



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Tesis presentada para obtener el grado académico de
**Licenciada en Meteorología y Ciencias de la
Atmósfera**

**Variabilidad de la radiación UV en
Argentina, su relación con la
nubosidad y con los principales
forzantes de gran escala**

Téc. Serena Indira Sanchez

Directora: Dra. Josefina Blázquez

Codirectora: Dra. Vanesa Pántano

La Plata, Buenos Aires, Argentina

Febrero 2025

A mamá, papá y Grecia, por el amor, la paciencia y las risas.

*A Benita, por permitirme estudiar todos estos años, hasta el último final,
acompañada de ternura y payasadas.*

Y a Franca, por llenarnos de dulzura en esta nueva etapa.

Agradecimientos

A mis directoras, Josefina y Vanesa, por la paciencia, la dedicación y por ser un ejemplo de inspiración durante todo el proceso.

Al Dr. Facundo Orte, por guiarnos en la comprensión de esta variable y por la ayuda brindada.

A la gente del Observatorio, por hacer de este espacio un lugar al que llegamos con una sonrisa.

A los docentes, por enseñarnos, guiarnos y llenarnos de inspiración.

A mis alumnos, por el esfuerzo. Y a mis compañeros de docencia, por enseñarme todos los días.

A los chicos del Grupo de Pronóstico, junto a Horacio y Ale, por las oportunidades y por divertirnos haciendo lo que nos gusta.

A mis amigos de la Facu, por llenarme de risas, compañía y alegría. A Sara y Malu, mis primeras amigas en este viaje; a Pasque, por preguntar religiosamente cada mes cuándo inscribirnos a los finales; a Aye y Ari, por los mates más ricos que alguien pueda probar; a Agus, por su compañía incondicional; a Luca, por seguir queriéndome después de llorarle tres horas sin sentido; a Lau, por llevarme a caminar por todo el Obser; a Bruno, por ser Bruno; a Cata, por los podcast de Botánica durante el estudio; a Lolo, Diego, Merlo y Nacho, las almas de la fiesta; a Viki, mi compañera de cursadas; a Lilo, por los momentos de oficina; a Pardo, por los saludos en el parque. A todos los que falta mencionar y los que se fueron sumando en el camino, gracias, de corazón.

A mis amigos de la vida, por entender cuando me quedaba estudiando y por llenarme de preguntas meteorológicas siempre que tienen la oportunidad. Especialmente a mi mejor amiga, Agustina, por ser mi cable a tierra.

A la extensión y a todas las personas que preguntan sobre Meteorología con los ojos llenos de interés y curiosidad, gracias por recordarme lo fascinante que es esta profesión.

A la Universidad pública, gratuita y de calidad, por ser el pilar que nos permite soñar, crecer y transformar el futuro.

Resumen

En esta tesis se analizó la variabilidad temporal de la radiación ultravioleta diaria a partir de datos satelitales de la base TEMIS, en cinco puntos de medición de Argentina (La Quiaca, Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata) durante el período 2005-2023. El estudio se centró en el verano, el otoño y la primavera, debido a que en estas estaciones se registran niveles críticos de exposición a la radiación UV, con posibles implicancias para la salud de la población.

Se analizaron tendencias lineales de las series de valor medio estacional de la dosis UV. La mayoría de las tendencias fueron positivas, salvo en La Quiaca durante el verano; en La Quiaca, Córdoba y Mar del Plata en otoño; y en Salta en primavera, donde fueron negativas. La única tendencia estadísticamente significativa se encontró en Córdoba durante el verano.

El análisis del impacto de la nubosidad en la radiación UV que alcanza la superficie reveló que el verano presenta las mayores diferencias entre las series de dosis UV para cielo despejado y aquellas que incluyen el efecto de la nubosidad. Además, para el verano se encontraron correlaciones negativas entre la nubosidad (alta y baja) y la dosis UV, lo que sugiere una atenuación de la radiación UV por parte de ambos tipos de nubes en las cinco localidades estudiadas, siendo más significativo el efecto de las nubes bajas. En contraste, durante el otoño y la primavera, en las localidades del norte del país (La Quiaca y Salta) se observaron correlaciones positivas para ambos tipos de nubosidad, lo que indicaría un incremento de la radiación UV en superficie con mayor cobertura nubosa. Por otro lado, en las estaciones del centro (Córdoba, La Plata y Mar del Plata), las correlaciones fueron mayoritariamente negativas para nubes altas y bajas, lo que sugiere que la nubosidad también podría actuar como atenuante de la radiación UV en otoño y primavera.

El análisis espectral mostró la predominancia de ciclos cortos (2 y 5 años) y ciclos largos (10 y 20 años), dependiendo de la localidad y la época del año. En cuanto a la correlación con índices climáticos, el índice PDO se destacó en otoño, con correlaciones negativas en todas las localidades excepto La Quiaca. También se encontraron correlaciones negativas con los índices asociados al ENSO para el verano en Córdoba y Mar del Plata; y para el otoño en Salta, Córdoba, La Plata y, en menor medida, Mar del Plata. Esto sugiere que las fases positivas (negativas) de la PDO podrían estar vinculadas a menores (mayores) valores de radiación UV en superficie. Respecto al ENSO, los mayores (menores) valores de radiación UV en superficie estarían asociados con La Niña (El Niño). Por otro lado, el SAM tuvo mayor influencia en las localidades del centro de Argentina, especialmente en el verano en Mar del Plata, donde presentó correlaciones positivas. Esto sugiere que las fases positivas (negativas) del SAM, caracterizadas por valores de presión más altos (bajos) en latitudes medias, podrían asociarse con mayores (menores) niveles de radiación UV en superficie. Finalmente, la QBO mostró correlaciones positivas en verano en Salta y La Plata, y en primavera en La Quiaca, Salta y Córdoba.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 5 |
| 1.1. Antecedentes | 5 |
| 1.2. Objetivos | 9 |
| 2. Datos y metodología | 10 |
| 2.1. Datos | 10 |
| 2.1.1. Radiación UV | 10 |
| 2.1.2. Nubosidad | 13 |
| 2.1.3. Índices climáticos | 13 |
| 2.2. Metodología | 14 |
| 2.2.1. Radiación UV | 14 |
| 2.2.2. Relación de la radiación UV con la nubosidad | 15 |
| 2.2.3. Análisis de la variabilidad de la radiación UV | 16 |
| 3. Control de calidad y selección de datos | 17 |
| 3.1. Control de calidad | 17 |
| 3.2. TEMIS | 17 |
| 3.3. SMN | 23 |
| 3.4. EARG y EBA | 26 |
| 3.5. Análisis de inhomogeneidades | 27 |
| 4. Caracterización de la radiación UV y el efecto de la nubosidad | 28 |
| 4.1. Análisis climático | 28 |
| 4.1.1. Ciclo anual | 28 |
| 4.1.2. Tendencias | 29 |
| 4.2. Relación de la radiación UV con la nubosidad | 32 |
| 5. Análisis de la variabilidad de la radiación UV | 38 |
| 5.1. Análisis espectral | 38 |
| 5.2. Relación con índices climáticos | 39 |
| 6. Conclusiones | 44 |
| Bibliografía | 49 |

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

La radiación solar cubre un amplio espectro de longitudes de onda, que incluye el ultravioleta (UV, 200-380 nm), la luz visible (380-780 nm) y el infrarrojo (780 nm a 1 mm). Dentro de este espectro, la radiación UV merece especial atención por sus efectos, tanto positivos como negativos, en la salud humana. En dosis moderadas, contribuye a la síntesis de vitamina D, un nutriente esencial para la salud ósea (Engelsen, 2010; Raymond-Lezman y Riskin, 2023). No obstante, cuando la exposición es excesiva, los riesgos superan ampliamente los posibles beneficios, siendo la piel el órgano principal comprometido. Desde la década de 1970, el aumento en la incidencia de cáncer de piel, particularmente en poblaciones de piel clara, ha sido alarmante (Organización Mundial de la Salud -OMS-, 2002).

La radiación UV se clasifica comúnmente en tres rangos, cuyos límites pueden variar según el contexto de aplicación. De acuerdo con Cañarte *et al.* (2011), en el ámbito dermatológico, se consideran los siguientes intervalos:

- **UV-A (320-400 nm)**: Este rango representa la mayor proporción de la radiación UV que llega a la Tierra. Su efecto es el que conocemos como bronceado, un proceso ligero y temporal que afecta principalmente a la capa más superficial de la piel.
- **UV-B (290-320 nm)**: Con un mayor potencial de daño que la UV-A, la radiación UV-B es responsable de las quemaduras solares y tiene efectos fotocancerígenos más intensos.
- **UV-C (100-290 nm)**: Esta radiación, extremadamente carcinogénica, no alcanza la superficie terrestre, ya que es absorbida por la capa de ozono y el oxígeno en la estratósfera, protegiendo así a los seres vivos de sus efectos nocivos.

En niveles cercanos a la superficie, aproximadamente el 94% de la energía UV corresponde a la radiación UV-A, mientras que el 6% restante es UV-B (Orte *et al.*, 2010).

La identificación y cuantificación de las longitudes de onda más dañinas para los seres vivos se logra mediante los espectros de acción, herramientas experimentales diseñadas para evaluar el daño causado según la longitud de onda de los fotones (Orte, 2009). Estos espectros son específicos para cada organismo y constituyen una base fundamental para comprender los efectos de la radiación UV. En este contexto, la *International Lighting Commission* reconoce como referencia el espectro de acción eritémico desarrollado por AF (1987). Este espectro mide el potencial daño que la radiación UV puede ocasionar en la piel. Al integrarlo a lo largo de todo el rango de longitudes de onda del

espectro UV, se obtiene la irradiancia solar UV eritémica, expresada en W/m^2 . Nollas *et al.* (2020) detalla que este parámetro es el más estudiado y ampliamente difundido en investigaciones sobre los efectos de la radiación UV.

Para entender el impacto acumulado de la radiación UV durante un período de exposición se calcula la dosis eritémica [J/m^2], la cual se obtiene al sumar la irradiancia solar UV eritémica a lo largo de ese tiempo (Orte, 2009). En paralelo, con el objetivo de proteger la salud pública, organismos internacionales diseñaron un índice adimensional que facilita la comunicación de los niveles de peligrosidad para la piel (Organización Mundial de la Salud -OMS-, 2002). Este índice, conocido como índice ultravioleta (IUV) y utilizado en diversos trabajos (Nollas *et al.*, 2020; Luccini *et al.*, 2006; Stadler *et al.*, 2017; Bilbao y de Migue, 2020, entre otros), se obtiene multiplicando la irradiancia eritémica, expresada en W/m^2 , por un factor de $40 \text{ m}^2/\text{W}$, obteniendo así un valor adimensional. El mismo clasifica la exposición en categorías que representan los niveles de peligro a partir de un sistema de colores que facilita su interpretación (Lusi, 2017), las cuales son utilizadas por servicios meteorológicos y medios de comunicación para alertar a la población sobre la intensidad de la radiación UV. En particular, en Argentina, el Servicio Meteorológico Nacional tiene disponible un pronóstico de éste índice (<https://www.smn.gov.ar/radiacionuv>), junto con una tabla que indica los niveles de riesgo para dos tipos de piel pertenecientes a la clasificación de Fitzpatrick (1988). El IUV varía entre 1 y 23, los valores de 1 a 2 indican un nivel de riesgo bajo, de 3 a 5 riesgo moderado y de 6 a 7 riesgo alto. Los valores de 8 a 10 representan un riesgo muy alto, mientras que los de 11 a 23 señalan un riesgo extremo. En esa misma tabla, también se señala que el tiempo de exposición segura sin protección varía según el tipo de piel, dónde para el tipo I oscila entre 67 minutos (IUV 1) y 3 minutos (IUV 23), mientras que para el tipo IV varía entre 600 y 26 minutos, respectivamente.

La radiación solar UV no atraviesa la atmósfera de manera uniforme; diversos factores influyen en su trayectoria y determinan cuánto de esta radiación llega a la superficie terrestre. Uno de los principales es el ángulo cenital solar (SZA, por sus siglas en inglés), que mide la inclinación de los rayos solares. Cuando el sol está más bajo en el cielo, el recorrido de la luz a través de la atmósfera es más largo, lo que reduce la intensidad de la radiación. La cantidad de ozono en la atmósfera también es clave, ya que actúa como una barrera natural, absorbiendo parte de la radiación UV, especialmente la más peligrosa (Organización Mundial de la Salud -OMS-, 2002; Orte *et al.* 2010). A su vez, tanto las nubes como los aerosoles dispersan o absorben la radiación, modulando su impacto (Orte, 2009). La latitud, el momento del día y la estación del año también juegan un papel importante, al igual que la altitud: cuanto más alto se encuentra un lugar, menor es el recorrido de la luz solar en la atmósfera, lo que intensifica la radiación que llega al suelo (Orte, 2009; Bilbao y de Migue, 2020). El albedo añade otra capa de complejidad. Por ejemplo, la nieve fresca puede reflejar hasta un 80 % de la radiación, la arena seca de playa alrededor de un 15 %, y la espuma del mar aproximadamente un 25 % (Organización Mundial de la Salud -OMS-, 2002). Esto explica por qué los entornos nevados incrementan la exposición a la radiación UV-B, aumentando el riesgo de quemaduras solares (Orte, 2009).

Como se mencionó anteriormente, uno de los factores que influye en la radiación UV que llega a la superficie son las nubes (Orte *et al.*, 2010). Calbó *et al.* (2005)

resalta la complejidad de interpretar los efectos de las nubes sobre la radiación UV que alcanza la superficie terrestre. Señala que esta dificultad se debe principalmente a la gran variabilidad de los campos nubosos, tanto espacial como temporalmente, así como a las diferencias en el tipo de nube y sus características ópticas. Además, menciona la influencia de otros factores, como la interacción entre ciertos tipos de nubes y el SZA (López *et al.*, 2009). Principalmente, la cobertura nubosa tiende a atenuar la radiación UV, pudiendo reducirla entre un 20 % y un 70 % en cielos completamente cubiertos (Wolfram *et al.*, 2017). Sin embargo, en determinadas condiciones de cielos parcialmente nublados, la irradiancia puede superar incluso la de un cielo completamente despejado, fenómeno denominado “efecto de realce” (Calbó *et al.*, 2005). Esto se debe a la reflexión de la radiación en los bordes de las nubes, que puede aumentar los niveles de radiación en la superficie terrestre hasta en un 20-30 % por encima de la radiación esperada para un cielo despejado (Wolfram *et al.*, 2004; Bordewijk *et al.*, 1995).

El territorio continental de la República Argentina presenta una notable diversidad en los niveles de radiación solar UV, tanto en términos geográficos como estacionales (Luccini *et al.*, 2006). Esta variabilidad convierte al país en un escenario clave para investigaciones aplicadas en áreas como salud pública, salud ocupacional, tratamientos médicos específicos, análisis de paradigmas culturales sobre la exposición solar, deterioro de materiales, así como estudios sobre el cambio climático (Nollas *et al.*, 2020). Un aporte significativo en esta línea es el atlas de radiación solar desarrollado por Carmona *et al.* (2016) a partir de datos satelitales. Este atlas analiza variables como la cobertura nubosa efectiva y la radiación solar. Según sus hallazgos, el noroeste argentino recibe, en promedio anual, los niveles más altos de radiación solar del país, coincidiendo con una baja cobertura nubosa. Por el contrario, los mínimos valores de radiación solar se encuentran en los Andes patagónicos, zona de mayor cobertura nubosa.

En Argentina, existen algunos estudios que han documentado el comportamiento de la radiación UV, aportando información clave para entender su variabilidad. Orte *et al.* (2022) analizaron datos de una red de monitoreo de radiación UV total. Encontraron que en diciembre en el centro y norte del país, y en noviembre y diciembre en el sur, el espesor óptico de las nubes tiene mayor influencia que la capa de ozono sobre los niveles de radiación. Por su parte, Luccini *et al.* (2006) desarrollaron una climatología de la radiación UV, incluyendo la dosis UV y el IUV. Concluyeron que, en promedio, la nubosidad atenúa la radiación en menos del 20 % durante todo el año, un patrón que se mantiene en la mayoría de las regiones del país. Utrillas *et al.* (2016) analizaron el IUV en el noroeste argentino, detectando valores extremos (superiores a 11) en el 40 % de los días analizados en estaciones de gran altitud. En un estudio sobre las ciudades de Buenos Aires y Mar del Plata, Stadler *et al.* (2017) examinaron la radiación UV bajo condiciones de cielo despejado y distintos niveles de nubosidad, enfocándose en los meses de verano. Concluyeron que el IUV puede alcanzar niveles altos a extremadamente altos, aunque la presencia de nubes puede reducirlo hasta un 80 %. Por su parte, Wolfram *et al.* (2017) evaluaron el impacto de las nubes en la radiación UV en el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Sur, utilizando sensores remotos. Encontraron que, en primavera y verano, la irradiancia eritémica puede aumentar hasta un 25 %, generando condiciones de exposición solar peligrosas para los habitantes de Río Gallegos.

