positioning solutions and are being used to analyze other phenomena of the earth system, such as atmospheric monitoring. In this line, the Integrated Water Vapor estimation technique (IWV) arises from tropospheric zenith delays (ZTD), on the GNSS signal. It has been widely studied in the last two decades and is being used in different regions as an important support tool for other sciences towards climate research, meteorological analysis, and forecasting.*

Cómo citar: CamisayM. F., MackernM. V., MateoM. L., & RosellP. A. (2023). Vapor de agua atmosférico calculado desde los productos troposféricos de SIRGAS y datos meteorológicos: Integrated water vapor calculated from sirgas tropospheric products and meteorological data. Study case: Uruguay, period 2013-2022. ICU. Investigación, ciencia y universidad, 7(9), 18-31. ecuperado a partir de <https://revistas.umaza.edu.ar/icu/article/view/431>

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons. Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



*This paper presents an estimation of the integrated water vapor series from meteorological observations, temperature and atmospheric pressure, and its comparison with those calculated using atmospheric variables from the ERA5 reanalysis model. The case study focuses on 16 stations of the Uruguayan REGNA-ROU network, for a period of 9 years, from January 2013 to June 2022, in some cases the period is shorter depending on the availability of meteorological stations. A statistical analysis carried out on the meteorological variables used is also presented.*

## 1. Introducción

La Geodesia, ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra, así como su campo de gravedad, ha incorporado a los sistemas globales de navegación satelital (GNSS) como una de sus técnicas principales para la determinación precisa de coordenadas en la superficie.

Inicialmente los receptores GNSS fueron utilizados para la determinación de redes geodésicas, realizando campañas de medición muy rigurosas, donde se ocupaban los sitios por varias horas de observación. A medida que se fueron instalando estaciones GNSS de observación continua fue posible, además, conocer cómo varía la posición de dichos sitios, determinando sus velocidades de desplazamiento, así como también se pudieron establecer marcos de referencia estables y consistentes entre los diferentes países.

En ese contexto SIRGAS, Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, nació como un proyecto colaborativo, con el objetivo de establecer un único sistema de referencia para los países americanos, con los mayores estándares de calidad. La realización actual de SIRGAS es una red de estaciones GNSS de funcionamiento continuo con coordenadas de alta precisión (asociadas a una época específica de referencia) y sus cambios a través del tiempo (velocidades de las estaciones), denominada SIRGAS-CON (<https://www.sirgas.org/es/sirgas-realizations/sirgas-con-network/>).

Por tal motivo la red SIRGAS-CON, y sus densificaciones nacionales, hace más de dos décadas que son utilizadas en la materialización de los marcos de referencia y en diversas actividades vinculadas a la agrimensura. En la actualidad no se concibe la existencia de un marco de referencia terrestre y sus densificaciones regionales sin la infraestructura geodésica de las estaciones permanentes GNSS, los centros de datos y los centros de análisis que procesan tal información. Así mismo, estas redes GNSS han ampliado su objetivo principal de brindar solución al posicionamiento preciso de puntos y están siendo utilizadas para analizar otros fenómenos del sistema Tierra, como por ejemplo para monitoreo geodinámico y atmosférico.

En esta línea surge la técnica indirecta de estimación del vapor de agua integrado (IWV) desde los retardos cenitales troposféricos (ZTD), sobre la señal GNSS [Davis, *et al.*, 1985]. La misma ha sido muy estudiada en las últimas décadas [Bevis *et al.*, 1992] y está siendo utilizada en diferentes regiones como una importante herramienta de apoyo a otras ciencias orientadas a la investigación del clima, análisis meteorológico y pronóstico.

Desde el 2014, SIRGAS ha implementado una estrategia para combinar los retardos troposféricos estimados por los diferentes centros de análisis, en sus rutinas operacionales semanales. Los parámetros cenitales obtenidos desde la combinación semanal que realiza el Centro de Análisis de Atmosfera Neutra, operado desde el Centro de Ingeniería Mendoza Argentina (CIMA), conformado por los investigadores de este trabajo, son considerados como «productos troposféricos finales de SIRGAS» [Mackern *et al.*, 2022], y se publican semanalmente (<https://sirgas.ipgh.org/n/products/tropospheric-delays/>).

Existen varios antecedentes referidos al uso de estaciones GNSS para la estimación de IWV en América del Sur. Bianchi *et al.* (2016) presentan la estimación del IWV medio y sus tendencias, basados en datos GNSS del 2007 al 2013, en más de cien estaciones SIRGAS-CON (estaciones SIRGAS de operación continua). Mackern *et al.* (2020), presentan la estrategia de cálculo de los productos finales de ZTD de SIRGAS y el cálculo de IWV desde tales productos y variables atmosféricas del modelo ERA-Interim, validando los mismos respecto a 10 sitios de radiosondeo distribuidos en América. Evaluando tales variables en Argentina, en Morichetti *et al.* (2018) se presentaron los primeros análisis del IWV, basados en la estimación del ZTD de SIRGAS, en 11 estaciones de la Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo (RAMSAC), desde la mirada comparativa de distintas zonas climáticas. Dichos resultados muestran el gran potencial que ofrece esta técnica, ya que permite conocer y monitorear en forma indirecta la variable atmosférica IWV, sin costos adicionales observacionales de instrumental.

Analizando aplicaciones de estos productos troposféricos, en Camisay *et al.* (2020), se muestra como la aparición de un aumento en los valores de IWV (anomalías positivas de IWV) precede a tormentas con abundante precipitación sobre el centro-oeste de Argentina. Este tipo de análisis ha contribuido al conocimiento de los factores atmosféricos involucrados en el desarrollo de procesos de convección regional, y cómo es posible aplicar este tipo de monitoreo en el desarrollo de planes de contingencia en la región.

En este trabajo se presenta la metodología de cálculo del IWV aplicada desde CIMA, utilizando los productos troposféricos finales de SIRGAS y su combinación con variables extraídas del modelo de reanálisis ERA5 [Hersbach *et al.*, 2020]. Se propone una metodología alternativa de cálculo del IWV, reemplazando los datos de ERA5, por registros de temperatura y presión atmosférica de estaciones meteorológicas de superficie (MET) y se comparan tanto las series de datos como de productos de IWV. El caso de

estudio se centra en 16 estaciones de la red GNSS uruguaya REGNA-ROU (<https://igm.gub.uy/geoportal/estaciones-3/>), para un período de 9 años, de enero de 2013 a diciembre de 2021.

En el ítem 2 se exponen las variables y la metodología utilizadas. En el ítem 3 se presentan los resultados obtenidos de un análisis estadístico sobre las variables meteorológicas y sus correspondientes series de vapor y su validación. Se presentan los valores medios mensuales del iww estimados en cada estación. Finalmente, en el ítem 4 se presentan las conclusiones.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Datos

#### 2.1.1 Retardos troposféricos finales de SIRGAS

Los productos troposféricos finales de SIRGAS ( $ZTD_{SIR}$ ) fueron utilizados para calcular el vapor de agua integrado, en 16 estaciones de Uruguay (Fig. 1, círculos amarillos), siguiendo la metodología desarrollada por CIMA, descrita en Rosell *et al.* (2023).

Estos retardos cenitales totales son estimados en las rutinas semanales de cálculo de los centros de procesamiento SIRGAS, bajo los mayores estándares de calidad. Se utilizan los productos finales IGS (International GNSS Service) para orbitas y parámetros de orientación terrestre. Se emplea como modelo troposférico a priori y función de mapeo, el *Global Mapping Function GMF* a nivel de pre-procesamiento y luego el modelo de Viena VMF y sus grillados (Boehm *et al.* 2006). Mayor detalle de software utilizado y método puede consultarse en Mackern *et al.* (2020).

Los  $ZTD_{SIR}$  correspondientes a las estaciones seleccionadas (Tabla 1) fueron descargados desde el sitio oficial de productos de SIRGAS para el período de estudio de 9 años.

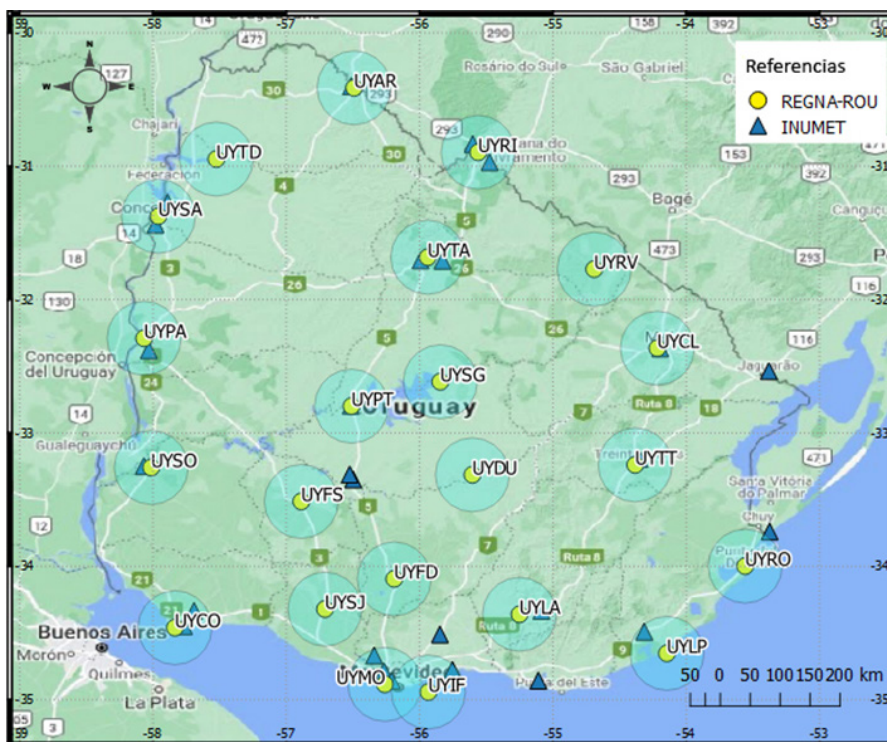


Figura 1: Zona de estudio, estaciones GNSS (círculos amarillos), zona de cercanía 30 km (círculos celestes) y estaciones meteorológicas (triángulos azules).

#### 2.1.2 Registros meteorológicos de temperatura y presión atmosférica

Se solicitaron al Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) los registros horarios de las estaciones meteorológicas (MET) que fueron seleccionadas por cercanía a las estaciones GNSS, se adoptó una distancia máxima 30 km (ver círculos celestes, Fig. 1). En la Tabla 1 se detallan las estaciones GNSS de REGNA-ROU consideradas en este estudio, sus coordenadas geodésicas, y la nomenclatura (según INUMET) de la estación meteorológica seleccionada. En el nomenclador de las estaciones MET, las que se encuentran indicadas con «G3» corresponden a estaciones automáticas. El resto de las estaciones MET son estaciones convencionales (la lectura de sus registros depende de un operador local). La estación EMA-CHUI pertenece a la red brasileña INMET (Instituto Nacional de Meteorología). Se ha enunciado también la distancia a la estación GNSS a la cual le corresponden los parámetros troposféricos utilizados,  $ZTD_{SIR}$ .

Tabla 1: Estaciones GNSS y MET utilizadas en el estudio

EST. GNSS	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura (m)	EST. MET	Dist. (km)	Disponibilidad		
						Desde	Hasta	Años
UYMO	-34.88832	-56.25988	158.09	Prado	5	1/1/2013	31/12/2021	9
UYLP	-34.65570	-54.14210	20.12	Rocha	23	1/1/2013	31/12/2021	9
UYFS	-33.51598	-56.88690	165.53	Durazno	34	1/1/2013	31/12/2021	9
UYSO	-33.26126	-58.01362	80.76	Mercedes	5	1/1/2013	31/12/2021	9
UYIF	-34.94599	-55.93275	55.9	Carrasco	14	1/1/2013	31/12/2021	9
UYPA	-32.29125	-58.06719	71.85	Paysandú G3	10	1/1/2013	31/12/2021	9
UYCO	-34.46299	-57.83538	49.33	Colonia G3	6	6/11/2014	31/12/2021	7
UYSA	-31.37517	-57.95978	79.04	Salto G3	7	14/07/2016	31/12/2021	5
UYPT	-32.80056	-56.50982	91.12	Paso de los Toros G3	0.6	14/07/2016	31/12/2021	5
UYRO	-34.00101	-53.55483	58.98	EMA-CHUI	33	16/08/2016	31/12/2021	5
UYTT	-33.24130	-54.38036	68.94	Treinta y Tres G3	6	4/12/2019	31/12/2021	2
UYTA	-31.68307	-55.93753	186.99	Tacuarembó G3	5	4/12/2019	31/12/2021	2
UYRI	-30.89576	-55.55911	251.58	Rivera G3	11	27/04/2020	31/12/2021	1.5
UYLA	-34.36278	-55.24879	148.35	Lavalleja G3	15	30/07/2020	31/12/2021	1.5
UYCL	-32.36574	-54.21403	134.67	Melo G3	2	1/10/2020	31/12/2021	1
UYAR	-30.41175	-56.49068	146.46	Artigas G3	2	8/10/2020	31/12/2021	1

Obtenidos los registros meteorológicos, se generó un archivo por estación que contiene presión atmosférica (P) en hPa, referida al nivel medio del mar y temperatura (Tem) del aire al abrigo meteorológico en °C, medida a 1,50 m de la superficie del terreno donde se encuentra cada estación.

Dado que los registros de INUMET originales tenían la referencia de tiempo en fecha gregoriana (año, mes, día) y hora local (UTC-3), para el cálculo de las series de vapor fue necesario transformarlos a año y décima de año, y la hora fue referida a Tiempo Universal Coordinado (UTC), aplicando Hora local + 3hs. En la Tabla 1 se sintetiza la disponibilidad de datos por cada estación, utilizados en este trabajo.

2.2 Análisis de los registros meteorológicos

2.2.1 Determinación de valores medios, máximos, mínimos y outliers

Se determinaron para cada estación y cada variable, el valor medio, máximo y mínimo (Fig. 2 y Fig. 3), considerando la muestra completa del período estudiado. El objetivo de este primer análisis fue detectar valores anómalos o atípicos.

Se obtuvieron para las 16 estaciones analizadas valores similares, lo cual responde a que las mismas se encuentran en una región climática similar, correspondiente a clima templado conforme a Peel *et al.* (2007).

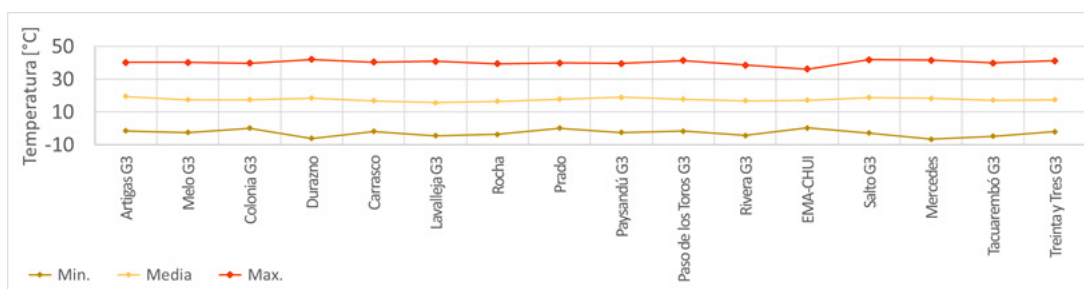


Figura 2: Temperaturas máximas, medias y mínimas por estación MET.