Por otro lado, se han identificado varios estudios en la literatura que examinan cómo los principales patrones de variabilidad se relacionan con la nubosidad y la precipitación en la región. Algunos autores (Silvestri y Vera, 2003; Gillett *et al.*, 2006, entre otros) describieron que, durante la fase positiva del Southern Annular Mode (SAM, Thompson *et al.* 2000), se produce una reducción en la precipitación alrededor de los 45° de latitud sur, lo que coincide con un desplazamiento hacia el sur de las trayectorias de las tormentas, impactando en la nubosidad de la región. Cai *et al.* (2020) señalaron que durante la fase positiva de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), la convección en el Pacífico tropical genera ondas de Rossby que afectan la circulación atmosférica generando un incremento de la precipitación y de la nubosidad en el centro-este de Argentina, Uruguay y sur de Brasil. A su vez, Mantua y Hare (2002) notaron que durante la fase cálida (fría) de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico oriental son más cálidas (frías) de lo normal, pudiendo intensificar eventos cálidos (fríos) del ENSO e impactando en los patrones de nubosidad y lluvias de distintas regiones de Sudamérica. Por ejemplo, las fases cálidas de la PDO suelen coincidir con períodos anómalamente húmedos en el centro-sur de América del Sur. A su vez, los cambios en la temperatura superficial del océano Atlántico también pueden afectar a la circulación, impactando en la precipitación en algunas regiones de Sudamérica. Nnamchi *et al.* (2011) encontraron una configuración dipolar de la temperatura de la superficie del mar del Océano Atlántico Sur que afecta la circulación atmosférica, señalando que la fase positiva de este fenómeno se caracteriza por una subsidencia frente a las costas de Argentina, Uruguay y Brasil, lo cual inhibe la precipitación en dicha región. Cabe destacar que, además de los patrones de variabilidad previamente mencionados, existen otros patrones que también pueden incidir en la nubosidad y la precipitación en la región.

Como se mencionó anteriormente, si bien hay numerosos estudios en la literatura que relacionan los principales forzantes de gran escala con la variación de la precipitación y la nubosidad en el sur de Sudamérica, no se han encontrado estudios que vinculen dichos forzantes con la radiación UV en la región. Por esta razón, este trabajo tiene como objetivo analizar dicha relación, partiendo de la hipótesis de que la nubosidad está relacionada con los modos de variabilidad que influyen en el clima del sur de Sudamérica y que, a su vez, la radiación UV se ve afectada por la nubosidad.

1.2 Objetivos

Considerando que niveles elevados de esta radiación representan un mayor riesgo para la salud de la población, este estudio tiene como objetivo principal describir la variabilidad temporal de la radiación UV en Argentina y la posible influencia de los principales forzantes de gran escala. A partir de este propósito general, se abordan tres objetivos específicos:

1. Caracterizar las series temporales de la radiación UV en distintas regiones de Argentina, en términos de variabilidad temporal.
2. Analizar la relación entre la nubosidad y la radiación UV que alcanza la superficie terrestre.
3. Explorar los principales forzantes climáticos del sistema océano-atmósfera que puedan contribuir a su variabilidad.

Capítulo 2

Datos y metodología

En este capítulo se presentan los datos utilizados para el desarrollo del trabajo y la metodología implementada. Se incluye la información de los datos de radiación UV provistos de diversas fuentes, datos de nubosidad obtenidos de reanálisis y datos de distintos índices climáticos.

2.1 Datos

2.1.1 Radiación UV

Tropospheric Emissions Monitoring Internet Service

La base de datos satelital del *Tropospheric Emissions Monitoring Internet Service* (TEMIS, por sus siglas en inglés) proporciona datos de dosis diaria de radiación UV para tres espectros de acción: eritemal, vitamina D y daño en el ADN. Estos datos se ofrecen tanto en condiciones de cielo despejado a nivel global como con correcciones por nubosidad para ciertas regiones. En particular, para este trabajo, los datos fueron obtenidos a partir de los instrumentos SCIAMACHY y GOME-2 (v2.0-2.2) (https://www.temis.nl/uvradiation/UVarchive/stations_uv.php, fecha de acceso 11/03/2024) para 14 puntos de medición de Argentina (Figura 2.1). Las correcciones por nubosidad son realizadas utilizando observaciones del satélite geostacionario *Meteosat Second Generation* (MSG), que recopila datos cada 15 minutos desde el 19 de enero de 2004.

En este estudio se utilizó la dosis diaria de radiación UV eritemal corregida por nubosidad (la denotaremos como DUVN) y la dosis diaria de radiación UV eritemal para cielo despejado (DUVD), ambas expresadas en kJ/m^2 , en el período 2005-2023. Aunque la base de datos ofrece información en resolución temporal diaria, en este trabajo se analizó la variable a través de promedios mensuales y estacionales.

La dosis diaria de radiación UV eritemal calculada por TEMIS se basa en la integración de la tasa de radiación UV (TUV) (Ecuación 2.1), que representa la cantidad de radiación UV que llega a la superficie terrestre por unidad de tiempo y área, expresada en W/m^2 . Este cálculo considera diversos factores, como la columna total de ozono, el ángulo cenital solar y correcciones específicas para nubosidad, altitud, albedo y distancia Tierra-Sol. La TUV se obtiene asumiendo que la columna total de ozono permanece constante durante el día, utilizando el valor correspondiente al mediodía solar local.

$$TUV(t) = UVP(TO, SZA) \cdot f_1(D) \cdot f_2(A) \cdot f_3(H) \cdot f_4(C) \quad (2.1)$$

- UVP representa el espectro UV ponderado por el espectro de acción eritémico, que depende de la columna total de ozono (TO) y del ángulo cenital solar (SZA).

- $f_1(D)$ representa la corrección por distancia variable Sol-Tierra.
- $f_2(A)$ representa la corrección por el albedo de la superficie.
- $f_3(H)$ representa la corrección por elevación de la superficie.
- $f_4(C)$ representa la corrección por presencia de nubes. Mientras que las primeras tres correcciones son constantes durante un día dado, la presencia de nubes puede variar durante el día.
- No hay una corrección explícita para la presencia de aerosoles.

A partir de estos datos, la dosis UV diaria se calcula integrando la TUV en intervalos de 5 minutos a lo largo del día (Ecuación 2.2). Además, se considera que existe radiación UV en las horas cercanas al amanecer y al atardecer, incluso cuando el ángulo cenital solar alcanza los 90 grados, debido a la dispersión atmosférica. Por este motivo, el cálculo incluye un período adicional de aproximadamente 1.5 horas antes del amanecer y después del atardecer, conocidos como *scatterrise* y *scatterset*, respectivamente. Finalmente, la dosis UV diaria se expresa en kJ/m^2 tras completar la integración temporal.

$$DUVN = \int TUV(t) dt \quad (2.2)$$

Para el cálculo de la DUVD se realiza el mismo proceso que para DUVN, pero considerando a $f_4(C)$ (factor de corrección por nubosidad) de la Ecuación 1 igual a uno.

Servicio Meteorológico Nacional

Se emplearon datos calibrados obtenidos de diversos sensores de superficie en 10 estaciones (Figura 2.1), proporcionados por el SMN (<https://www.argentina.gob.ar/smn/institucional/contacto>), en el marco de su política de libre acceso. Estos datos presentan resoluciones temporales horarias o por minuto, según la estación. Las variables de interés incluidas en este estudio son la irradiancia eritémica (W/m^2) y el IUV (adimensional). A partir de estas variables se puede obtener la dosis UV eritémica (DUVN, dado que al ser sensores de superficie también tienen en cuenta el efecto de la nubosidad, al igual que TEMIS).

Estación Astronómica de Río Grande y estaciones aledañas

La Estación Astronómica de Río Grande (EARG) (<http://earg.fcaglp.unlp.edu.ar/>), ubicada en Tierra del Fuego (Figura 2.1), fue fundada mediante la colaboración entre la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), el Servicio de Hidrografía Naval, el Observatorio de Besançon en Francia y la Provincia de Tierra del Fuego.

Los datos utilizados en este estudio fueron proporcionados por la estación EARG en colaboración con el Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC). En la

provincia de Tierra del Fuego, CADIC recopila información de diversas estaciones meteorológicas; sin embargo, para este trabajo se emplearon específicamente los datos de la estación Estancia Buenos Aires (EBA) (Figura 2.1), ya que es la única que registra datos de radiación UV. Tanto EARG como EBA están equipadas con sensores de superficie Vantage Pro2 PLUS, que comenzaron a operar en 2012 y 2014, respectivamente. En este estudio, se utilizó la dosis UV eritémica (DUVN, ya que, al tratarse de sensores de superficie, consideran también el efecto de la nubosidad, al igual que TEMIS y los sensores del SMN). Estos datos, registrados con una resolución de 10 minutos en EARG y horaria en EBA, fueron procesados para obtener resolución horaria en el caso de EARG.

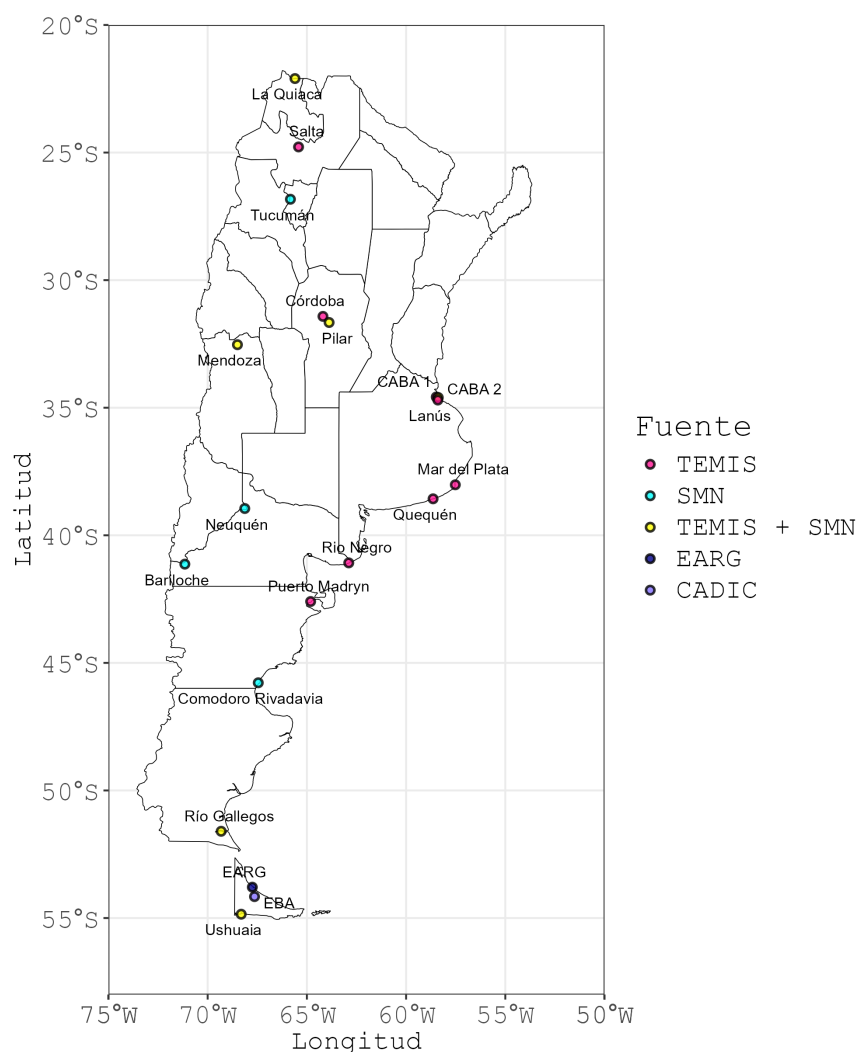


Figura 2.1: Ubicación de estaciones de medición de radiación UV en Argentina para distintas fuentes de datos. Cada estación está representada con un punto coloreado según la base de datos utilizada: **TEMIS** (rosa), **SMN** (celeste), **TEMIS + SMN** (amarillo), **EARG** (azul oscuro) y **CADIC** (violeta).

2.1.2 Nubosidad

Para profundizar el análisis del rol que cumple la nubosidad en afectar la radiación UV que alcanza la superficie terrestre, se utilizaron datos del reanálisis ERA5 (Hersbach *et al.*, 2023), desarrollado por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. Este conjunto de datos tiene una resolución horizontal de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Se utilizaron datos mensuales de cobertura de nubosidad baja y alta (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=download>, fecha de acceso 31/10/2024) en el período 2005-2023. La nubosidad se mide como la fracción de la retícula cubierta por nubes, con valores que varían entre 0 y 1, y se clasifica según el nivel de la troposfera:

- **Nubosidad baja:** Incluye nubes ubicadas en los niveles en donde la presión es superior al 80 % de la presión en la superficie. Por ejemplo, si la presión de superficie es de 1000 hPa, el cálculo se realiza para niveles de presión mayores a 800 hPa, lo que sería aproximadamente por debajo de los 2 kilómetros, asumiendo una atmósfera estándar.
- **Nubosidad alta:** Comprende nubes en los niveles de presión donde la misma es inferior al 45 % de la presión en la superficie. Es decir, si la presión en superficie es de 1000 hPa, el cálculo se realiza utilizando niveles de presión menores a 450 hPa, lo que corresponde aproximadamente a alturas mayores a 6 kilómetros, suponiendo una atmósfera estándar.

Para más detalles sobre estos datos consultar: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.

2.1.3 Índices climáticos

Con el objetivo de explorar los forzantes climáticos del sistema océano-atmósfera que podrían influir en la variabilidad de la DUVN, se utilizaron los siguientes índices climáticos a escala mensual, los cuales fueron promediados estacionalmente. Todos los índices se descargaron de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, <https://psl.noaa.gov>, fecha de acceso 21/10/2024) excepto el índice del Dipolo del Océano Atlántico Sur (SAODI, por sus siglas en inglés), que se obtuvo de la Universidad Federal de Itajubá (<https://meteorologia.unifei.edu.br/teleconexoes/indice?id=saodi>, fecha de acceso 21/10/2024).

- **Oceanic Niño Index (ONI):** Promedio móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 3.4 (5°N - 5°S , 120° - 170°W). Las anomalías están basadas en períodos de referencia de 30 años móviles y se actualizan periódicamente. El ONI es utilizado para identificar eventos cálidos y fríos del ENSO (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

- **Multivariate ENSO Index, versión 2 (MEI.V2):** Índice multivariado que combina diferentes variables relacionadas con el ENSO, como la presión atmosférica, la TSM, los vientos zonales y meridionales, y la nubosidad (<https://psl.noaa.gov/enso/mei/>).
- **SAM:** El índice SAM se calcula de forma mensual a partir de la diferencia entre los promedios zonales de la presión al nivel del mar en las latitudes 40°S y 65°S. Estos promedios se estandarizan utilizando la media y la desviación estándar del período climatológico 1981-2010. El SAM refleja la variabilidad en diferentes escalas de tiempo en las regiones extratropicales del hemisferio sur. Un índice positivo (negativo) indica una presión más baja (alta) en las áreas polares y una presión más alta (baja) en los extratropicos (https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/timeseries/monthly/SAM/).
- **Dipole Mode Index (DMI):** Representa el gradiente de la TSM en el Océano Índico entre las regiones (50°E-70°E, 10°S-10°N) y (90°E-110°E, 10°S-0°N) (https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/DMI/).
- **PDO:** La PDO es un patrón de variabilidad climática en el Pacífico que se asemeja al ENSO, pero se desarrolla en escalas temporales más prolongadas (<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/pdo/>). Se calcula usando las anomalías de la TSM del Pacífico Norte en un área ubicada al norte de 20°N.
- **Tropical North Atlantic (TNA):** El TNA se define a partir de las anomalías de TSM en el Atlántico Norte tropical, calculadas dentro de la región [55°W-15°W, 5°N-25°N] (<https://stateofocean.osmc.noaa.gov/sur/atl/tna.php>).
- **Tropical South Atlantic (TSA):** El TSA se calcula en base a anomalías de TSM en el Golfo de Guinea y el Atlántico Sur oriental, en la región [30°W-10°E, 20°S-0°].
- **SAODI:** El Dipolo del Atlántico Sur corresponde a un dipolo de anomalías de TSM entre áreas tropicales del Atlántico Sur (10°E-20°W, 0°-15°S) y el sur de Brasil y Uruguay (10°-40°W, 25°S-40°S) (<https://meteorologia.unifei.edu.br/teleconexoes/indice?id=saodi>).
- **Quasi-Biennial Oscillation (QBO):** Este índice representa el promedio de los vientos zonales en 30 hPa en la región ecuatorial. Se distingue por su periodicidad bienal y ofrece información relevante sobre la dinámica de la circulación en la estratósfera (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>).

2.2 Metodología

2.2.1 Radiación UV

La dosis UV eritémica es una medida comúnmente utilizada para evaluar la exposición a la radiación ultravioleta. Diversos estudios (Nollas *et al.*, 2020; Bilbao y de

Migue, 2020; Luccini *et al.*, 2006, entre otros) han empleado el valor medio mensual de esta variable. De acuerdo con los estudios mencionados, en este trabajo se optó por trabajar con el promedio mensual y el promedio estacional de la dosis UV eritémica en el verano (Diciembre-Enero-Febrero, DEF), otoño (Marzo-Abril-Mayo, MAM), invierno (Junio-Julio-Agosto, JJA) y primavera (Septiembre-Octubre-Noviembre, SON). Sin embargo, en determinados análisis se descartó el trimestre JJA, ya que en latitudes medias y altas el invierno se corresponde a una estación con baja exposición de la población a la radiación solar.