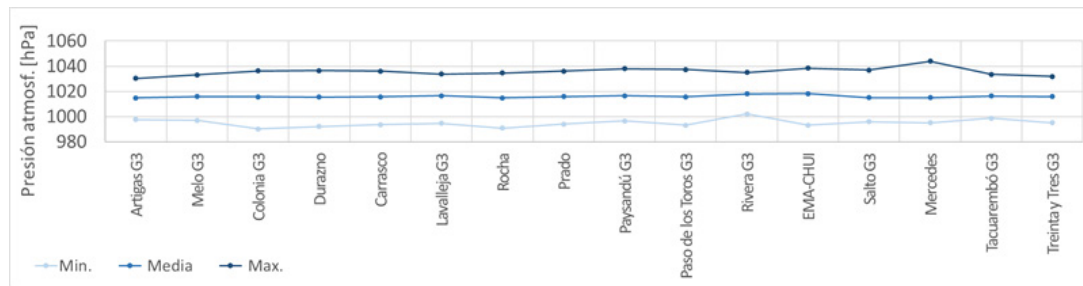


Figura 3: Presión atmosférica máxima, media y mínima por estación MET.

Comparando los indicadores estadísticos de P (Fig. 3) se identificaron dos posibles valores anómalos. En la estación de Rivera G3 la P mínima (1001.9 hPa) es un poco mayor que los mínimos del resto de las estaciones (Pmin promedio=995.0 hPa) y en la estación Mercedes, el valor de P máximo (1044 hPa) es un poco mayor que el máximo del resto de las estaciones (Pmax promedio= 1035.7 hPa).

Para estas dos estaciones mencionadas se procedió a realizar un análisis más detallado de los datos, para ambas variables meteorológicas, como también la detección y filtrado de valores atípicos o outliers. Se utilizó el método estadístico de diagrama de cajas por cuartiles (boxplot). En el diagrama, la caja comienza en el primer cuartil Q1 (25%) y termina en el tercero Q3 (75%), por lo que la misma representa el 50% de los datos centrales. La línea central de la caja es la mediana Q2 (50%). Se consideran outliers aquellos valores menores al bigote inferior ( $Q1 - 1,5 * IRQ$ ) o mayores al bigote superior ( $Q3 + 1,5 * IRQ$ ), siendo IRQ el rango intercuartil ( $Q3 - Q1$ ).

En la estación Rivera G3, el valor mínimo de P fue detectado como outlier, al igual que en la estación Mercedes, el valor máximo de P. En la Tabla 2 se detallan los indicadores estadísticos resultantes y la cantidad de valores que fueron excluidos. En ambos casos el porcentaje de valores excluidos no superó el 0.5% con respecto al total de observaciones.

Tabla 2: Elementos descriptivos del Diagrama de cajas, sobre las estaciones Mercedes y Rivera G3, que presentaron valores muy alejados (considerados Outliers).

	Mercedes Tem	Rivera G3 Tem	Mercedes P	Rivera G3 P
Q1-1.5*IRQ	-2.3	-2.2	998.1	1003.0
Q2	18.4	17.0	1014.5	1017.7
Q3+1.5*IRQ	39.0	36.2	1031.2	1032.5
Observaciones	67663	19108	67663	19108
Outliers	115	73	351	46
% de Outliers	0.2	0.4	0.5	0.2

### 2.2.2 Análisis de variabilidad anual

Para poder conocer un poco más sobre la variabilidad anual de estos parámetros meteorológicos en la región de estudio, se calcularon valores promedio mensuales de Tem y P, para cada estación, considerando el total de la serie. Se utilizaron librerías de estadística del lenguaje R. Se muestran a modo de ejemplo los valores medios mensuales de Tem (Fig. 4) y de P (Fig. 5), correspondientes a las estaciones Artigas G3 (al Norte del área de estudio), Prado (al Sur), EMA-CHUI (al Este) y Paysandú G3 (al Oeste). Se pueden apreciar en ambas variables, una similitud en todas las estaciones, tanto en el ciclo anual como en la amplitud del mismo.

El máximo de Tem (mínimo de P) se observa en los meses de verano (diciembre, enero, y febrero) y los mínimos de Tem (máxima de P) en los meses de invierno (junio, julio y agosto). Resultando 13 °C la amplitud media anual de Tem, calculada como la diferencia entre los valores máximo (24 °C) y mínimo (11 °C) promedio para las 16 estaciones consideradas en este estudio.

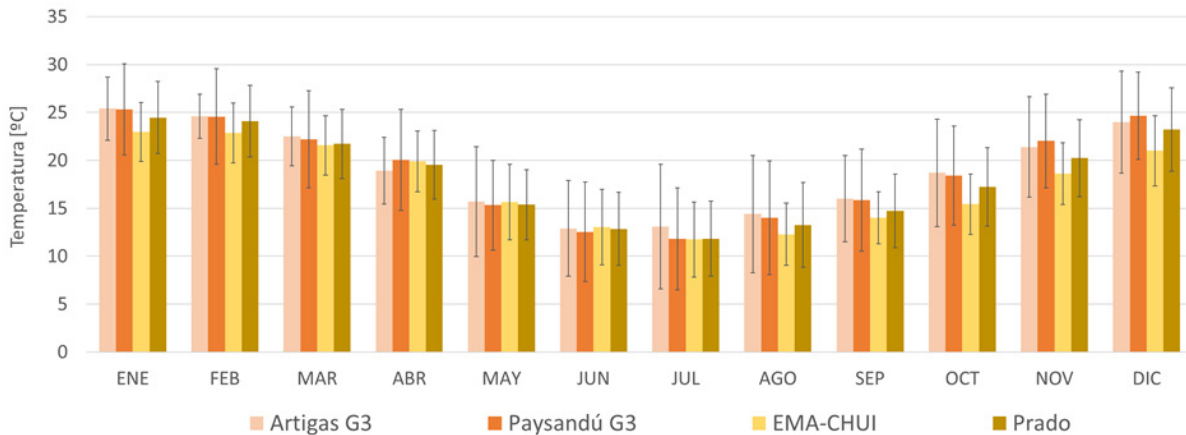


Figura 4: Valores medios mensuales de temperatura y desvío estándar [°C].

La amplitud media anual de P resultó en 8 hPa, diferencia entre el máximo (1020 hPa) en julio y mínimo (1012 hPa) en enero.

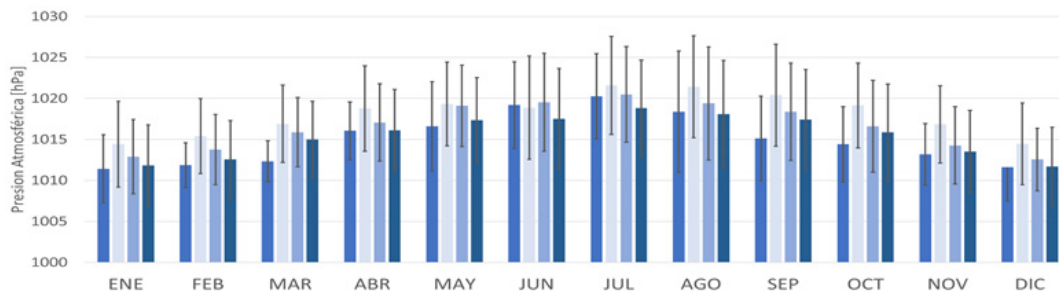


Figura 5: Valores medios mensuales de Presión atmosférica y desvío estándar [hPa].

Se calcularon también los desvíos estándar por mes en cada estación, como un indicador de la variabilidad diaria (ver barras de error en Fig. 4 y 5). Para el caso de la Tem las estaciones presentaron un desvío estándar mensual entre 3 y 6 grados (entre el 1 y 2 % del valor medio de Tem), siendo este un indicador de la amplitud térmica en la región. Resultando los máximos valores de amplitud térmica, en los meses de invierno (julio y agosto) y de verano (diciembre y enero). Para el caso de la P el desvío estándar mensual, resultó variable entre 3 y 7 hPa (0,4 al 0,6 % del valor medio de P), correspondiendo los máximos desvíos a los meses de invierno (junio, julio y agosto).

2.2.3 Comparación de los registros meteorológicos con datos de ERA5

Un control externo de los datos de Tem y P se realizó utilizando las correspondientes variables extraídas del modelo de reanálisis ERA5 disponibles desde Copernicus Climate Data Store (<https://cds.climate.copernicus.eu/>), el cual dispone de una resolución temporal horaria y espacial de 30 km. En este caso se dispuso, para la ubicación de cada una de las estaciones GNSS, los valores de ambas variables, en el periodo analizado. Los datos del modelo ERA5, se extrajeron desde el correspondiente nodo (del modelo) más cercano a la estación GNSS (no se realizaron interpolaciones). La posición de las estaciones es la indicada por las coordenadas especificadas en la Tabla 1. Las variables empleadas del reanálisis ERA5 fueron «2m temperature» (designada  $T_{m, ERA5}$ ) y «Mean sea level pressure» (designada  $P_{ERA5}$ ), ver Tabla 3. Estos datos se extrajeron del producto «ERA5 hourly data on single levels from 1950 to present» (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>)

Tabla 3: Descripción de los parámetros extraídos del reanálisis ERA5.

Variable	Descripción
2m temperature	Es la temperatura del aire a 2m sobre la superficie de la tierra o mar. Es calculada por interpolación entre el modelo de nivel más bajo y la superficie de la Tierra, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas.  Está expresado en (K), la cual se puede convertir a grados Celsius (°C) sustrayendo 273.15°.

Mean sea level pressure

Es la presión de la atmósfera en la superficie de la Tierra, ajustada a la altura del nivel medio del mar.

Los mapas de este parámetro son utilizados para identificar sitios de baja o alta presión en sistemas meteorológicos, como ciclones y anticiclones. Las curvas de esta variable también indican la fuerza del viento (mientras más cercanas están las curvas de P se relaciona con vientos más fuertes).

La unidad en que se expresa es el hPa (1 hPa = 1 mb = 100 Pa).

Dado que no se disponía de la totalidad de datos en las estaciones MET, la comparación de variables se pudo realizar para las épocas que disponían de datos tanto en las estaciones MET (Tabla 1) como de ERA5.

Se calcularon las diferencias para cada variable, y se expresaron como diferencia relativa porcentual con respecto al valor medio mensual ( $Tem_{Mensual}$ ,  $\bar{P}_{Mensual}$ ) hallado para cada estación (Ec. 1 y 2). La Tem de estaciones MET, fue transformada a Kelvin ( $^{\circ}C+273.15$ ).

$$Ec. 1 \quad Dif\_Tem_{\%} = \frac{(Tem_{MET} - Tem_{ERA5}) \cdot 100}{Tem_{Mensual}}$$

$$Ec. 2 \quad Dif\_P_{\%} = \frac{(P_{MET} - P_{ERA5}) \cdot 100}{\bar{P}_{Mensual}}$$

Finalmente se determinó un valor medio de las diferencias relativas para cada estación (bias) y se estimó su correspondiente error medio cuadrático (RMS) tanto para la comparación de Tem (Fig. 6) como de P (Fig. 7).

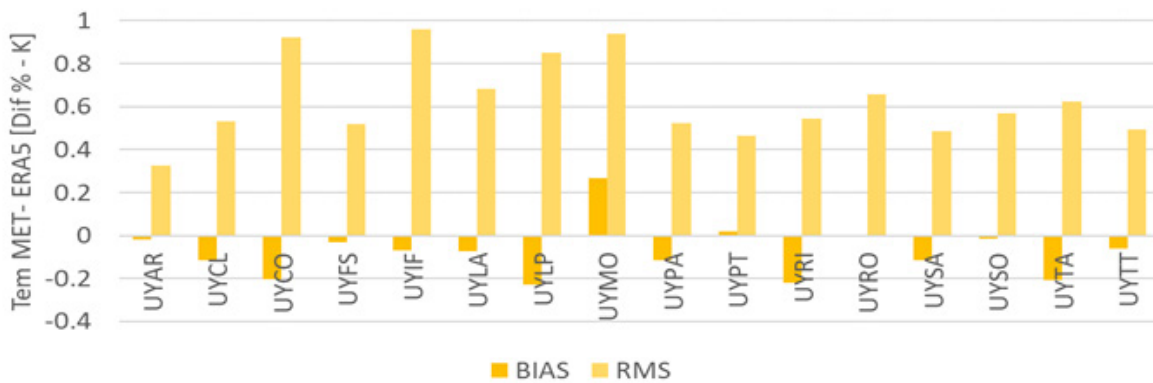


Figura 6: Diferencias relativas porcentuales de temperatura MET-ERA5.

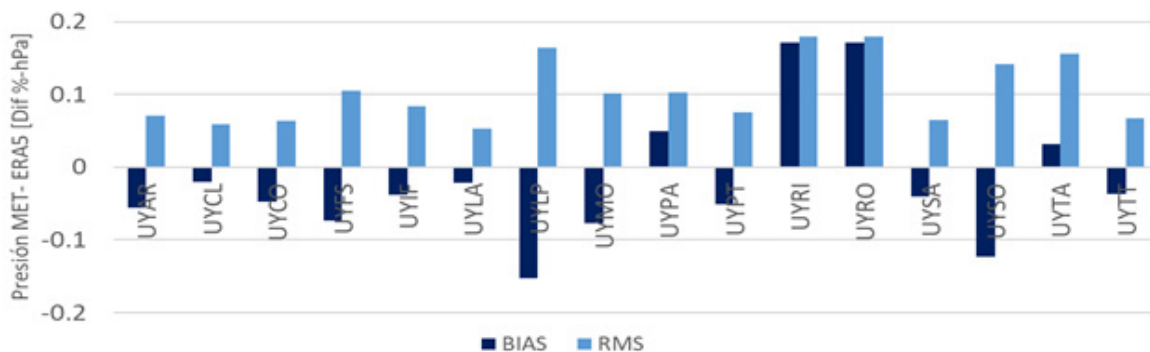


Figura 7: Diferencias relativas porcentuales de presión atmosférica MET-ERA5.

De la comparación de P, no se observaron diferencias (bias) significativas en ninguna de las estaciones. Las máximas diferencias encontradas en UYLP, UYRI, UYRO y UYSO, fueron inferiores al 0,18 %. La variabilidad de las diferencias (RMS) fue muy similar en todas las estaciones y no alcanzó a superar el 0,2%.

En la comparación de  $T_m$ , se observaron diferencias (bias) un poco más grandes, aunque en valores promedios por estación no resultaron significativas en ninguna de las estaciones. La máxima diferencia positiva (0,22 %) se observó en UYMO, mientras que las mínimas se encontraron en UYCO, UYLP, UYRI y UYTA, y fueron inferiores al -0,26 %. La variabilidad de las diferencias (RMS) en  $T_m$ , fue un poco mayor que en  $P$ , aunque no alcanzó a superar el 0,96% de la variable (siendo en 12 estaciones inferior al 0,6%).

A partir de este análisis, con control externo desde el modelo ERA5, como desde el control interno desde el análisis estadístico realizado, se pudo concluir que los registros MET disponibles para las 16 estaciones de la red INUMET seleccionadas, en general presentan muy pocos valores anómalos (los cuales fueron filtrados para el período utilizado). Por lo cual se decidió utilizarlos en el cálculo del IWV en cada estación y época donde se dispone del retardo cenital troposférico.

### 2.3 Cálculo del Vapor de Agua Integrado (IWV)

A partir de los productos finales de SIRGAS ( $ZTD_{SIR}$ ) se calculó el IWV, en las estaciones GNSS seleccionadas (Fig. 1, círculos amarillos). Se aplicó el método de cálculo descrito en Rosell *et al.* (2023).

Cabe aclarar que el retardo cenital total (ZTD) viene determinado por la integral del índice de refracción del medio troposférico, a lo largo del camino recorrido por la señal GNSS. Hopfield, descompone la refractividad  $N$  en una componente seca (*dry*) y una componente húmeda (*wet*), donde la parte seca se debe a la atmósfera hidrostática y la parte húmeda al vapor de agua (Berné Valero J.L. *et al.*, 2014). Luego el ZTD, suele descomponerse en el retardo cenital seco o hidrostático (ZHD), y el retardo cenital húmedo (ZWD).