Previo a la utilización de los datos, se realizó un control de calidad de las fuentes de datos descritas en la Sección 2.1.1, siguiendo los procedimientos que se detallarán en el Capítulo 3. En función de la cercanía entre algunos puntos de medición y considerando la fuerte componente latitudinal que posee la radiación solar, se calculó la correlación lineal de Pearson y el coeficiente de determinación (R^2) (Wilks, 2011) entre las distintas series de los puntos de medición para los trimestres correspondientes, buscando identificar grupos con comportamiento similar y así evitar información redundante. De esta manera se identificó una sola serie representativa de cada grupo. La agrupación se llevó a cabo considerando aquellas estaciones en las que R^2 fue superior a 0.7, ya que en estos casos las series explicaban más del 70 % de la variabilidad de las otras.

En el marco del control de calidad de las series de datos, se realizó un análisis de quiebres utilizando los tests no paramétricos de Pettit, Buishand y el test paramétrico Standard Normal Homogeneity Test (SNHT). Estos métodos fueron seleccionados por su capacidad para detectar quiebres reales con una menor probabilidad de identificar falsos positivos. El SNHT es particularmente eficaz para detectar quiebres en los límites de las series, mientras que los métodos de Pettit y Buishand son más adecuados para identificar quiebres en el centro de las series (Hurtado *et al.*, 2020). Además, debido a la extensión de las series de datos, se enfocó el análisis en la identificación de un único punto de quiebre, considerando un nivel de confianza del 90 %.

Por otro lado, se realizó un análisis de tendencias de la DUVN. Para ello, se ajustó una tendencia lineal a los datos mediante el modelo de regresión de Theil-Sen, método conocido por su robustez al no hacer suposiciones previas sobre la distribución de los datos. Este modelo se basa en la correlación no paramétrica Tau de Kendall (Sen, 1968), y a partir de él se obtuvo la pendiente de la regresión. Asimismo, para el análisis de tendencias, se utilizó el test no paramétrico de Mann-Kendall (Mann y Whitney, 1947), también basado en la correlación no paramétrica Tau de Kendall. El test se realizó a dos colas, con un nivel de confianza del 90 %.

2.2.2 Relación de la radiación UV con la nubosidad

Para evaluar la atenuación de las nubes, se emplearon las series de DUVD y DUVN. A partir de esas series, se calculó el factor de modificación por nubes (CMF, por sus siglas en inglés) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CMF = \frac{DUVN}{DUVD} \quad (2.3)$$

Se trata de un indicador ampliamente utilizado en la literatura y descrito por Calbó

et al. (2005). Este factor se define como la razón entre la dosis de radiación UV bajo condiciones de nubosidad y la dosis correspondiente en un cielo despejado. Un CMF cercano a 0 sugiere una mayor atenuación de la radiación por las nubes, mientras que valores cercanos a 1 indican una atenuación mínima. Asimismo, se consideraron las series de nubosidad baja y alta del reanálisis ERA5, utilizando el promedio de los cuatro puntos de retícula más cercanos a los puntos de medición. Luego, se calculó la correlación lineal de Pearson entre las series de nubosidad y las series de DUVN a escala mensual para cada trimestre. Las correlaciones significativas se identificaron con un nivel de confianza del 90 %, y se determinó el R^2 para cada caso.

2.2.3 Análisis de la variabilidad de la radiación UV

Con el fin de identificar periodicidades dominantes en las series de DUVN, se utilizó la transformada rápida de Fourier para realizar un análisis espectral (Wilks, 2011). Previo a este proceso, se filtraron las tendencias significativas en los casos correspondientes, ya que Fourier asume que las series son estacionarias. Luego, esta técnica se aplicó a las series de las distintas estaciones en cada trimestre, reteniendo únicamente los primeros $(N-1)/2$ armónicos para N impar y $N/2$ armónicos para N par (dónde N es la longitud de la serie), que son suficientes para capturar la totalidad de la varianza de la serie. Para evaluar las potencias significativas de los espectros de series temporales, se utilizó un modelo autorregresivo de orden cero, asumiendo que los datos siguen un proceso de ruido blanco. Las potencias espectrales se ajustaron multiplicando por el desvío estándar estimado y se compararon con el umbral de significancia definido por 0.1. Los períodos cuya potencia espectral excedió el umbral se consideraron significativos bajo un nivel de confianza del 90 %, lo que indica que la potencia observada no es atribuible al ruido blanco.

Por otra parte, se buscó explorar los posibles forzantes de gran escala que influyeran en la variabilidad de la radiación UV en Argentina mediante un análisis de co-variabilidad entre las series de la DUVN y diversos índices climáticos. Para calcular las correlaciones se trabajó inicialmente con la correlación “directa”, considerando el valor de los índices climáticos correspondientes al mismo trimestre que el trimestre de la DUVN (siendo estos DEF, MAM y SON). A su vez se realizó el cálculo con un desfase en los trimestres de los índices climáticos de 1 a 3 meses, permitiendo investigar posibles impactos diferidos (correlación “lagueada”) de los forzantes climáticos sobre la variabilidad de la DUVN. La correlación entre las series se calculó con el coeficiente de correlación rankeado de Spearman, debido a su carácter no paramétrico, considerando un nivel de confianza del 90 %. Esta medida no requiere suposiciones sobre la distribución de las variables y se basa en el orden de los datos. A diferencia de otras metodologías, Spearman permite identificar relaciones monotónicas entre las variables, independientemente de su naturaleza lineal o no lineal.

Capítulo 3

Control de calidad y selección de datos

En el desarrollo de este capítulo se realiza un análisis de consistencia y calidad de los datos de radiación UV provenientes de diversas fuentes, con el fin de seleccionar las series de datos que se utilizarán en este estudio.

3.1 Control de calidad

La DUVN es una variable que siempre presenta valores positivos. Por lo tanto, para las fuentes de datos utilizadas, se verificó la coherencia de los valores registrados, explorando posibles inconsistencias como valores iguales a cero o negativos. Adicionalmente, se realizó un análisis de valores extremos, definiendo como criterio aquellos valores superiores a tres veces la desviación estándar respecto al promedio. Este procedimiento permitió identificar y, de ser necesario, excluir o revisar valores atípicos que pudieran influir en el cálculo posterior de los valores medios. A su vez, se realizó un análisis de datos faltantes para los distintos puntos de medición, separando cada serie por trimestres, considerando exclusivamente las estaciones DEF, MAM y SON. Se seleccionaron aquellas series que contaran con menos del 10 % de datos faltantes por trimestre.

Para este proceso, se utilizaron estaciones provenientes de diversas fuentes de datos: TEMIS, SMN, EARG y CADIC. Tal como se muestra en la Figura 2.1, antes de aplicar el control de calidad y seleccionar las series, se consideraron localidades ubicadas en 20 puntos geográficos. Cabe destacar que, en algunas de estas localidades, se cuenta con datos provenientes de más de una fuente, como es el caso de TEMIS y SMN (Figura 2.1).

3.2 TEMIS

La base de datos TEMIS tiene disponible información para 14 localidades de Argentina (Figura 2.1). Para realizar la corrección por nubosidad en los datos de dosis UV, TEMIS cuenta con registros del satélite MSG, el cual abarca una región limitada del país que no incluye las 14 localidades mencionadas. A su vez, la cobertura del satélite cambia a lo largo del tiempo debido a la variación en el ángulo cenital del satélite y el ángulo cenital solar, lo que provoca que la región de observación cambie según la hora del día y las estaciones del año, dejando fuera del alcance algunos puntos de medición en determinadas épocas del año y generando que las series estén incompletas. En función de esto, se realizó un análisis de datos faltantes para el período de estudio en las distintas localidades, separando cada caso por estación del año. Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 3.1. De los 14 puntos de medición, se seleccionaron aquellos que contaran con menos del 10 % de datos diarios faltantes por trimestre. Las estaciones seleccionadas fueron: La Quiaca, Salta, Córdoba, Pilar, Ciudad Autónoma

de Buenos Aires (CABA) 1, CABA 2, Lanús, La Plata, Mar del Plata y Quequén. Posteriormente, se analizó la presencia de datos negativos, nulos y outliers, y no se detectaron valores de ninguno de estos tipos. Es decir, todas las mediciones se encontraron dentro de un rango coherente para la variable.

| Localidad | Trimestre | Faltantes (%) |
|---------------|-----------|---------------|
| La Quiaca | DEF | 8.59 % |
| La Quiaca | MAM | 2.99 % |
| La Quiaca | SON | 1.98 % |
| Salta | DEF | 8.59 % |
| Salta | MAM | 2.99 % |
| Salta | SON | 1.98 % |
| Córdoba | DEF | 8.59 % |
| Córdoba | MAM | 2.99 % |
| Córdoba | SON | 1.98 % |
| Pilar | DEF | 8.59 % |
| Pilar | MAM | 2.99 % |
| Pilar | SON | 1.98 % |
| Mendoza | DEF | 74.01 % |
| Mendoza | MAM | 69.67 % |
| Mendoza | SON | 69.67 % |
| CABA 1 | DEF | 2.81 % |
| CABA 1 | MAM | 6.41 % |
| CABA 1 | SON | 2.81 % |
| CABA 2 | DEF | 2.81 % |
| CABA 2 | MAM | 6.41 % |
| CABA 2 | SON | 2.81 % |
| La Plata | DEF | 2.81 % |
| La Plata | MAM | 6.41 % |
| La Plata | SON | 2.81 % |
| Mar del Plata | DEF | 2.81 % |
| Mar del Plata | MAM | 6.41 % |
| Mar del Plata | SON | 2.81 % |
| Quequén | DEF | 2.81 % |
| Quequén | MAM | 6.41 % |
| Quequén | SON | 2.81 % |
| Río Negro | DEF | 74.01 % |
| Río Negro | MAM | 69.67 % |
| Río Negro | SON | 69.67 % |
| Puerto Madryn | DEF | 74.01 % |
| Puerto Madryn | MAM | 69.67 % |
| Puerto Madryn | SON | 69.67 % |
| Río Gallegos | DEF | 100 % |
| Río Gallegos | MAM | 100 % |
| Río Gallegos | SON | 100 % |
| Ushuaia | DEF | 100 % |
| Ushuaia | MAM | 100 % |
| Ushuaia | SON | 100 % |

Tabla 3.1: *Porcentaje (%) de datos faltantes de los valores diarios de DUVN de TEMIS, por localidad y trimestre.*

A continuación, dado que la radiación muestra una notable influencia latitudinal, y teniendo en cuenta la cercanía geográfica de algunas localidades seleccionadas, se calculó la correlación de Pearson entre las distintas series, analizando cada trimestre

por separado e incorporando tanto el valor de la correlación de Pearson como el de R^2 (Figura 3.1). Además, se destacaron aquellas correlaciones significativas bajo un nivel de confianza del 90 %. De esta manera, se agruparon las estaciones cuyo coeficiente de determinación superó el umbral de 0.7. Por un lado, las estaciones de CABA 1, CABA 2, Lanús y La Plata conformaron un grupo. Los otros grupos estuvieron integrados por Córdoba y Pilar, por un lado, y Mar del Plata y Quequén, por el otro. La Quiaca y Salta se consideraron independientes.

Se eligieron como representativas de cada grupo las estaciones de La Plata, Córdoba y Mar del Plata, respectivamente. La Plata y Córdoba fueron seleccionadas por ser las capitales de las provincias de Buenos Aires y Córdoba, mientras que Mar del Plata fue elegida por su relevancia turística debido a su ubicación costera, en particular durante el verano, trimestre en el que la radiación UV alcanza sus valores más altos.

CAPÍTULO 3. CONTROL DE CALIDAD Y SELECCIÓN DE DATOS

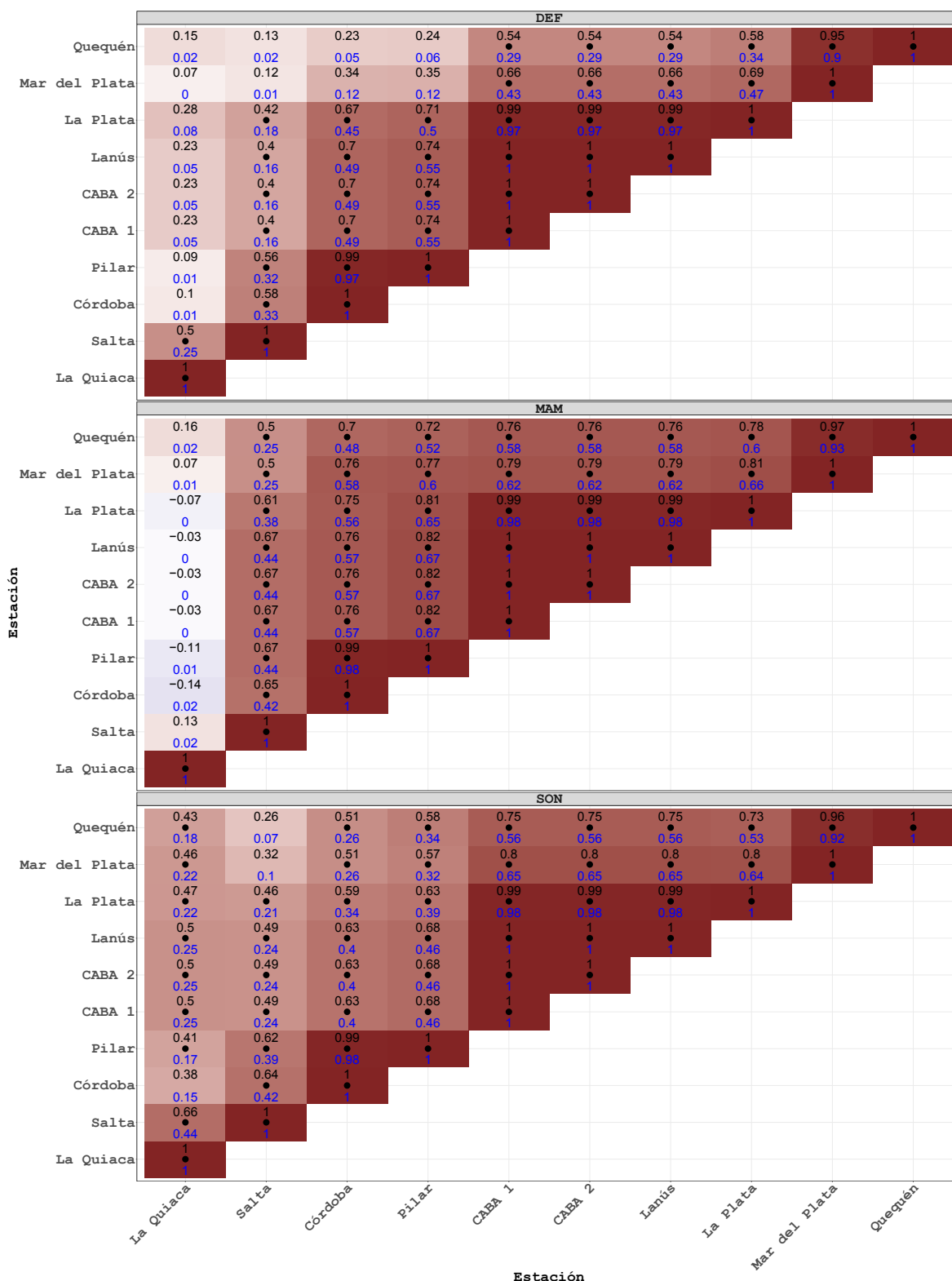


Figura 3.1: Correlación de Pearson entre los distintos puntos de medición, donde cada panel representa un trimestre (DEF, MAM, SON), para el período 2005-2023. En negro se muestran los valores de la correlación y en azul los del coeficiente de determinación para cada caso. Los puntos muestran las correlaciones significativas con un nivel de confianza del 90 %. Los colores más oscuros (claros) indican correlaciones más altas (bajas).

De esta manera, mediante este proceso se redujeron las series redundantes, obteniendo que los puntos de medición seleccionados de la base TEMIS fueron La Quiaca, Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata (Figura 3.2).

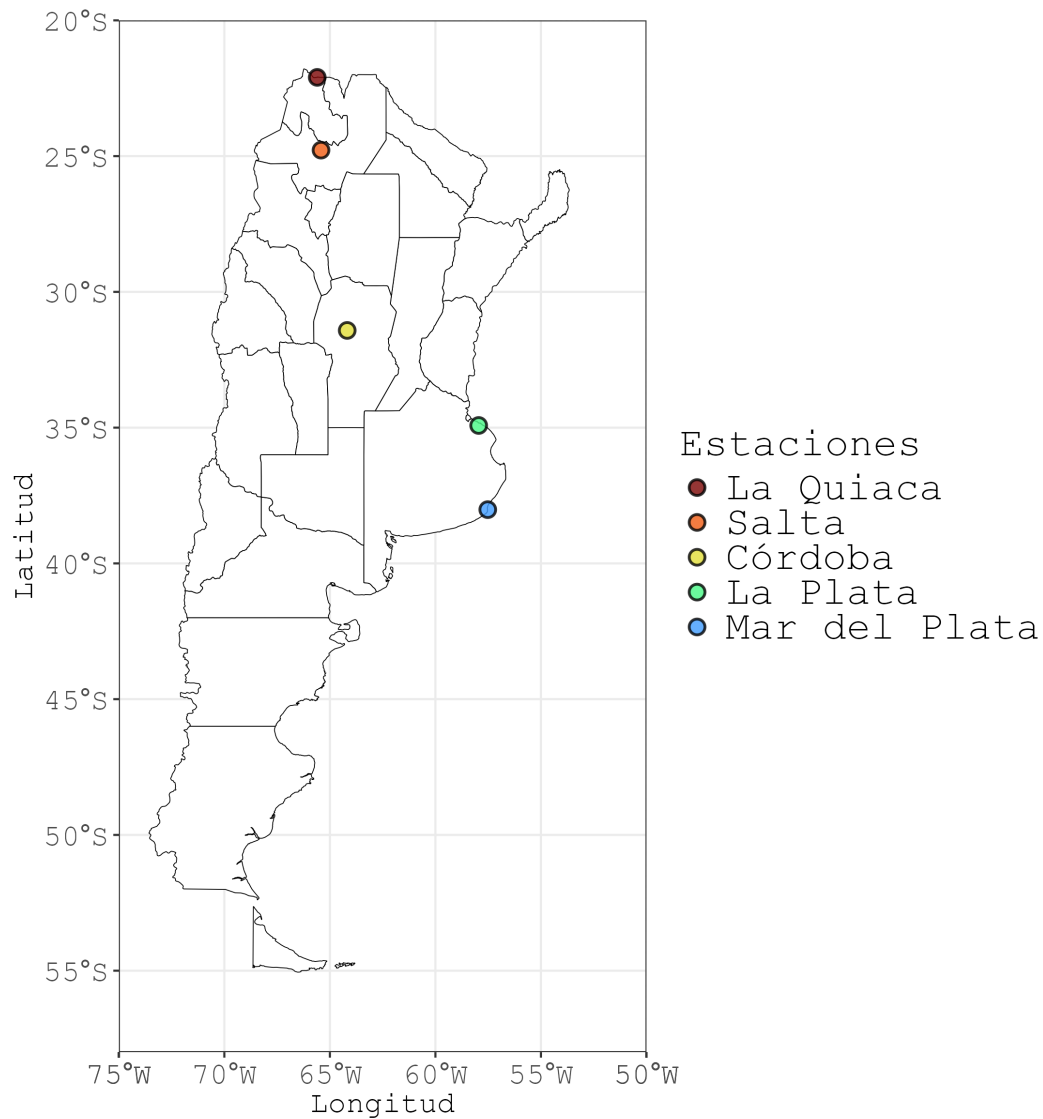


Figura 3.2: Ubicación de los puntos de medición seleccionados de la base de datos TEMIS.

Luego, para completar el control de calidad de los datos de TEMIS, se graficó la variación diaria de la DUVN en las localidades seleccionadas para el período de análisis completo (Figura 3.3). Como se observa en la figura, no se encontraron valores nulos o negativos, ni se identificaron outliers bajo el criterio definido en la Sección 3.1.

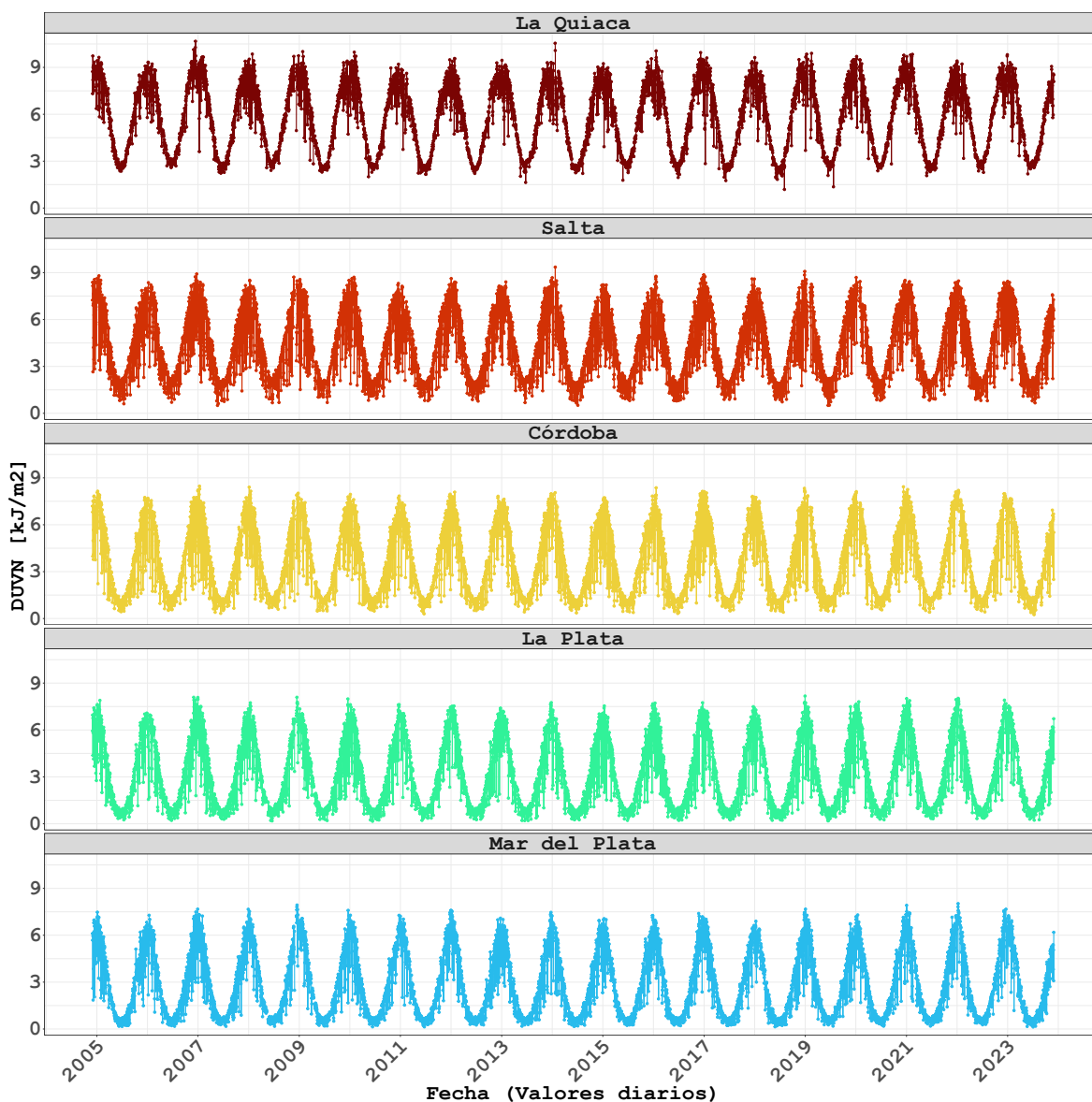


Figura 3.3: Variación diaria de la DUVN [kJ/m^2] de TEMIS para los puntos de medición seleccionados (La Quiaca, Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata) durante el período 2005-2023.

3.3 SMN

Los datos proporcionados por el SMN provienen de diversas estaciones meteorológicas y abarcan períodos de tiempo variables, ninguno de ellos superior a ocho años (Tabla 3.2). Entre las variables relevantes para este estudio, el IUV y la irradiancia eritémica se encuentran disponibles en todas las estaciones, con excepción de La Quiaca, que no incluye datos de irradiancia eritémica. En cuanto a la resolución temporal, los datos se presentan mayoritariamente por minuto, con la excepción de La Quiaca, cuyos registros tienen resolución horaria. Los equipos ubicados en Comodoro Rivadavia, Río Gallegos, Neuquén y Bariloche corresponden a piranómetros de radiación UV-B 1 de

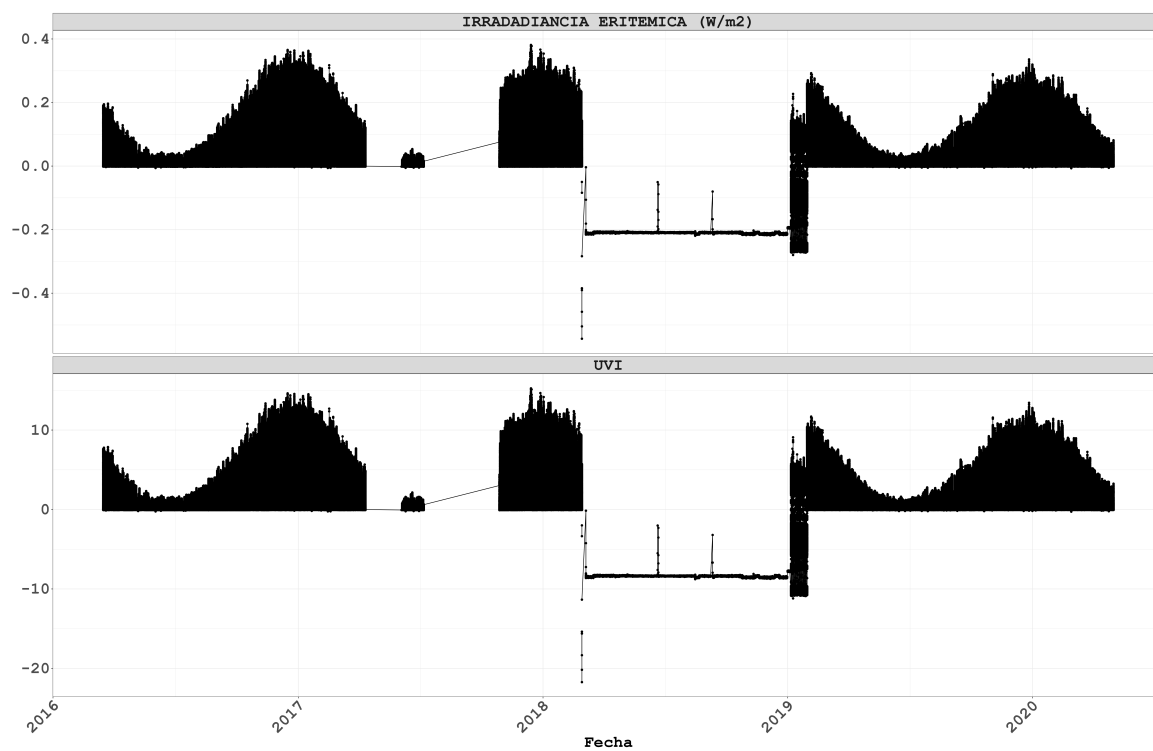
la compañía Yankee Environmental Systems.

| Estación | Período | Resolución | Variables |
|--------------------|------------------|------------|----------------------------|
| La Quiaca | 2019 y 2021-2023 | Horario | UVI |
| Mendoza | 2018-2023 | Por minuto | Irradiancia eritémica, UVI |
| Tucumán | 2017-2018 | Por minuto | Irradiancia eritémica, UVI |
| Pilar | 2017-2022 | Por minuto | Irradiancia eritémica, UVI |
| Buenos Aires | 2018-2023 | Por minuto | Irradiancia eritémica, UVI |
| Neuquén | 2016-2023 | Por minuto | Irradiancia eritémica, UVI |
| Comodoro Rivadavia | 2016-2022 | Por minuto | Irradiancia eritémica, UVI |
| Bariloche | 2016-2020 | Por minuto | Irradiancia eritémica, UVI |
| Río Gallegos | 2014-2020 | Por minuto | Irradiancia eritémica, UVI |
| Ushuaia | 2018-2023 | Por minuto | Irradiancia eritémica, UVI |

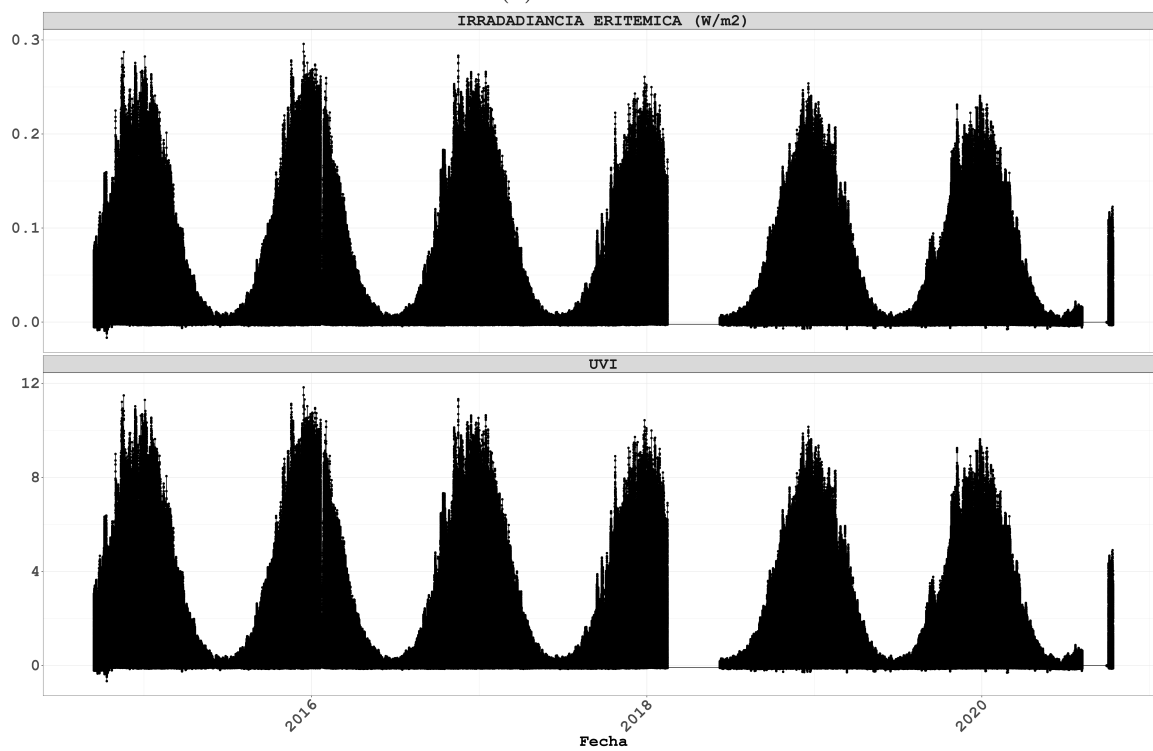
Tabla 3.2: *Datos proporcionados por el SMN. Se incluyen las estaciones de medición, los períodos de datos disponibles, la resolución temporal y las variables.*

Los datos obtenidos en estas estaciones fueron sometidos a calibraciones heterogéneas. Según lo informado por el SMN, a partir de 2018 los datos fueron calibrados utilizando la metodología descrita en: <https://community.wmo.int/en/gaw-reports>. Por el contrario, para los datos registrados con fecha anterior al año 2018, se mantuvo la calibración de fábrica. Además, los datos no incluyen correcciones angulares ni consideran el efecto del ozono o de la nubosidad presente. En general, estas estaciones presentan períodos sin datos confiables, evidenciados por valores negativos o nulos en las series. Como ejemplo, se presentan las series completas de tres estaciones ubicadas en la Patagonia: Bariloche, Río Negro y Ushuaia (Figura 3.4). La figura incluye las series de irradiancia eritémica [W/m^2] y IUV (adimensional) para las estaciones de (a) Bariloche, (b) Río Gallegos y de IUV para (c) Ushuaia.