Fue necesario disponer de la presión ( $P_{GNSS}$ ) referida a la altura de la estación GNSS ( $h_{GNSS}$ ), para realizar el cálculo de la componente hidrostática del retardo (ZHD), Ec. 3.

$$Ec. 3 \quad ZHD = 0,002276738 \cdot \frac{P_{GNSS}}{1 - 0,00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0,28 \cdot 10^{-6} \cdot h_{GNSS}}$$

La reducción de  $P$  desde la superficie de referencia al nivel de la altura elipsoidal de la estación GNSS, se realizó según Berg (1948), Ec. 4.

$$Ec. 4 \quad P_{GNSS} = P_{ref} * (1 - 0,0000226 \cdot (h_{GNSS}))^{5,225}$$

Otra variable requerida es la temperatura media de la columna atmosférica ( $T_m$ ), la cual se calculó utilizando la expresión de Mendes (1999) en función de la Temperatura de superficie,  $T_s$  (Ec. 5), expresada en Kelvin (K).

$$Ec. 5 \quad T_m = 50,4 + 0,789 T_s$$

Finalmente se calculó el factor de proporcionalidad ( $\Pi$ ) el cual multiplicado por la componente húmeda del retardo (ZWD), obtenida de sustraer ZHD al retardo cenital total, permitió obtener los correspondientes valores de IWV (Ec. 6).

$$Ec. 6 \quad IWV = \Pi \cdot ZWD = \Pi \cdot (ZTD - ZHD)$$

Reemplazando en la Ec 6, con las expresiones anteriores, se obtiene la relación completa de la Ec. 6.

$$IWV = \frac{10^5}{(22,9744 + \frac{375463}{T_m}) \cdot 0,4614991785} (ZTD - 0,002276738 \cdot \frac{P_{GNSS}}{1 - 0,00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0,28 \cdot 10^{-6} \cdot h_{GNSS}})$$

En la cual, se requirió como dato para el cálculo del IWV por cada época ( $t_i$ ), el  $ZTD_i$ , la  $P_{GNSS_i}$  y el correspondiente valor de  $T_{s_i}$ .

Estos parámetros se calcularon utilizando los datos de las estaciones MET y paralelamente se trabajó con las variables del modelo ERA5 para su validación. En los ítems siguientes se describen ambos cálculos.

## 3 Resultados

### 3.1 Vapor de Agua Integrado utilizando registros meteorológicos

Se obtuvieron las series de IWV, aplicando la Ec. 6 a los  $ZTD_{SIR}$  y utilizando como insumos los datos de  $T_m$  y  $P$  de las estaciones MET seleccionadas por cercanía a la correspondiente estación GNSS (Tabla 1). Estas variables fueron descritas en el ítem 2.1.2. Se obtuvo de esta forma las series temporales de  $IWV_{MET}$  en las 16 estaciones, como un primer resultado.

El limitante en este caso fue la disponibilidad de registros desde las estaciones MET (Tabla 1). Considerando que para el período de 9 años se disponía de una cantidad  $N$  de valores de  $ZTD_{SIR}$  para cada estación, se cuantificó en porcentajes con respecto a dicho tamaño muestral, la cantidad de parámetros  $IWV_{MET}$  determinados por cada estación (Tabla 4).



Tabla 4: Cantidad porcentual de parámetros  $IWV_{MET}$  con respecto a la cantidad muestral de parámetros troposféricos  $ZTD_{SIR}$  disponibles.

Disponibilidad de $IWV_{MET}$	Cantidad de estaciones
menos del 50 %	9
entre el 50 y el 75 %	4
entre el 75 y el 100 %	3

En la Figura 8, se muestran a modo de ejemplo, las series de  $IWV_{MET}$  (color azul) obtenidas en las 4 estaciones REGNA-ROU (UYAR, UYMO, UYRO y UYPA) localizadas en los extremos cardinales de la red uruguaya. Se puede apreciar como en el caso de UYAR sólo se disponen de valores de  $IWV_{MET}$  desde octubre del 2020 y en el caso de UYRO desde agosto del 2016 (limitados por la disponibilidad de registros MET).

### 3.2 Vapor de Agua Integrado utilizando valores de ERA5

Se obtuvieron para validación los valores de  $IWV$ , calculados aplicando la Ec.6 a los  $ZTD_{SIR}$  y utilizando como insumos los datos de  $T_{em}$  y  $P$  del reanálisis ERA5 descriptas en el ítem 2.2.3. A estos parámetros se los denominó  $IWV_{ERA5}$ . Se dispuso de esta forma de las series temporales para el período de 9 años (2013-2021).

En la Figura 8, se muestran a modo de ejemplo las series de  $IWV_{ERA5}$  (color rojo), para las mismas cuatro estaciones. Cabe mencionar que en este caso siempre se dispone de los valores de  $T_{em}$  y  $P$ , dado que su origen es un modelo. La falta de valores de  $IWV$ , en este caso, es consecuencia de faltantes del producto troposférico  $ZTD_{SIR}$ .

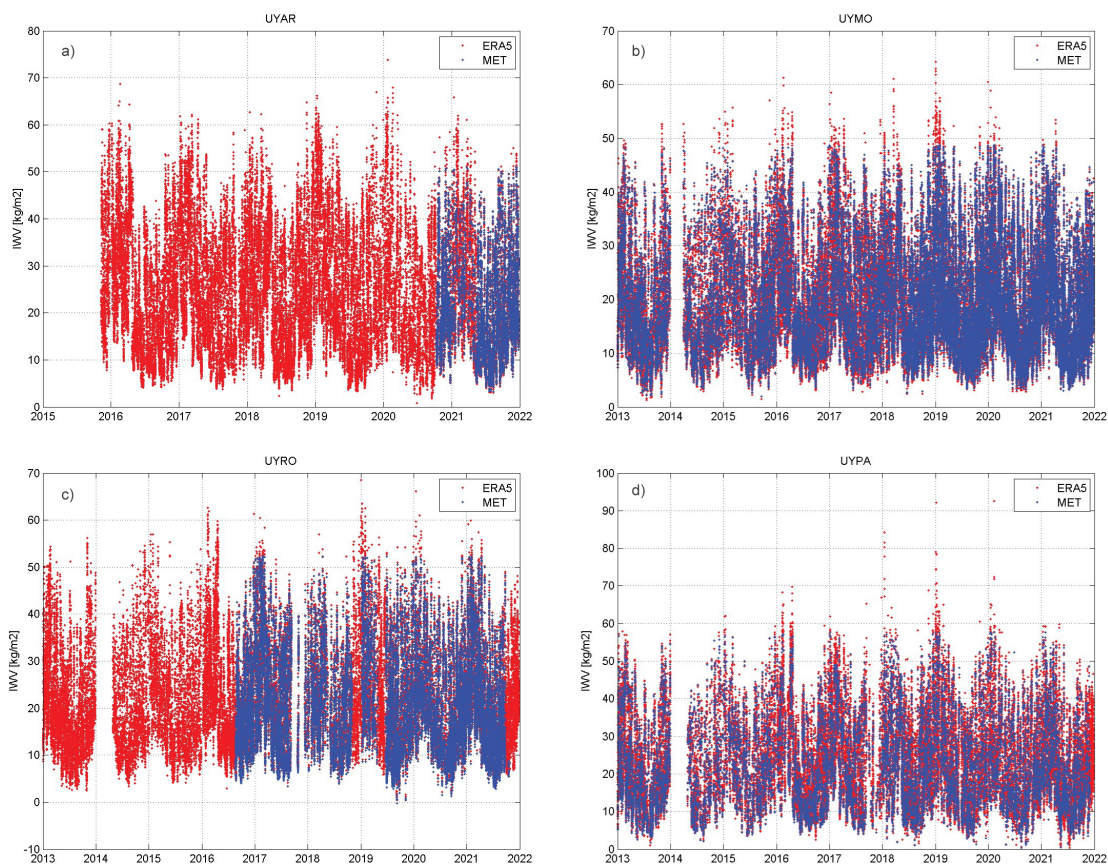


Figura 8:  $IWV_{MET}$  (azul) e  $IWV_{ERA5}$  (rojo). a) estación UYAR (localización Norte), b) estación UYMO (localización Sur), c) estación UYRO (localización Este) y d) estación UYPA (localización Oeste).