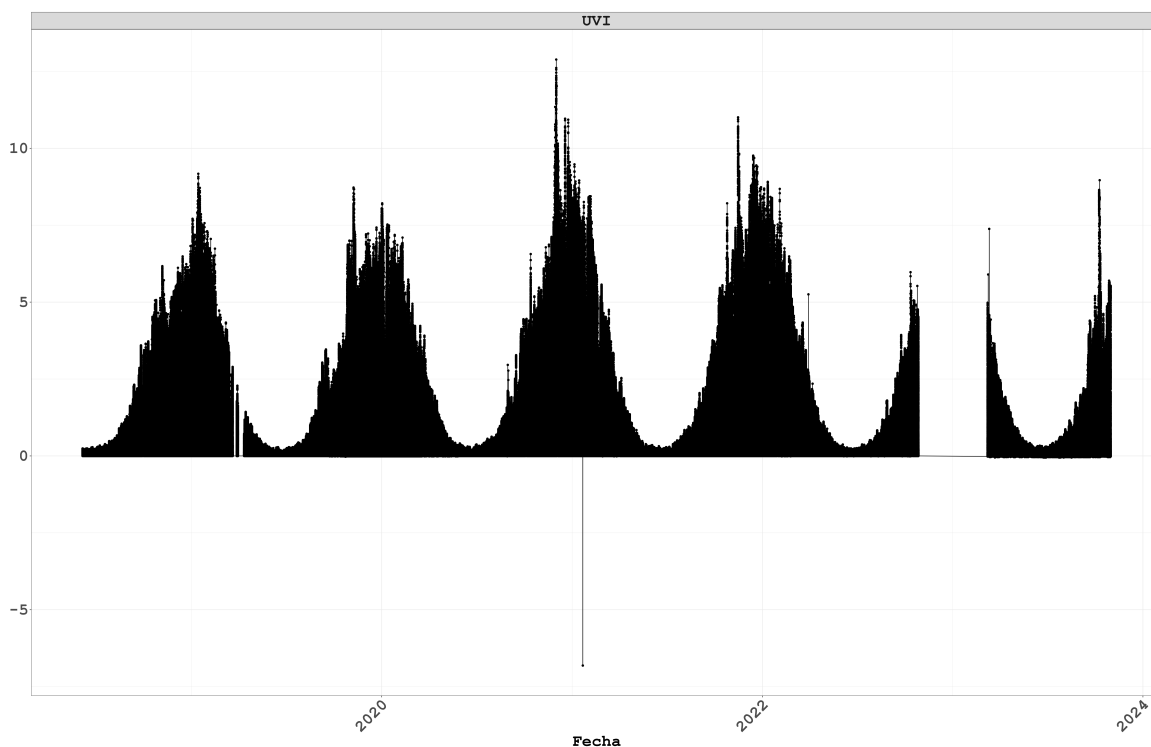
En virtud de los cortos períodos de tiempo, la inconsistencia en determinados períodos, la diferencia entre estaciones en los períodos de disponibilidad de datos y las distintas calibraciones, se decidió excluir el uso de las estaciones del SMN en el presente estudio.



(a) Bariloche



(b) Río Gallegos



(c) Ushuaia

Figura 3.4: Series de IUV (adimensional) correspondientes a las estaciones del SMN: (a) Bariloche (2016-2020), (b) Río Gallegos (2014-2020) y (c) Ushuaia (2018-2023), junto con las series de irradiancia eritémica [W/m^2] para (a) Bariloche y (b) Río Gallegos.

3.4 EARG y EBA

Los datos de las estaciones de superficie ubicadas en Tierra del Fuego, que fueron provistas por EARG y CADIC, también fueron sometidas a un control de calidad. La Figura 3.5 muestra las series temporales completas de DUVN para EARG y EBA. En ambas series se observan variaciones periódicas a lo largo del tiempo. Sin embargo, en la serie correspondiente a EBA se identifica una atenuación en los valores registrados en el período 2015-2021, y un comportamiento contrario a partir del 2021, lo cual podría explicarse por una posible falla en el sensor.

Asimismo, en la estación de EARG se registran valores inferiores en comparación con EBA durante el período de coincidencia de ambas estaciones, a pesar de su cercanía geográfica y de que EARG se ubica más al norte. Este hecho sugiere que la serie de EARG también experimenta atenuación, ya que incluso durante los períodos de mayor atenuación en EBA, los valores de EARG permanecen consistentemente más bajos.

Debido a la atenuación encontrada en ambas series y al corto período con disponibilidad de datos, se decide excluir de este análisis ambas estaciones (EARG y EBA).

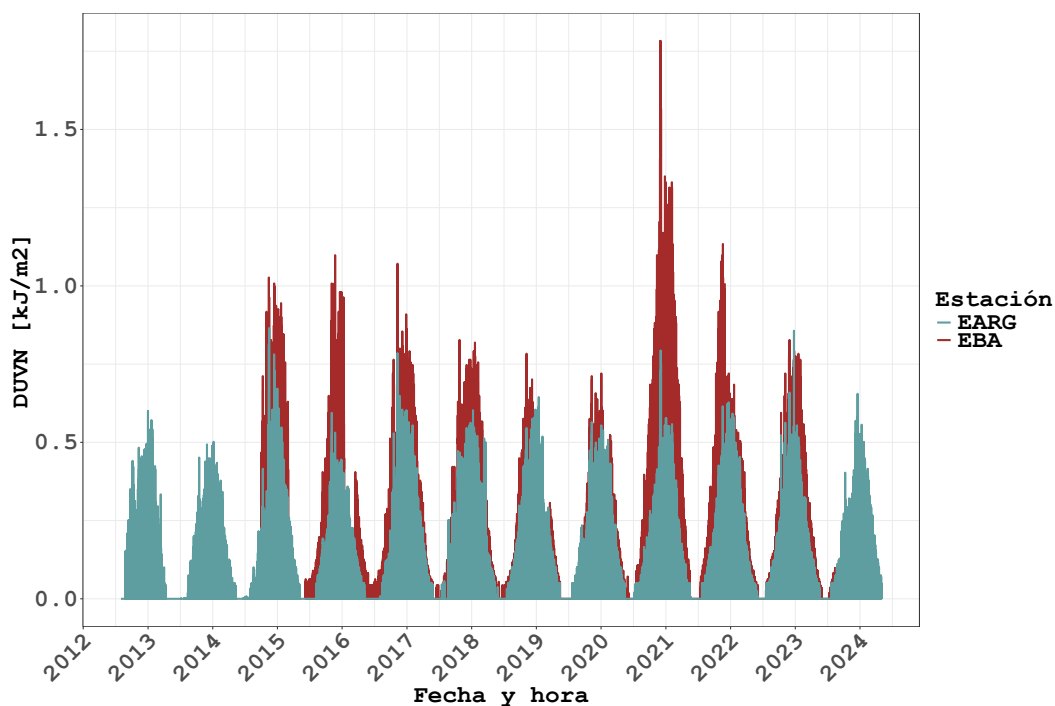


Figura 3.5: Datos horarios de DUVN [kJ/m^2] para las estaciones EARG (celeste) y EBA (rojo).

3.5 Análisis de inhomogeneidades

Para concluir el control de calidad, se analizó la homogeneidad de las series de valores medios estacionales de la DUVN en las localidades seleccionadas tras el proceso de control de calidad e identificación de inconsistencias (Figura 3.2). Los resultados no evidenciaron quiebres estadísticamente significativos, lo que sugiere que las series analizadas son homogéneas a lo largo del período considerado.

Capítulo 4

Caracterización de la radiación UV y el efecto de la nubosidad

En este capítulo se abordan los dos primeros objetivos específicos. El primero consiste en caracterizar las series temporales de la radiación UV en distintas zonas de Argentina, enfocándose en su variabilidad temporal. El segundo analiza la relación entre la nubosidad y la radiación UV en los puntos de estudio seleccionados previamente.

4.1 Análisis climático

4.1.1 Ciclo anual

En primer lugar se llevó a cabo el análisis del ciclo anual de la DUVN, con el fin de identificar su patrón estacional (Figura 4.1). Como es de esperar, durante el verano se observan los valores medios mensuales más altos en todas las estaciones, alcanzando aproximadamente 8 kJ/m^2 en La Quiaca y Salta. En Córdoba, La Plata y Mar del Plata, los valores máximos oscilan entre 6 y 7 kJ/m^2 . Por el contrario, en invierno, las estaciones muestran los valores medios mensuales más bajos del año. La Quiaca y Salta registran mínimos cercanos a 3 kJ/m^2 , mientras que Córdoba, La Plata y Mar del Plata tienen valores mínimos menores a 2 kJ/m^2 . En primavera y otoño, en las localidades de La Quiaca y Salta, la DUVN alcanza valores que oscilan entre 4 y 7 kJ/m^2 . Córdoba, La Plata y Mar del Plata presentan valores promedios entre 2 y 5 kJ/m^2 .

Este comportamiento refleja el patrón estacional de la DUVN, con un riesgo elevado de exposición durante el verano y una incidencia reducida en invierno. En las estaciones de transición, como la primavera y el otoño, se observan fluctuaciones graduales en los valores medios de radiación, que, a pesar de ser más moderadas, pueden alcanzar niveles peligrosos para la salud en algunas localidades. Un ejemplo de lo que sucede en las estaciones de transición lo presentan Nollas *et al.* (2020), quienes elaboraron mapas climatológicos del IUV para Argentina. En particular, el mes de marzo mostró valores medios de IUV superiores a 6 en las localidades ubicadas en las provincias de Buenos Aires y Córdoba, nivel del índice a partir del cual se recomienda el uso de protección durante la exposición solar; mientras que en Salta y La Quiaca se evidenciaron valores medios del IUV mayores a 9, considerados de muy altos a extremos. De manera similar, Cañarte *et al.* (2011) destacan que en CABA el IUV se vuelve crítico entre los meses de septiembre y marzo, alcanzando, por ejemplo, valores de 12-13 en el año 2017. Este resultado sugiere que las localidades ubicadas al norte de CABA en la Figura 4.1 tienen el potencial de presentar valores relativamente altos de DUVN durante los trimestres SON y MAM, los cuales podrían representar un riesgo para la salud.

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN UV Y EL EFECTO DE LA NUBOSIDAD

De acuerdo con estos resultados, y tal como se detalló en la Sección 2.2.1, se decidió excluir el trimestre correspondiente al invierno de los análisis posteriores, dado que el riesgo de exposición solar es menor durante este período en las localidades estudiadas.

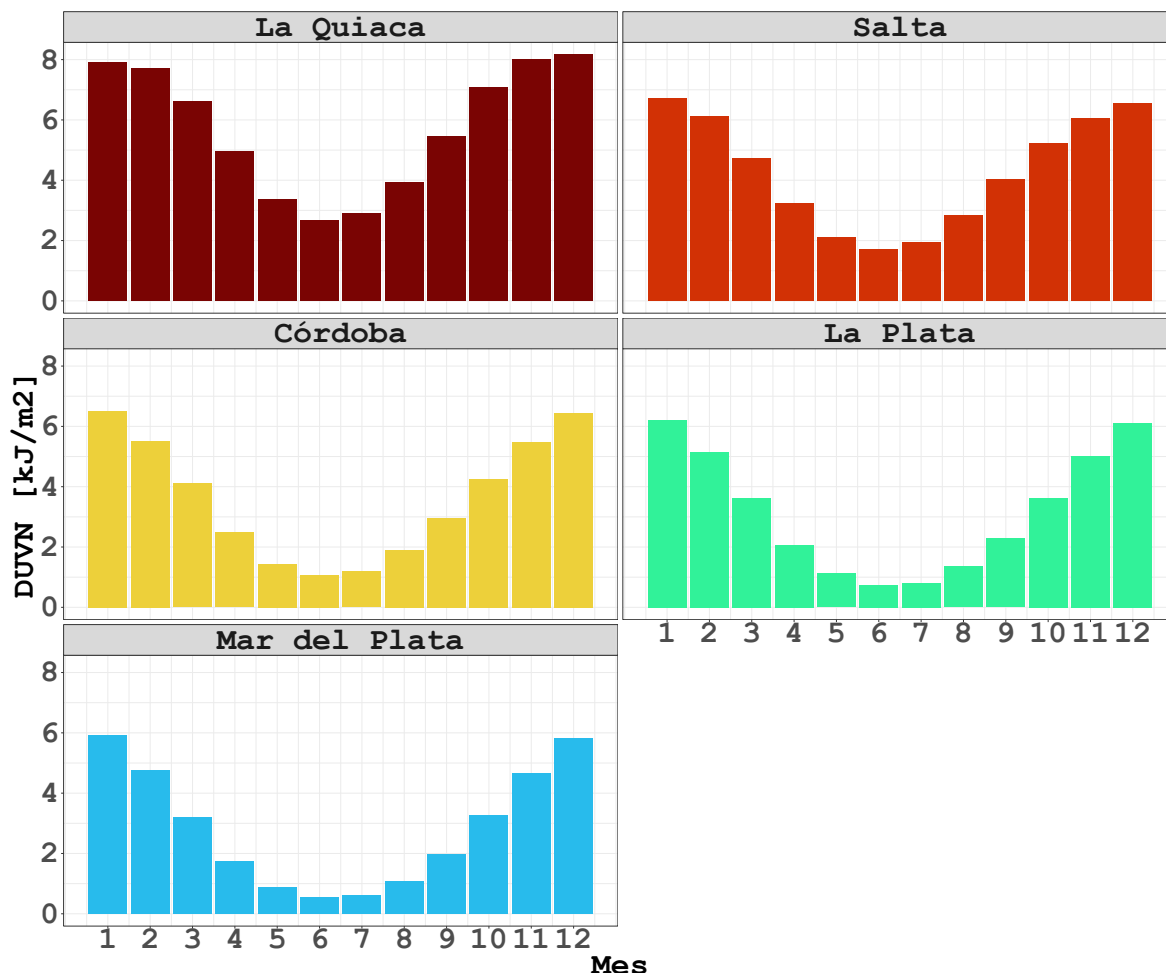


Figura 4.1: Ciclo anual de la DUVN [kJ/m^2] en el período 2005-2023. Los datos provienen de la base satelital TEMIS y se incluyen las localidades de La Quiaca, Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata.

4.1.2 Tendencias

Con el propósito de profundizar en la caracterización de la variable, se llevó a cabo un análisis de las tendencias lineales correspondientes a las series del valor medio estacional de la DUVN durante el período de estudio. Estos resultados se ilustran en la Figura 4.2.

En el trimestre DEF, se observaron tendencias positivas en la mayoría de los puntos de medición, con excepción de La Quiaca, donde se registró una tendencia negativa. Durante el trimestre MAM se identificaron tendencias positivas en Salta y La Plata, mientras que en La Quiaca, Córdoba y Mar del Plata se evidenciaron tendencias negativas. Por último, en el trimestre SON, las tendencias fueron positivas en todas las

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN UV Y EL EFECTO DE LA NUBOSIDAD

estaciones, salvo en Salta, donde se detectó una tendencia negativa. Cabe destacar que la única estación que presentó una tendencia significativa fue Córdoba en el trimestre DEF. Según Calbó *et al.* (2005), existen bajos niveles de certeza respecto al estudio de tendencias en el ámbito de la radiación UV. Esto se debe, en parte, a la disponibilidad de datos, ya que hay poca presencia de registros distribuidos a nivel global y de períodos de tiempo a largo plazo. Asimismo, también se asocia al efecto de diversos factores que afectan el comportamiento de las tendencias de la radiación UV, tales como las tendencias de la cobertura nubosa relacionada con el cambio climático y los cambios en los aerosoles sujetos a erupciones volcánicas o fuentes antropogénicas.

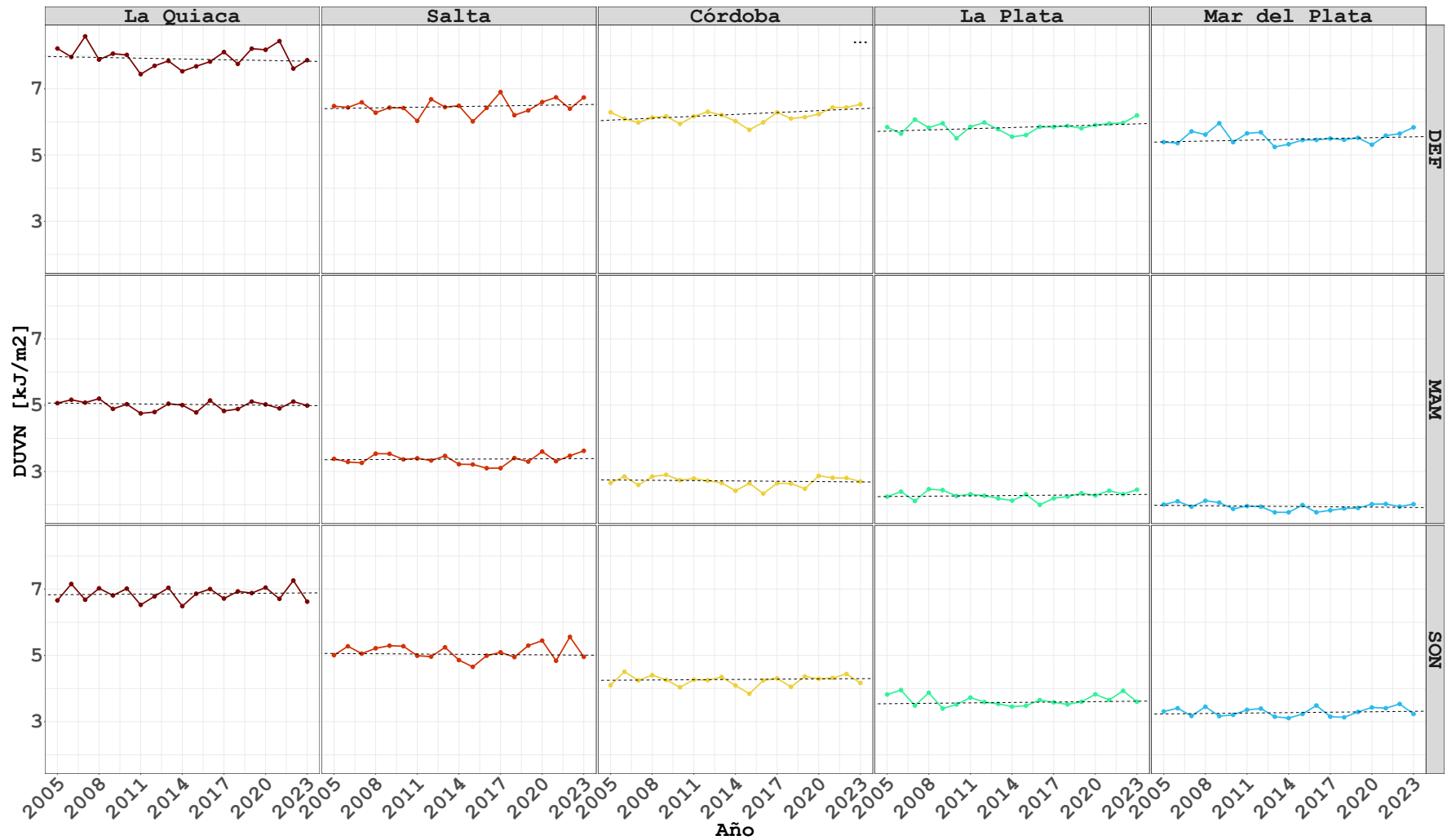


Figura 4.2: Series de DUVN [kJ/m^2] media estacional para el período 2005-2023, para las localidades de La Quiaca, Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata para DEF, MAM y SON. Las líneas punteadas representan las tendencias ajustadas mediante el método de Theil-Sen, mientras que los tres puntos indican tendencias estadísticamente significativas.

4.2 Relación de la radiación UV con la nubosidad

Para comprender con mayor profundidad la interacción entre la nubosidad y la radiación ultravioleta, se exploró la posible atenuación o incremento de la dosis de radiación UV eritémica que alcanza la superficie terrestre por efecto de la nubosidad. Para ello se utilizaron datos estacionales de dosis de radiación UV para cielo despejado y modificada por las nubes, DUVD y DUVN, respectivamente. Dichas series se muestran en la Figura 4.3 para el período 2005-2023. Las mayores diferencias, en magnitud, entre las series de DUVD y DUVN se observan en el trimestre DEF, especialmente en las estaciones de La Quiaca, Córdoba y Salta. En los trimestres MAM y SON se registran comportamientos similares al verano en la mayor parte de las localidades, excepto en La Quiaca que muestra una mayor similitud entre las series de cielo despejado y corregida por nubosidad, posiblemente debido al clima árido característico de dicha localidad.

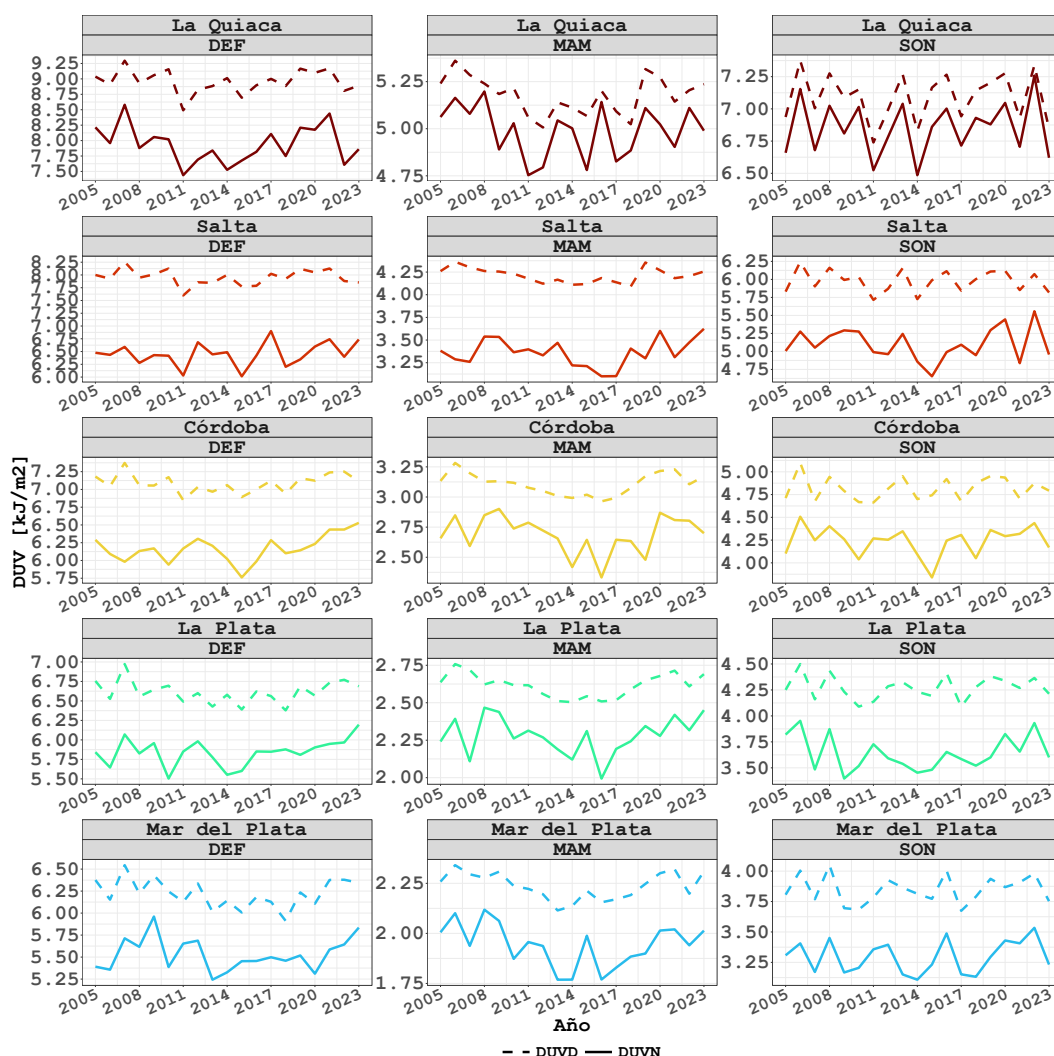


Figura 4.3: Promedio estacional de la DUVD (línea discontinua) y la DUVN (línea continua) para el período 2005-2023. Se incluyen las localidades de La Quiaca, Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata. Los valores están expresados en kJ/m^2 .

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN UV Y EL EFECTO DE LA NUBOSIDAD

En línea con estos resultados, considerando el valor medio del CMF calculado para el período de estudio completo por localidad y temporada (Tabla 4.1), la mayor atenuación de la radiación por parte de la nubosidad se observó en Salta para los tres trimestres, y la menor atenuación para La Quiaca en los trimestres MAM y SON. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Carmona *et al.* (2016) en el atlas de radiación solar, que señala mayores valores de radiación y menor cobertura nubosa en el noroeste de Argentina.

| Localidad | Trimestre | CMF |
|---------------|-----------|------|
| Salta | MAM | 0.80 |
| Salta | DEF | 0.81 |
| La Plata | SON | 0.85 |
| Salta | SON | 0.85 |
| Mar del Plata | SON | 0.86 |
| Córdoba | MAM | 0.86 |
| Mar del Plata | MAM | 0.87 |
| Córdoba | DEF | 0.87 |
| La Plata | MAM | 0.87 |
| Córdoba | SON | 0.88 |
| La Plata | DEF | 0.88 |
| La Quiaca | DEF | 0.88 |
| Mar del Plata | DEF | 0.89 |
| La Quiaca | MAM | 0.96 |
| La Quiaca | SON | 0.97 |

Tabla 4.1: *Valor medio del CMF (ordenados de menor a mayor) en el período 2005-2023 por localidad y trimestre. Los valores cercanos a 0 indican mayor atenuación de la dosis UV por parte de las nubes y valores cercanos a 1 menor atenuación.*

A continuación, para evaluar el impacto de los distintos tipos de nubes en el comportamiento de la radiación UV, se utilizaron las series promedio de nubosidad baja y nubosidad alta, calculadas a partir de los 4 puntos de retícula más cercanos a cada uno de los puntos de estudio. Con estos datos se obtuvieron las correlaciones entre la DUVN y la fracción de cobertura de nubes altas y bajas. En la Figura 4.4 se muestran los valores de correlación y del coeficiente de determinación obtenidos para La Quiaca, Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata. Se incluyen los trimestres (a) DEF, (b) MAM y (c) SON, así como también los valores que resultaron significativos con un nivel del 90 %.

En el trimestre DEF dominan las correlaciones negativas, lo que indica que a mayor cobertura nubosa, mayor atenuación de la DUVN. Las correlaciones más altas, en valor absoluto, se registran para las nubes bajas con valores inferiores a -0.5 para las localidades de Salta, La Plata y Córdoba, seguidas por La Quiaca y Mar del Plata. En contraste, las nubes altas muestran correlaciones menores en módulo, con valores que no superan -0.35 y que, en algunos casos, no resultan significativas. Estos resultados sugieren que, en el trimestre DEF, las nubes bajas tienen un impacto mayor en la

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN UV Y EL EFECTO DE LA NUBOSIDAD

variación de la radiación UV en comparación con las nubes altas, lo cual podría deberse a una mayor capacidad de algunos tipos de nubes bajas para atenuar la DUVN (López *et al.*, 2009). A su vez, coincide con lo encontrado por Stadler *et al.* (2017), quienes observaron que la radiación UV puede alcanzar niveles altos a extremadamente altos en verano para las zonas de CABA y Mar del Plata según el IUV, aunque la presencia de nubes puede reducirla hasta un 80%. No obstante, algunos estudios señalan que dicha atenuación es evidente bajo condiciones de cielos completamente nublados y que en ciertas configuraciones de cielo, pueden no atenuar la radiación en absoluto (Thiel *et al.*, 1997; Estupiñán *et al.*, 1996). En línea con lo anterior, se observa un comportamiento contrario a DEF para los trimestres MAM y SON en determinados puntos de medición: las correlaciones son positivas para las localidades del norte (La Quiaca y Salta), con valores de correlación mayores a 0.4, excepto en Salta para nubes bajas en MAM, donde los valores son cercanos a cero. Este resultado sugiere que una mayor cobertura nubosa incrementa la radiación UV que llega a la superficie terrestre. El mayor valor de correlación en el trimestre MAM se registró en La Quiaca con nubosidad baja, mientras que en Salta predomina el efecto de la nubosidad alta. En SON se observa un comportamiento similar, pero con valores más bajos respecto a los observados en MAM. En las localidades del centro, como Córdoba, La Plata y Mar del Plata, se mantienen las correlaciones negativas, al igual que en DEF, en los trimestres MAM y SON (excepto en Córdoba para la nubosidad alta en SON, donde la correlación es positiva, aunque con un impacto bajo). En el trimestre MAM, las correlaciones más significativas se observan con la nubosidad alta, con valores alrededor de -0.6. Por otro lado, en el trimestre SON, las correlaciones más altas se presentan con la nubosidad baja en La Plata y Mar del Plata, alcanzando valores de -0.6.

Las diferencias observadas entre los tres trimestres en la Figura 4.4 podrían indicar que la relación entre la nubosidad y la DUVN no depende únicamente del tipo y la cobertura de nubes, sino que también está influenciada por otras componentes que varían según la estacionalidad. Calbó *et al.* (2005) destacan que las dificultades para describir los efectos de las nubes en la radiación UV se deben principalmente a la alta variabilidad espacial y temporal de las nubes, así como a la diversidad de tipos de nubes y sus características ópticas. Asimismo, detallan que, aunque el efecto de la nubosidad en la radiación UV suele ser una reducción, existen numerosos casos en los que se registra un efecto de realce, es decir, un aumento de la radiación UV en la superficie terrestre debido a la cobertura nubosa. Por ejemplo, Thiel *et al.* (1997) encontraron una gran dispersión en el efecto de las nubes para valores de cobertura nubosa registrados entre 5 y 8 octavos de cielo, y asociaron esta dispersión a la presencia de diferentes tipos de nubes. Además, hallaron varios casos de realce por parte de las nubes para situaciones con cielos con coberturas menores a 7 octavos.

A su vez, López *et al.* (2009) analizaron el efecto de tres tipos específicos de nubes (estratocúmulus, cúmulus y cirrus) y su relación con el ángulo cenital solar. Los resultados mostraron que las nubes estratocúmulus son las que más atenúan la radiación, lo cual coincide con los resultados obtenidos en este estudio de mayor atenuación por parte de nubes altas para Córdoba, La Plata y Mar del Plata en el trimestre SON. Además, encontraron que las nubes estratocúmulus presentan una marcada dependencia con el SZA, donde un ángulo cenital mayor se asocia con una mayor atenuación.

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN UV Y EL EFECTO DE LA NUBOSIDAD

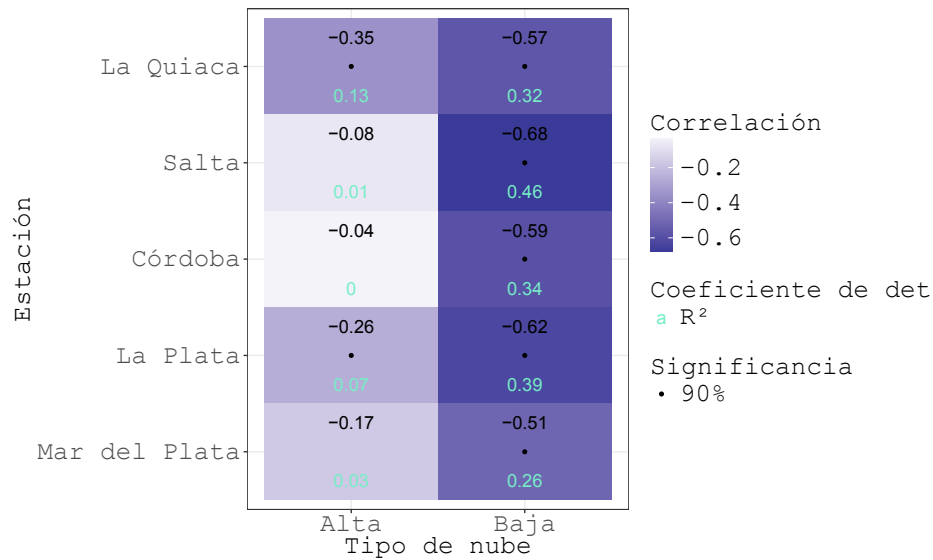
En contraste, observaron que las nubes cúmulus exhibieron un comportamiento más variable, con casos de alta atenuación y, en ocasiones, un incremento de la radiación, posiblemente relacionado con el fenómeno conocido como “nubes fragmentadas”. Para este tipo de nubes no identificaron una dependencia con el SZA. Finalmente, demostraron que las nubes cirrus suelen ser las que menos atenúan la radiación, aunque sí mostraron una dependencia (más débil que en el caso de los estratocúmulos) con el SZA (López *et al.*, 2009).

En las localidades del norte del país, tanto las nubes altas como las bajas presentan un patrón similar: una atenuación de la DUVN durante el trimestre DEF y un efecto de realce durante los trimestres MAM y SON. Cabe destacar que, en todos los casos, el efecto asociado a las nubes bajas resulta más significativo que el de las nubes altas. Estupiñán *et al.* (1996) encontraron que las nubes de tipo cúmulo atenúan hasta el 99 % de la radiación UV-B en casos de cielo totalmente cubierto, pero que para otras configuraciones de cielo se pueden producir aumentos de hasta un 27 % en la radiación UV que alcanza la superficie terrestre, considerando escalas de tiempo menores a 1 hora en cielos parcialmente nublados y con el haz solar directo sin obstrucción. De esta manera, la diferencia entre trimestres para la localidad de Salta podría deberse al hecho de que durante el verano se presenten más casos de cielo cubierto por nubes bajas que logren atenuar la DUVN en mayor medida, mientras que en los demás trimestres se registre el efecto de nubes fragmentadas, donde casos de cielos parcialmente cubiertos terminan realzando la radiación que llega a superficie por medio de reflexiones de irradiancia entre los bordes de las nubes. Respecto a los resultados encontrados en La Quiaca, es preciso subrayar que los mismos pueden verse influenciados por estar situada en una región de topografía compleja, donde los modelos globales (incluido el modelo en que se basa el reanálisis ERA5) no representan de manera adecuada la interacción entre la topografía y la circulación atmosférica (Martínez *et al.*, 2024; Condom *et al.*, 2020, entre otros).