### 3.3 Validación del iwv obtenido desde registros meteorológicos

Considerando que los valores de  $IWV_{ERA5}$  han sido validados con respecto a estaciones de radiosondeo en diferentes regiones de América Latina (Mackern *et al.*, 2020), se tomaron como «valores de control», para evaluar los nuevos productos  $IWV_{MET}$  obtenidos en esta investigación. Se calcularon las diferencias del iwv para cada una de las épocas comunes (Ec. 7) del total del periodo.

$$Ec. 7 \quad Dif\_IWV_{MET-ERA5} = IWV_{MET} - IWV_{ERA5}$$

Se calculó el valor medio de las diferencias (bias) en cada estación y su correspondiente error medio cuadrático (RMS) (Fig. 9). En promedio, las diferencias resultaron ser menores que 0,5 kg/m<sup>2</sup> (en el 88% de las estaciones). En las estaciones UYRI y UYRO se determinó un bias negativo más significativo (-0,66 y -0,63 kg/m<sup>2</sup> respectivamente), el cual equivale al 3 % del valor medio de iwv (21,3 kg/m<sup>2</sup>) en tales ubicaciones. Respecto al RMS de las diferencias se determinó un valor medio de 0,4 kg/m<sup>2</sup>, resultando las mismas estaciones con un RMS un poco mayor que el resto (0,7 kg/m<sup>2</sup>).

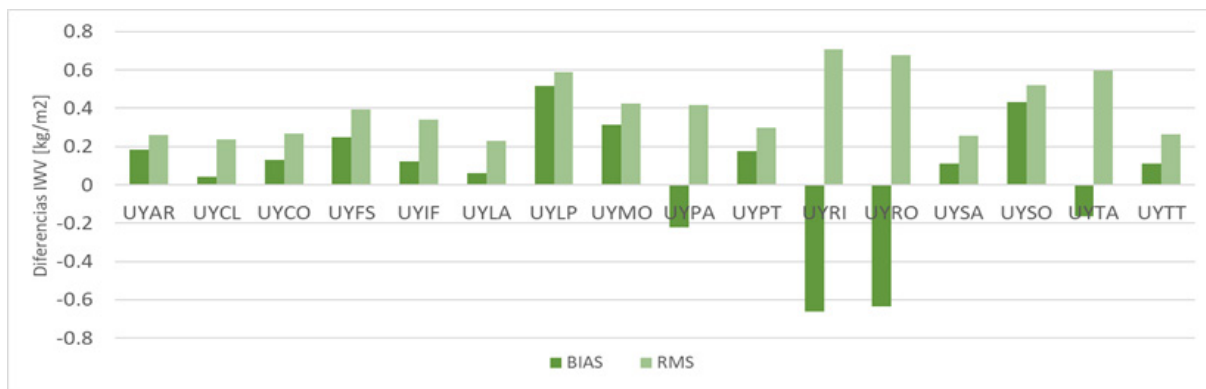


Figura 9: Valores medios (bias) y RMS de las diferencias  $IWV_{MET} - IWV_{ERA5}$

Se realizó también un análisis de las diferencias máximas y mínimas encontradas a lo largo de todo el periodo estudiado, resultando valores similares en todas las estaciones (Fig. 10). La diferencia mayor, en valor absoluto, se registró en la estación UYPA (-7 kg/m<sup>2</sup>), pero en las restantes 15 estaciones resultó menor a ±5 kg/m<sup>2</sup>.

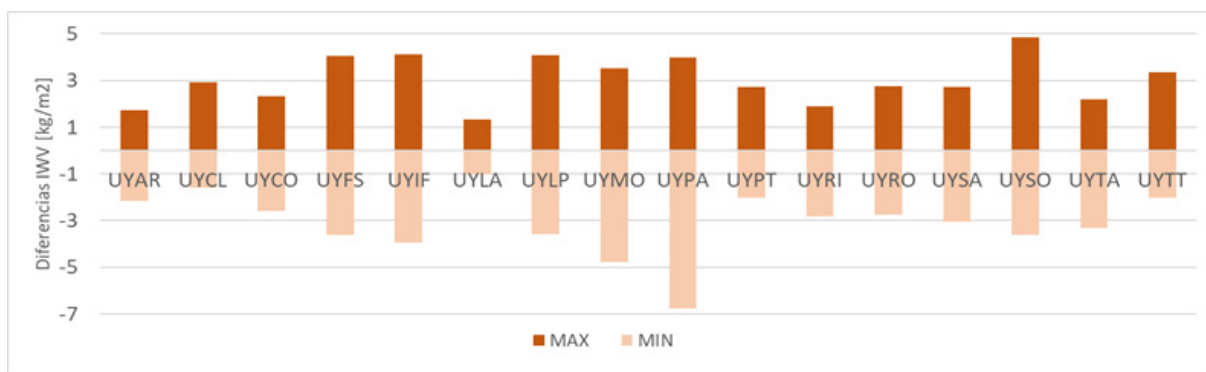


Figura 10: Máximos y mínimos de las diferencias  $IWV_{MET} - IWV_{ERA5}$

Analizando la variabilidad de las diferencias, las mismas se mantienen relativamente constantes durante todo el período. No se aprecia un efecto sistemático dado por la influencia de la época del año.

Dado que las mayores diferencias del iwv, se encontraron en las estaciones UYRI, UYRO y UYPA, se decidió analizarlas en detalle. En la estación UYPA (Fig. 11) se observa el valor mínimo de -6,75 kg/m<sup>2</sup>, resultando las demás diferencias en su mayoría entre ±1 kg/m<sup>2</sup>. Resultados similares se obtuvieron en UYRI y UYRO.

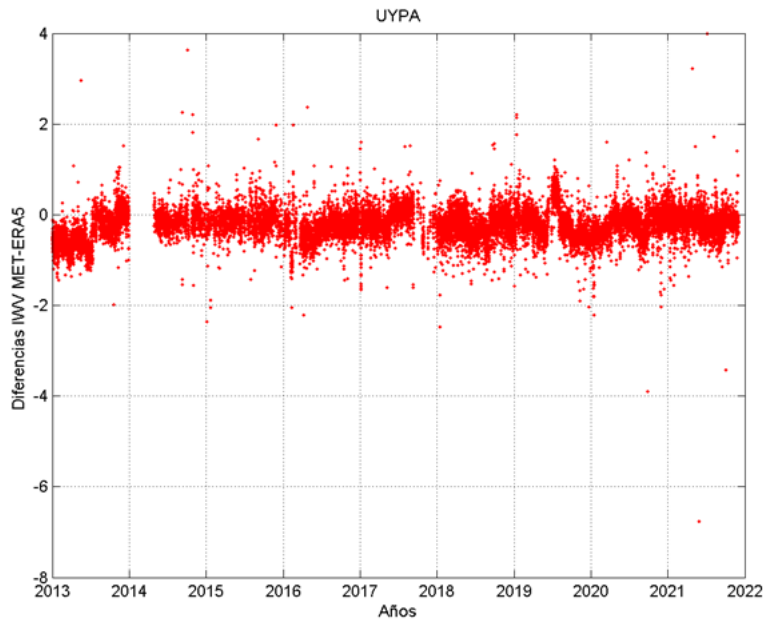


Figura 11: Diferencias IWV estimado con registros MET Y ERA5 [kg/m<sup>2</sup>], estación UYPA.

En la Figura 12, se presentan los histogramas correspondientes de las diferencias en UYRI y UYRO. Se observa el desvío hacia diferencias levemente negativas, resultando más del 98 % de las diferencias entre -1,25 y 0 kg/m<sup>2</sup>.

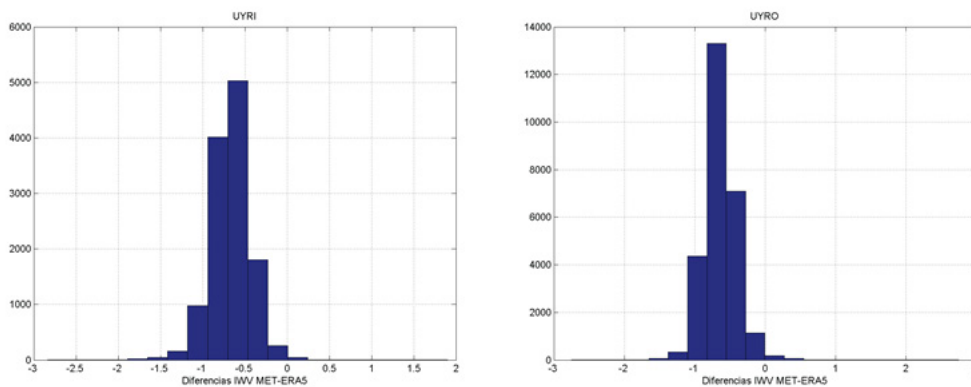


Figura 12: Histograma de las diferencias IWV<sub>ERA5</sub> [kg/m<sup>2</sup>], estación UYRI y UYRO.

### 3.4 Valores medios mensuales de la variable IWV

Habiendo validado las series IWV<sub>MET</sub> obtenidas con registros meteorológicos, se procedió a analizar la variabilidad anual en cada uno de los sitios. Se obtuvieron valores medios de iwv para cada mes del año, considerando el período completo, por cada estación. Tales valores se publican en la Tabla 5, resultando una contribución al conocimiento de esta variable en la región de estudio.

Tabla 5: Valores medios mensuales de IWV<sub>MET</sub> para cada estación GNSS.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
UYAR	26.03	25.63	27.90	23.67	16.05	17.52	14.73	18.20	22.08	21.25	23.31	23.64
UYCL	26.98	29.12	28.75	21.67	16.08	17.13	13.23	17.46	20.14	19.83	22.90	22.97
UYCO	29.09	26.40	26.69	22.25	16.67	15.30	15.83	17.38	17.11	16.95	21.25	23.30

UYFS	28.43	28.04	25.34	24.54	19.05	17.81	17.18	15.38	18.16	20.06	21.92	23.53
UYIF	27.36	28.18	25.82	24.01	19.63	18.50	17.42	15.95	17.72	19.67	22.04	25.17
UYLA	25.66	19.15	26.47	20.48	15.27	16.34	11.48	18.49	17.44	18.15	19.97	21.04
UYLP	27.09	29.15	25.82	24.55	20.22	17.93	17.83	16.94	18.93	20.18	22.07	23.71
UYMO	25.77	26.70	23.65	21.60	18.11	15.96	15.98	14.85	16.65	18.35	20.55	21.86
UYPA	29.83	30.39	26.66	24.99	20.46	17.58	17.66	16.47	19.68	22.14	23.05	25.87
UYPT	30.87	28.89	25.86	23.60	19.60	17.22	17.08	16.38	17.78	20.87	22.15	24.93
UYRI	26.11	27.83	27.48	24.02	16.62	18.12	14.37	17.09	19.29	19.79	21.39	22.38
UYRO	27.11	28.52	25.73	24.42	19.55	18.22	17.21	16.30	19.51	17.85	20.57	21.35
UYSA	33.05	30.78	28.20	24.54	19.74	20.97	15.87	21.89	20.15	23.19	24.68	26.41
UYSO	30.20	30.16	27.08	25.37	21.30	18.18	18.48	17.49	19.88	22.32	24.14	25.80
UYTA	26.60	27.67	27.91	22.29	15.97	19.17	14.60	17.03	19.37	19.46	22.01	23.34
UYTT	27.19	30.78	28.75	22.21	15.68	17.30	13.38	11.93	16.89	19.08	22.71	23.52

Cabe mencionar que dichos promedios han sido calculados sobre los valores de  $IWV_{MET}$  y por tanto comprenden el período de registro disponible de las estaciones MET, en algunos casos corresponde a 9 años, pero en otros a un período menor (ver Tabla 1). La estación UYLA, por ejemplo, para el mes de febrero solo dispone de un año de datos (2021), razón por la cual dicho valor se encuentra afectado por las particularidades meteorológicas de ese año.

En la Figura 13, se muestran a modo de ejemplo, los valores medios mensuales de las 4 estaciones mostradas en los análisis anteriores (localizadas en los extremos del área de estudio, en los cuatro puntos cardinales). En todas las estaciones se observa el mismo comportamiento estacional del iwv, el cual disminuye en los meses más fríos del año (mayo, junio, julio y agosto). Se puede observar también, que la estación que presenta mayores promedios mensuales de iwv es UYPA, ubicada al oeste del país, zona litoral limítrofe con la Mesopotamia argentina.

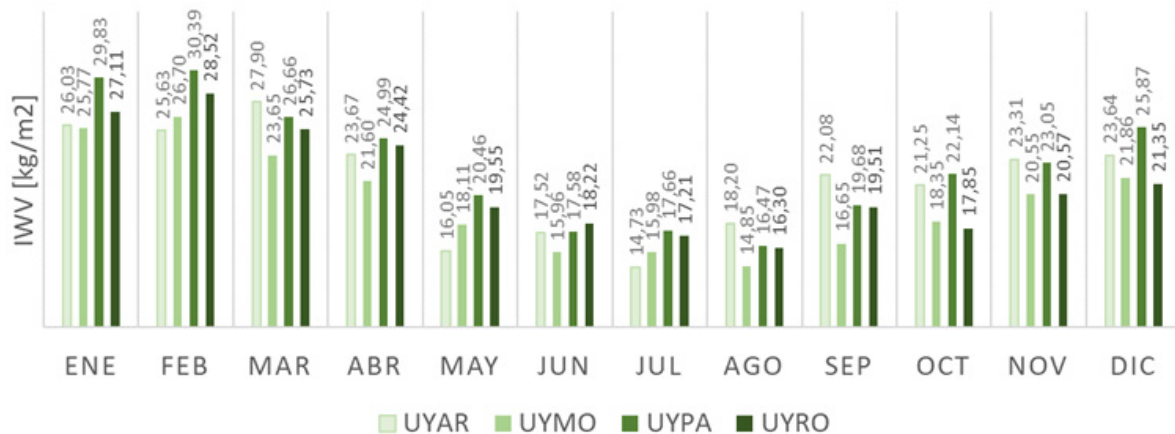


Figura 13: Valores medios mensuales de  $IWV_{MET}$  para las estaciones de UYAR, UYMO, UYPA, UYRO.

#### 4. Discusión y Conclusiones

Se compararon las variables  $T_{em}$  y  $P$  medidas en estaciones MET con las correspondientes del modelo ERA5 en la localización de 16 estaciones distribuidas sobre Uruguay, para un periodo de 9 años. Las diferencias encontradas no fueron significativas. El RMS de las diferencias de  $P$  fue muy similar en todas las estaciones y no alcanzó a superar el 0.2% de la variable. En la  $T_{em}$ , el RMS de las diferencias fue un poco mayor que en  $P$ , aunque no alcanzó a superar el 0,96% de la variable, siendo en 12 estaciones inferior al 0,6% de la  $T_{em}$  media de la región.

Se concluyó que las variables  $T_{em}$  y  $P$  de ERA5 representan muy bien la variabilidad en las estaciones analizadas. Las diferencias máximas y mínimas podrían deberse a eventos extremos y/o amplitudes térmicas diarias, no modelados con suficiente detalle por ERA5. En futuras investigaciones se procederá a analizar en particular las diferencias ocurridas previas, durante y posteriores a eventos meteorológicos documentados en la zona.