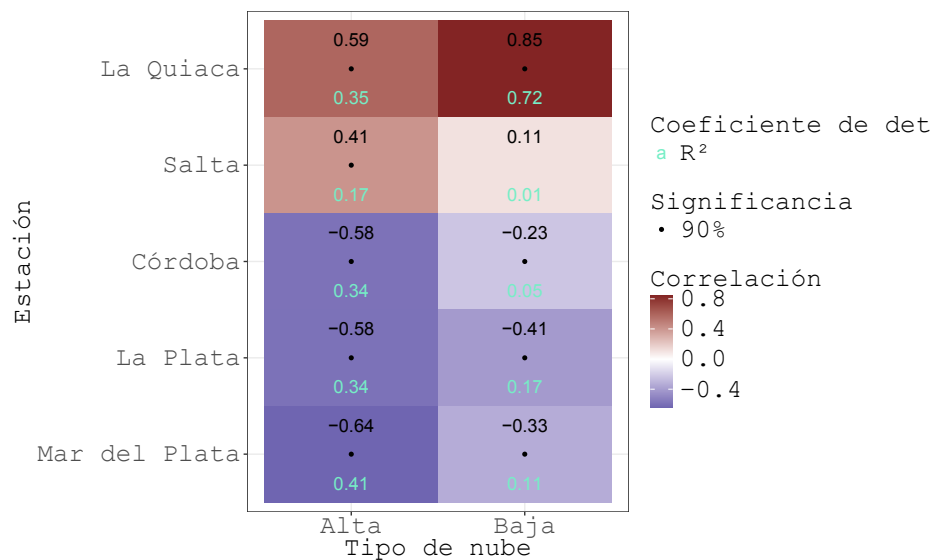
Por su parte, en las mediciones de las localidades ubicadas en el centro del país, se observa un mayor efecto de atenuación de la DUVN por parte de la nubosidad alta durante el trimestre MAM. En contraste, durante los trimestres SON y DEF, este efecto se debilita. Este comportamiento podría estar relacionado con la atenuación de ciertos tipos de nubes altas con el ángulo cenital solar, ya que un mayor SZA se asocia con una mayor atenuación de la radiación UV (López *et al.*, 2009). Por ejemplo, en el trimestre DEF, el ángulo cenital alcanza su valor mínimo, lo cual coincide con los valores de correlación más bajos para la nubosidad alta observados en los tres trimestres. Por otra parte, respecto a la nubosidad baja, en las localidades ubicadas en las provincias de Buenos Aires y Córdoba, las correlaciones negativas más fuertes se observan para DEF, siguiendo SON y MAM. Sin embargo, según López *et al.* (2009), las nubes cúmulus no muestran una relación con el SZA, por lo que la diferencia estacional no podría explicarse por este factor. No obstante, Thiel *et al.* (1997) encontraron que un mayor contenido de agua líquida o un mayor espesor óptico se asocian con una mayor atenuación de la radiación UV que alcanza superficie, resultado que sugiere que las propiedades intrínsecas de cada tipo de nube también podría afectar el efecto que producen las mismas al interactuar con la radiación UV. Dada la complejidad de esta variable, es relevante destacar que los resultados obtenidos en este análisis

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN UV Y EL EFECTO DE LA NUBOSIDAD

corresponden a una única base de datos de nubosidad, por lo que otras fuentes de datos podrían ofrecer resultados diferentes.



(a) DEF



(b) MAM

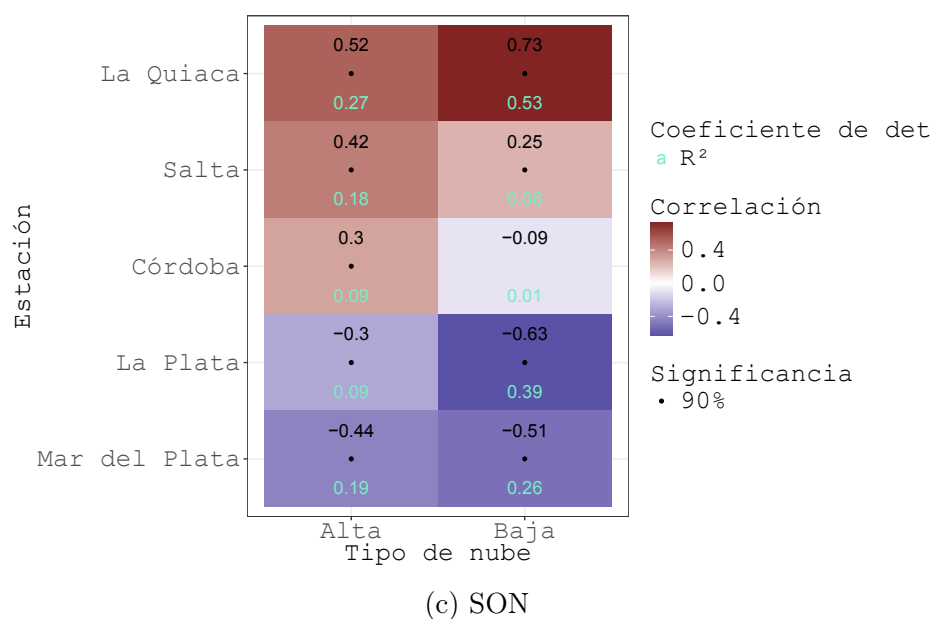


Figura 4.4: Correlación de Pearson entre la DUVN [kJ/m^2] y la fracción de cobertura de nubes altas y bajas en las localidades de La Quiaca, Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata en el período 2005-2023. Se incluyen los trimestres (a) DEF, (b) MAM y (c) SON. Los valores numéricos indican los coeficientes de correlación (negro) y de determinación (verde). Los puntos resaltan las correlaciones significativas al nivel del 90 %.

Capítulo 5

Análisis de la variabilidad de la radiación UV

En este capítulo se desarrolla el tercer objetivo específico de esta Tesis, en el cual se propone explorar los principales forzantes climáticos del sistema océano-atmósfera que puedan contribuir a la variabilidad de la DUVN. Para ello, en primer lugar se estudiaron las periodicidades dominantes de las series por medio de un análisis espectral. Este comportamiento se estudió trimestralmente, lo que permitió identificar los períodos predominantes en cada estación del año. Luego, teniendo en cuenta que la radiación UV que llega a la superficie es influenciada por la nubosidad, se realizó una exploración de forzantes de gran escala a partir del cálculo de correlaciones entre las series de DUVN y diversos índices climáticos vinculados a los principales patrones de variabilidad que podrían influir en las fluctuaciones de la DUVN.

5.1 Análisis espectral

Se realizó un análisis espectral de las series de DUVN, con el objetivo de identificar periodicidades dominantes en el período de estudio, considerando aquellas potencias significativas respecto al ruido blanco con un nivel de confianza del 90 %. Los resultados se muestran en la Tabla 5.1.

Para la localidad de La Quiaca, se observa la predominancia de ciclos cortos en los tres trimestres, con periodicidades comprendidas entre 2 y 3 años. En Salta, los ciclos cortos predominan durante el verano, con periodicidades cercanas a los 2 años; sin embargo, en el otoño se identifican ciclos más largos, con un período que se extiende hasta los 10 años. Además, en Salta no se registran periodicidades significativas en la estación de primavera. En Córdoba se destacan los períodos de 20 años durante el verano, mientras que en el otoño se observan ciclos de entre 10 y 20 años. En primavera, en cambio, no se registran ciclos significativos. Por su parte, en La Plata presenta periodicidades significativas de 5 y 20 años durante el verano, mientras que tanto el otoño como la primavera muestran ciclos significativos cercanos a los 20 años. Finalmente, en Mar del Plata se registran períodos cortos de 2 años en verano y 5 años en primavera, mientras que para el otoño se observa un pico alrededor de los 20 años.

| Localidad | Trimestre | Período (Años) |
|---------------|-----------|----------------|
| La Quiaca | DEF | 2 |
| La Quiaca | MAM | 2/2.86 |
| La Quiaca | SON | 2/2.22 |
| Salta | DEF | 2.22 |
| Salta | MAM | 10 |
| Córdoba | DEF | 20 |
| Córdoba | MAM | 10/20 |
| La Plata | DEF | 5/20 |
| La Plata | MAM | 20 |
| La Plata | SON | 20 |
| Mar del Plata | DEF | 2 |
| Mar del Plata | MAM | 20 |
| Mar del Plata | SON | 5 |

Tabla 5.1: *Períodos (en años) correspondientes a las potencias significativas según un modelo autorregresivo de orden cero, con un nivel de confianza del 90 %, para cada localidad y trimestre.*

La variabilidad de alta frecuencia (entre 2 y 5 años) podría estar influenciada por forzantes que presentan periodicidades similares. Entre ellos se destacan el ENOS, cuyos ciclos pueden oscilar entre 2 y 5 años (Rasmusson *et al.*, 1990), la QBO, con una periodicidad aproximada de 2.4 años (Baldwin *et al.*, 2001) y el SAM, que puede presentar periodicidades significativas en torno a los 2 años (Vasconcellos *et al.*, 2022). De la misma manera, los forzantes de periodicidad decadal, como el TSA, que muestra ciclos de entre 8 y 12 años durante el verano y otoño austral (Enfield *et al.*, 1999), y la PDO (Mantua y Hare, 2002), podrían estar modulando la variabilidad de baja frecuencia (10 a 20 años).

5.2 Relación con índices climáticos

Con el fin de realizar una exploración de posibles forzantes climáticos y considerar tanto la influencia directa como el impacto diferido (lagueado) de los forzantes, se calculó la correlación de Spearman entre los índices climáticos detallados en la Sección 2.1.3 y el valor medio estacional de la DUVN, para distintos desfases de tiempo (Figura 5.1).

En términos generales, la localidad de La Quiaca muestra la menor cantidad de correlaciones significativas con los índices climáticos analizados. En contraste, las demás localidades presentan correlaciones significativas con varios índices en diferentes estaciones del año. De manera destacada, la influencia más significativa corresponde a la PDO y al ENSO en todas las localidades, excepto en La Quiaca. En un segundo plano, los índices de la QBO y el SAM también presentan cierta influencia, siendo la QBO más relevante en Córdoba, mientras que el SAM adquiere mayor importancia en las localidades de la provincia de Buenos Aires.

Para los índices ONI y el MEI.V2, asociados al ENSO, se identificaron correlaciones

negativas en diversas localidades, lo que implica que un evento de El Niño (La Niña) conlleva una disminución (aumento) de la DUVN, posiblemente debido a una mayor (menor) presencia de nubosidad. En Salta, las correlaciones negativas son notorias durante el trimestre MAM, tanto de forma directa como diferida, alcanzando valores de hasta -0.5. En Córdoba estas correlaciones se manifiestan de manera directa y diferida en los trimestres DEF y MAM, con valores cercanos a -0.5. En DEF, la correlación lagueada se observa con una ventana de un mes, mientras que en MAM todas las correlaciones lagueadas resultan ser significativas. En La Plata se observa una influencia directa y diferida en MAM, con correlaciones comprendidas entre -0.4 y -0.6. En Mar del Plata la influencia del ENSO es menor respecto a otras localidades, donde se observó una influencia diferida en el trimestre MAM y una señal directa en el verano, con valores entre -0.4 y -0.5. La precipitación, como indicador indirecto de la nubosidad, permite inferir la presencia de cobertura nubosa que podría atenuar la radiación UV, en concordancia con lo expuesto en el capítulo anterior sobre la relación entre la nubosidad y la DUVN. En este contexto, Cai *et al.* (2020), basándose en la climatología del período 1948-2016, estudiaron las teleconexiones del ENSO en América del Sur, identificando un aumento de las precipitaciones durante la fase cálida en los trimestres DEF y MAM en la región que abarca las localidades de Córdoba, La Plata y Mar del Plata, lo que indicaría más presencia de nubosidad en la zona y una posible atenuación de la DUVN. Esto concuerda con las correlaciones significativas observadas en DEF para Córdoba y Mar del Plata. No obstante, aunque Cai *et al.* (2020) reportaron un aumento más moderado de la precipitación en MAM respecto a DEF, en este estudio las correlaciones más fuertes se observaron en el trimestre MAM, abarcando tanto relaciones directas como diferidas.

El índice PDO se destacó por presentar correlaciones negativas significativas en todas las localidades analizadas, excepto La Quiaca, abarcando los tres trimestres base del estudio. Esto sugiere que una fase positiva (negativa) de la PDO se vincula con una reducción (aumento) de la DUVN. En Salta, este índice constituye la influencia más fuerte, donde las correlaciones (directas y diferidas) fueron significativas únicamente en el trimestre MAM, alcanzando valores de hasta -0.78, coincidiendo con las periodicidades dominantes de 10 años encontradas en el análisis espectral para el trimestre MAM en esta localidad. En Córdoba se observan correlaciones negativas tanto en verano como en otoño, en concordancia con los resultados del análisis espectral, con valores máximos de -0.69. En La Plata y Mar del Plata las correlaciones negativas abarcan los tres trimestres, con relaciones directas y diferidas, situándose entre -0.4 y -0.6, siendo más débiles en Mar del Plata. El análisis espectral concuerda con estos resultados en La Plata para los tres trimestres, pero en Mar del Plata solo para el trimestre MAM. Las correlaciones negativas indican que mayores valores del índice PDO se asocian con menores niveles de DUVN. Según Reboita *et al.* (2021), quienes emplearon una climatología basada en el período 1979–2019, durante la fase positiva de la PDO en años neutros del ENSO, se produce un aumento de la precipitación en el trimestre DEF en las regiones del noroeste y centro de Argentina. Este aumento sugiere una mayor nubosidad que podría atenuar la llegada de radiación UV a la superficie terrestre, en línea con las correlaciones observadas. En MAM, aunque la intensidad de las anomalías de precipitación disminuye respecto a DEF, se mantienen máximos positivos atenuados

en Salta y Mar del Plata, lo que sugiere que la nubosidad sigue limitando la radiación UV. En el trimestre SON, donde las correlaciones significativas se observaron en La Plata y Mar del Plata, el patrón de anomalías de precipitación descrito por Reboita *et al.* (2021) es similar al de DEF, aunque con anomalías aún más débiles.

Entre los índices del Atlántico, el TSA y el SAODI exhibieron correlaciones significativas en primavera y otoño, aunque la influencia de estos índices es débil en comparación con los demás forzantes. En Salta, Córdoba y La Plata, el TSA presenta valores positivos (lo que indicaría que condiciones más cálidas en la región del TSA se asocian a mayores valores de DUVN en las localidades mencionadas) de correlación directa con el trimestre MAM, coincidiendo con las periodicidades dominantes en torno a los 10 años encontradas para las localidades de Salta y Córdoba en dicho trimestre. Por su parte, el SAODI muestra correlaciones positivas en MAM para Salta y Córdoba y directas positivas en SON tanto en La Plata como en Mar del Plata. Sin embargo, Nnamchi *et al.* (2011) encontraron que el mayor impacto del SAODI en las anomalías de precipitación ocurre durante el invierno austral, lo que podría explicar la escasa señal observada, ya que no se incluyó el invierno en este estudio. Por su parte, el TNA tiene una influencia más limitada, con una única correlación significativa diferida para La Plata en el trimestre SON.

El índice SAM evidenció correlaciones positivas significativas, especialmente en localidades del centro del país, como Córdoba, La Plata y Mar del Plata. Las correlaciones positivas indicarían que la fase negativa del SAM se asocia con una reducción en la DUVN, posiblemente debido a un desplazamiento del cinturón de los vientos del oeste hacia latitudes más bajas y un aumento del pasaje de frentes en la región, lo que podría generar nubosidad y reducir la radiación UV que llega a superficie. Estas correlaciones se concentran principalmente en la temporada de verano, extendiéndose a la primavera en el caso de Mar del Plata. En Córdoba y La Plata, el SAM se correlaciona positivamente en el trimestre DEF, siendo la correlación más alta en la relación directa para La Plata, con un valor cercano a 0.6. En Mar del Plata se presentan las correlaciones más intensas, destacándose en verano con una correlación directa de 0.69, pudiendo estar asociado a la periodicidad dominante en torno a los 2 años encontrada para DEF en esta localidad. En concordancia con estos resultados, algunos autores (Silvestri y Vera, 2003; Reboita *et al.*, 2021) identificaron anomalías positivas de precipitación en la fase negativa del SAM, durante años neutros del ENSO, en el trimestre DEF, en la región que abarca las localidades de La Plata y Mar del Plata.

Por su parte, la QBO mostró correlaciones significativas, en determinados trimestres, para todas las localidades estudiadas, excepto Mar del Plata, con una mayor influencia en La Quiaca, Salta y Córdoba. En estas tres localidades se identificaron correlaciones positivas en primavera, mientras que en La Quiaca también se observaron correlaciones negativas en otoño. Las correlaciones positivas sugieren que un aumento en el índice QBO está relacionado con un incremento en la DUVN. Por otro lado, en Salta y La Plata, se registraron correlaciones positivas directas en el trimestre DEF. Estos resultados podrían estar relacionados con las periodicidades dominantes de baja frecuencia encontradas en el análisis espectral para los tres trimestres en La Quiaca y para DEF en Salta. Si bien la QBO se desarrolla en latitudes tropicales, este fenómeno afecta el flujo estratosférico entre los polos, pudiendo afectar la columna de ozono en

latitudes altas (Baldwin *et al.*, 2001). De esta manera, un índice QBO positivo podría estar vinculado a un aumento en la concentración de ozono en el ecuador y una disminución en latitudes más altas, por lo que las correlaciones positivas entre este índice y la DUVN observadas en La Quiaca y Córdoba durante el trimestre SON, o en Salta en el trimestre MAM, podrían explicarse por una reducción en la concentración de ozono en estas latitudes. Esto permitiría que llegue una mayor cantidad de radiación UV a superficie.