Respecto a las diferencias entre las series de IWV estimadas desde estaciones MET, y las correspondientes calculadas con datos de  $P$  y  $T_{em}$  de ERA5, no se observaron efectos sistemáticos con respecto a la época del año. Se obtuvo una diferencia promedio que se mantuvo durante todo el período analizado, menor que  $0,5 \text{ kg/m}^2$  en el 88% de las estaciones. Sólo en dos estaciones (UYRI y UYRO) se obtuvieron diferencias negativas mayores, con valores medios de  $-0,66$  y  $-0,63 \text{ kg/m}^2$  respectivamente, indicando que los valores de  $IWV_{ERA5}$  están sobrevalorando el vapor con respecto a los calculados utilizando observaciones meteorológicas. Los valores máximos y mínimos de las diferencias de IWV, fueron menores a  $\pm 5 \text{ kg/m}^2$ , en el 94% de las estaciones. Como tarea futura se espera poder analizar dichas diferencias puntualmente, evaluando si puede corresponder a eventos meteorológicos extremos que el reanálisis ERA5 no está modelando.

Otra posible causa de estas diferencias encontradas en UYRI y UYRO puede deberse a la reducción de la presión atmosférica aplicada en el cálculo del  $IWV_{ERA5}$ , ya que se considera el valor de presión atmosférica (referida al nivel del mar) en el nodo más cercano a la estación GNSS y se corrige por la altura de la misma ( $h_{GNSS}$ ). Cabe aclarar que la estación UYRI es el sitio con mayor altura dentro de los analizados en este estudio, por lo cual la corrección mencionada podría estar sobreestimando el valor del vapor, coincidiendo con los resultados publicados por Van Dam *et al.* (2010).

Para el caso de la estación UYRO, los valores meteorológicos utilizados para el cálculo del  $IWV_{MET}$  corresponden a una estación meteorológica ubicada a 33 km de la estación GNSS, por lo cual dichos datos podrían no estar caracterizando fielmente los valores del sitio. Cabe aclarar que la mayor distancia al nodo más cercano de ERA5 puede ser  $\approx 22 \text{ km}$ , lo cual en el caso de UYRO resultaría más cercano que la estación MET disponible.

Las diferencias encontradas permiten concluir que las estimaciones IWV desde estaciones MET, podrían contribuir a los modelos numéricos del clima (NWP), ya que cumplen con los estándares en cuanto a la precisión ( $5 \text{ kg/m}^2$ ) en los productos atmosféricos, establecida por Dousa, J. and Vaclavovic, P. (2014).

Los valores medios mensuales de IWV se han calculado para cada estación, incluyendo un período de 9 años. Cabe aclarar que en Uruguay no se disponen de mediciones clásicas de vapor de agua desde radiosondeos, razón por la cual estas estimaciones resultan un significativo aporte a la investigación climatológica sobre la región.

Del análisis de la variabilidad anual, se observa que es muy similar en las diferentes estaciones, por estar ubicadas en una misma zona climática. Sin embargo, se ha podido encontrar una pequeña diferencia entre las estaciones costeras (UYRO, UYLP y UYIF) y las estaciones mediterráneas (UYPT, UYPA, UYFS). En los meses de primavera y verano (septiembre a febrero) las estaciones continentales presentan entre 1 y  $2 \text{ kg/m}^2$  más que las estaciones costeras, en sus valores de vapor medio mensual. Durante el invierno, por contrario, se observa un leve aumento del vapor en las estaciones costeras, coincidente con un aumento de precipitaciones en la costa rochense, reportado por Barreiro *et al.*, 2019.

En el futuro se ha previsto realizar una investigación similar, abarcando estaciones GNSS de la red SIRGAS-CON, de otras regiones climáticas, considerando principalmente diferentes latitudes y variabilidad respecto a la altura sobre el nivel del mar.

#### 5. Agradecimientos

Los autores agradecen la tarea silenciosa de los responsables de las estaciones GNSS, de los centros de datos y de análisis SIRGAS, sin los cuales esta investigación no hubiera sido posible. En especial se agradece al centro de análisis de atmósfera neutra, CIMA (Centro de Ingeniería Mendoza Argentina, UNCuyo-UMaza) quienes calculan semanalmente y brindan públicamente los productos troposféricos de las estaciones de SIRGAS, que se utilizaron en esta investigación.

Los datos utilizados de estaciones MET fueron proporcionados por INUMET y los datos de ERA5 fueron proporcionados por ECMWF. Se agradece a ambas instituciones.

### Referencias Bibliográficas

- Barreiro M., Arizmendi F. Y Trinchin R. (2019). Variabilidad observada del clima en Uruguay. Proyecto: «Fortalecer las capacidades de Uruguay para la adaptación al cambio climático en la zona costera». <https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/Producto-2.pdf>
- Berné Valero J.L., Anquela Julián A.B., Garrido Villén N (2014). *GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Berg H. (1948) *Allgemeine Meteorologie*. Dümmler's Verlag, Bonn, p 337.
- Bevis M., Businger S., Herring T A, et al (1992) GPS meteorology: remote sensing of the atmospheric water vapor using the global positioning system. *J Geophys Res* 97:15787-15801.
- Bianchi, C.E., Mendoza, L.P.O., Fernández, L.I., Natali, M.P., Meza, A.M., Moirano, J.F., (2016). Multi-year GNSS monitoring of atmospheric IWV over Central and South America for climate studies. *Ann. Geophys.* 34, 623-639.
- Boehm, J., Niell, A.E., Tregoning, Paul and Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Schuh Geophys. Res. Lett.* 25. 10.1029/2005GL025546.
- Camisay, M.F., J.A. Rivera, M.L. Mateo, P.V. Morichetti, M.V. Mackern, (2020). Estimation of integrated water vapor derived from Global Navigation Satellite System observations over Central-Western Argentina (2015-2018). Validation and usefulness for the understanding of regional precipitation events, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 197*, 2020, 105143, ISSN 1364-6826, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105143>.
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I., Rogers, A.E., Elgened, G., (1985). Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length. *Radio Sci.*, vol. 20, 1593-1607
- Dousa, J. and Vaclavovic, P. (2014) Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications, *Adv. Space Res.*, 53, 1347-1358, doi:10.1016/j.asr.2014.02.021.
- Hersbach, H, Bell, B, Berrisford, P, et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.*; 146: 1999- 2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Mackern M.V., Mateo M.L., Camisay M.F., Rosell P.A. (2022). Quality control of SIRGAS ZTD products. *Journal of Geodetic Science* 2022, 12: 1-13. En prensa, aceptado 8 de Septiembre 2022. <https://doi.org/10.1515/jogs-2022-0136>
- Mackern M.V., Mateo M.L., Camisay M.F., Rosell P.A., Weidemann T., Gonzalez Romo A. (2021). Análisis del modelo de cálculo utilizado para obtener el vapor de agua troposférico desde los retardos en la señal GNSS. *Revista ICU, Vol 5(N°6)*. ISSN: 2525-1783 <http://revistas.umaza.edu.ar/index.php/icu/article/view/344/260>
- Mackern M.V., Mateo M.L., Camisay M.F., Morichetti P.V. (2020) *Tropospheric Products from High-Level GNSS Processing in Latin America*. International Association of Geodesy Symposia. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/1345\\_2020\\_121](https://doi.org/10.1007/1345_2020_121)
- Mendes, V.B. (1999) *Modeling the Neutral-Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques*, (Ph.D. dissertation). Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No 199, Univ. of New Brunswick, Canada.
- Morichetti P., Mackern M.V., Camisay M.F., Mateo M.L. (2018) *Aportes desde la red de estaciones SIRGAS-CON a la meteorología*. 3° Encuentro Nacional de Investigadores de Agrimensura. Universidad de Nacional de Catamarca, Junio 2018. Libro, Trabajos Completos, ISBN 978-987-661-281-4.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Rosell, P.A, Mackern Oberti, M.V., Rivera, J, Euillades, P.A., (2023). 10-Year assessment of GNSS integrated water vapour in the SIRGAS network, *Journal of South American Earth Sciences. Volume 130*, 104539, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104539>.
- Van Dam, T., Z. Altamimi, X. Collilieux, and J. Ray (2010), Topographically induced height errors in predicted atmospheric loading effects, *J. Geophys. Res.*, 115, B07415, doi:10.1029/2009JB006810