Finalmente, no se encontraron correlaciones significativas (con excepción de Salta en SON-SON) entre las series de DUVN y el índice DMI.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA RADIACIÓN UV

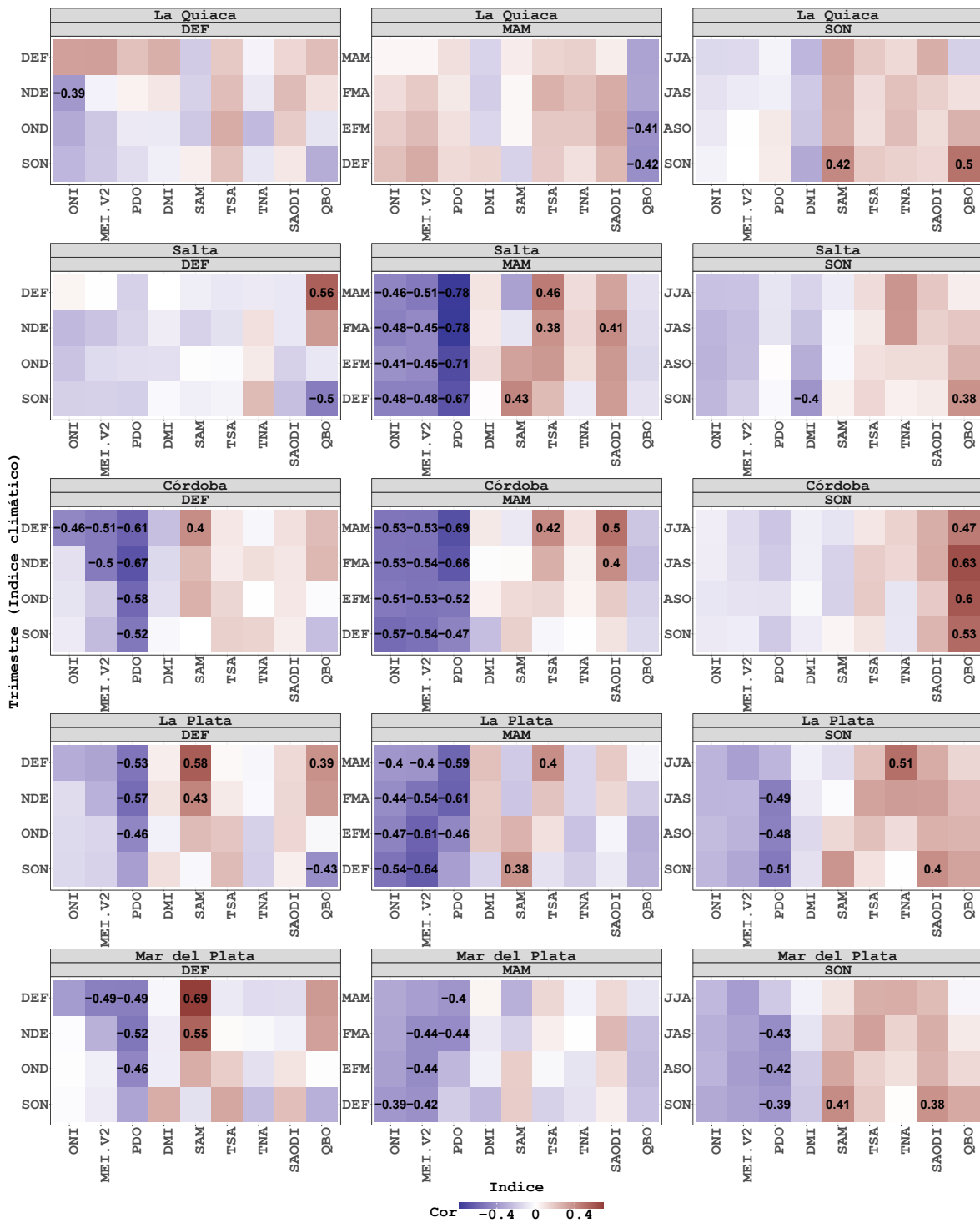


Figura 5.1: Correlación de Spearman entre los índices climáticos (ONI, MEI.V2, PDO, DMI, SAM, TSA, TNA, SAODI y QBO) y la DUVN [kJ/m^2] para el período 2005-2023. Se incluyen las correlaciones directas y lagueadas, con 1 a 3 meses de desfase de los índices climáticos para los trimestres DEF, MAM y SON. Cada una de las tres columnas indica una estación del año diferente y cada una de las cinco filas representa cada una de las localidades analizadas. Se indican con valor numérico únicamente las correlaciones significativas (nivel de confianza del 90%).

Capítulo 6

Conclusiones

En este estudio se analizó la variabilidad temporal de la DUVN en distintas localidades de Argentina, su relación con la nubosidad y con los principales forzantes de gran escala.

Para ello, se realizó un proceso de control de calidad y selección de datos para las tres fuentes disponibles (TEMIS, SMN, EARG). Debido a que dos de las tres fuentes elegidas previamente no pasaron el control de calidad propuesto en esta Tesis, se utilizaron los datos de la base satelital TEMIS en cinco puntos de medición: La Quiaca, Salta, Córdoba, La Plata y Mar del Plata. Posteriormente, se analizó el ciclo anual de la DUVN para cada localidad. Con base en estos resultados, se incluyeron el verano, el otoño y la primavera en el análisis, excluyéndose el invierno debido a su bajo nivel de exposición a la radiación UV. Luego, se estudiaron las tendencias lineales de las series de DUVN. Se encontró que en el trimestre DEF, las tendencias fueron positivas en la mayoría de las estaciones, excepto La Quiaca que presenta una tendencia negativa. En el trimestre MAM, Salta y La Plata tuvieron tendencias positivas, mientras que La Quiaca, Córdoba y Mar del Plata registraron tendencias negativas. En SON, todas las estaciones mostraron tendencias positivas, salvo Salta. Cabe mencionar que sólo se identificó una tendencia estadísticamente significativa en Córdoba durante el verano.

En el análisis de la relación entre la nubosidad y la DUVN, durante el trimestre DEF, se encontró una atenuación de la radiación UV por parte de la nubosidad, especialmente de las nubes bajas, con mayor impacto en localidades como Salta, La Plata y Córdoba. Este mismo efecto fue encontrado en los trimestres de MAM y SON en las localidades del centro del país (Córdoba, La Plata y Mar del Plata), siendo mayor la atenuación por parte de las nubes altas en MAM y de las nubes bajas en SON, lo cual podría estar asociado a la interacción entre distintos tipos de nubes y el ángulo cenital solar. En contraste, en dichos trimestres, para las estaciones del norte del país (La Quiaca y Salta) se encontró un efecto de realce de la radiación UV en presencia de nubosidad, sugiriendo una mayor radiación UV alcanzando la superficie terrestre en presencia de nubosidad. No obstante, es importante señalar que los resultados presentados en este estudio se basan en una única base de datos de nubosidad. Dado que la nubosidad es una variable compleja de medir y representar, los resultados podrían variar al utilizar otras bases de datos (Wu *et al.*, 2012; Yao *et al.*, 2020). Por lo tanto, las discrepancias entre diferentes reanálisis o productos satelitales pueden influir en los resultados obtenidos, lo que resalta la importancia de utilizar diversas fuentes de datos para lograr una comprensión más robusta y precisa. Aunque a nivel global se ha observado que ERA5 representa adecuadamente las distribuciones temporales y espaciales de las nubes (Yao *et al.*, 2020), el efecto de la topografía en la representación de la circulación atmosférica (Martinez *et al.*, 2024) y la escasez de datos en las zonas montañosas (Condom *et al.*, 2020) siguen siendo desafíos para los reanálisis, lo cual podría estar influyendo a nivel local en los resultados de este estudio.

El análisis espectral de las series de DUVN permitió identificar las periodicidades dominantes, con ciclos de 2, 5 y 20 años, dependiendo de la localidad y la estación del año. En La Quiaca, se observó la predominancia de ciclos cortos en los tres trimestres (alrededor de los 2 años). En Salta, los ciclos fueron cortos en el trimestre DEF (alrededor de 2 años) y largos en el trimestre MAM (10 años). En Córdoba predominaron los ciclos largos (10 y 20 años), mientras que en La Plata se identificaron ciclos de 5 años en DEF y ciclos de 20 años en los tres trimestres. Finalmente, en Mar del Plata se detectaron ciclos con un período de 2 y 5 años en DEF y SON, respectivamente y un ciclo prolongado (20 años) en MAM.

En relación con los forzantes climáticos de gran escala, se observaron correlaciones significativas entre la DUVN y diversos índices climáticos. El índice PDO se destacó por presentar correlaciones significativas en todas las localidades analizadas (excepto La Quiaca), evidenciando que una fase positiva de la PDO se asociaría con un aumento de la nubosidad y, por consiguiente, una reducción de la DUVN. En cuanto a los índices vinculados al ENSO (ONI y MEI.V2), se encontró que las fases cálidas (El Niño) se relacionarían con una disminución de la DUVN en todas las localidades, a excepción de La Quiaca, especialmente en el trimestre MAM y, en algunos casos, en el trimestre DEF. El índice SAM mostró una mayor influencia en las localidades del centro del país, particularmente en Mar del Plata, sugiriendo que una fase positiva del SAM, asociada al desplazamiento de las trayectorias de tormentas hacia esa región, reduciría la DUVN debido a un incremento en la nubosidad. Finalmente, se identificaron correlaciones positivas entre la QBO y la DUVN en La Quiaca, Salta, Córdoba y La Plata durante los trimestres DEF y SON, lo que podría estar relacionado con la disminución de la columna total de ozono en estas localidades.

Como líneas de investigación futuras, se propone la realización de estudios más exhaustivos sobre la interacción entre la radiación UV y la nubosidad, incluyendo el análisis de otras fuentes de datos de nubosidad que fortalezcan los resultados. Asimismo, resulta pertinente profundizar en el análisis del impacto en la variabilidad de la DUVN de los diferentes tipos de nubes. Finalmente, se plantea llevar a cabo un análisis dinámico que permita una exploración más precisa de los forzantes climáticos identificados como significativos en el presente estudio, a fin de comprender mejor su posible influencia en la modulación de la DUVN.

Bibliografía

- AF, M. (1987). A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE j*, 6:17–22.
- Baldwin, Mark P and Gray, LJ and Dunkerton, TJ and Hamilton, K and Haynes, PH and Randel, WJ and Holton, JR and Alexander, MJ and Hirota, I and Horinouchi, T and others (2001). The quasi-biennial oscillation. *Reviews of Geophysics*, 39(2):179–229.
- Bilbao, J. y de Migue, A. (2020). Erythemal solar irradiance, uver, and uv index from ground-based data in central spain. *Applied Sciences*, 10(18):6589.
- Bordewijk, J., Slaper, H., Reinen, H., y Schlamann, E. (1995). Total solar radiation and the influence of clouds and aerosols on the biologically effective uv. *Geophysical research letters*, 22(16):2151–2154.
- Cai, Wenju and McPhaden, Michael J and Grimm, Alice M and Rodrigues, Regina R and Taschetto, Andréa S and Garreaud, René D and Dewitte, Boris and Poveda, Germán and Ham, Yoo-Geun and Santoso, Agus and others (2020). Climate impacts of the el niño–southern oscillation on south america. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4):215–231.
- Calbó, J., Pages, D., y González, J.-A. (2005). Empirical studies of cloud effects on uv radiation: A review. *Reviews of Geophysics*, 43(2).
- Cañarte, C., Salum, G., Ipiña, A., y Piacentini, R. (2011). Índice ultravioleta como indicador de riesgo en la piel. *Dermatología Ibero-Americana On line*, pp. 1–26.
- Carmona, F., Orte, F., Rivas, R., Wolfram, E., y Kruse, E. E. (2016). Mapas de radiación solar global de la república argentina a partir del producto syn1-ceres. En *XVII Simposio Internacional SELPER 2016: Geotecnologías, herramientas para la construcción de una nueva visión del cambio global y su transformación para un futuro sostenible*, Puerto Iguazú, Misiones, Argentina.
- Condom, T., Martínez, R., Pabón, J. D., Costa, F., Pineda, L., Nieto, J. J., López, F., y Villacis, M. (2020). Climatological and hydrological observations for the south american andes: in situ stations, satellite, and reanalysis data sets. *Frontiers in Earth Science*, 8:92.
- Enfield, D. B., Mestas-Nuñez, A. M., Mayer, D. A., y Cid-Serrano, L. (1999). How ubiquitous is the dipole relationship in tropical atlantic sea surface temperatures? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4):7841–7848.
- Engelsen, O. (2010). The relationship between ultraviolet radiation exposure and vitamin d status. *Nutrients*, 2(5):482–495.

- Estupiñán, J. G., Raman, S., Crescenti, G. H., Streicher, J. J., y Barnard, W. F. (1996). Effects of clouds and haze on uv-b radiation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D11):16807–16816.
- Fitzpatrick, T. B. (1988). The validity and practicality of sun-reactive skin types i through vi. *Archives of dermatology*, 124(6):869–871.
- Gillett, N. P., Kell, T. D., y Jones, P. (2006). Regional climate impacts of the southern annular mode. *Geophysical Research Letters*, 33(23).
- Hersbach, H and Bell, B and Berrisford, P and Biavati, G and Horányi, A and Muñoz Sabater, J and Nicolas, J and Peubey, C and Radu, R and Rozum, I and others (2023). Era5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present [dataset]. copernicus climate change service (c3s) climate data store (cds).
- Hurtado, S. I., Zaninelli, P. G., y Agosta, E. A. (2020). A multi-breakpoint methodology to detect changes in climatic time series. an application to wet season precipitation in subtropical argentina. *Atmospheric Research*, 241.
- López, M. L., Palancar, G. G., y Toselli, B. M. (2009). Effect of different types of clouds on surface uv-b and total solar irradiance at southern mid-latitudes: Cmf determinations at córdoba, argentina. *Atmospheric Environment*, 43(19):3130–3136.
- Luccini, E., Cede, A., Piacentini, R., Villanueva, C., y Canziani, P. (2006). Ultra-violet climatology over argentina. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D17).
- Lusi, A. R. (2017). Impacto del agujero de ozono sobre la radiación uv en latitudes medias y altas. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas, Licenciatura en Tecnología Ambiental. Año 2017, Páginas: 94.
- Mann, H. B. y Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The annals of mathematical statistics*, pp. 50–60.
- Mantua, N. J. y Hare, S. R. (2002). The pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58:35–44.
- Martinez, JA and Junquas, Clementine and Bozkurt, Deniz and Viale, Maximiliano and Fita, Lluís and Trachte, Katja and Campozano, LENIN and Arias, Paola A and Boisier, Juan P and Condom, Thomas and others (2024). Recent progress in atmospheric modeling over the andes—part i: review of atmospheric processes. *Frontiers in Earth Science*, 12:1427783.
- Nnamchi, H. C., Li, J., y Anyadike, R. N. (2011). Does a dipole mode really exist in the south atlantic ocean? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D15).

BIBLIOGRAFÍA

- Nollas, Fernando Martín and Orte, Facundo and Luccini, Eduardo and Wolfram, Elian and Poggi, María Mercedes and Carbajal Benítez, Gerardo and others (2020). Información sobre radiación solar uv en argentina como base para distintas aplicaciones. Informe técnico, Servicio Meteorológico Nacional.
- Organización Mundial de la Salud -OMS- y otros (2002). Global solar uv index: a practical guide. Technical report, World Health Organization.
- Orte, P. F. (2009). Estudio de la influencia del agujero de ozono y nubosidad sobre la radiación solar uv para la ciudad de río gallegos: balance entre eritema y síntesis de vitamina d sobre sus habitantes. Licenciatura en Tecnología Ambiental, Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Física, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Año 2009, 69 páginas, Residencia: CEILAP – Río Gallegos.
- Orte, P. F., Wolfram, E., Salvador, J., D’Elia, R., Martinelli, C., y Quel, E. (2010). Estudio de la influencia de las nubes sobre la radiación uv en la ciudad de río gallegos, argentina. En *ANALES AFA*, volumen 21.
- Orte, P. F., Wolfram, E. A., Luccini, E. A., D’elia, R. L., Lusi, A. R., Pallotta, J. V., Nollas, F. M., Carmona, F., Papandrea, S. D., Cabezas, M. D., Carbajal Benítez, G., y Mizuno, A. (2022). Red de monitoreo de la irradiancia solar uv-total en argentina “saver-net”. *Meteorológica*, 47(2):e016.
- Rasmusson, E. M., Wang, X., y Ropelewski, C. F. (1990). The biennial component of enso variability. *Journal of Marine Systems*, 1(1-2):71–96.
- Raymond-Lezman, J. R. y Riskin, S. I. (2023). Benefits and risks of sun exposure to maintain adequate vitamin d levels. *Cureus*, 15(5).
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Ferreira, G. W. d. S., Rehbein, A., Drumond, A., da Rocha, R. P., y Souza, C. A. d. (2021). Impacts of teleconnection patterns on south america climate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1504(1):116–153.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on kendall’s tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324):1379–1389.
- Silvestri, G. E. y Vera, C. S. (2003). Antarctic oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern south america. *Geophysical Research Letters*, 30(21).
- Stadler, C., Wolfram, E., Carmona, F., y Orte, F. (2017). Estudio del impacto de la radiación solar ultravioleta en las personas por medio de información de satélite. Trabajo final de Licenciatura en Tecnología Ambiental, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Thiel, S., Steiner, K., y Seidlitz, H. K. (1997). Modification of global erythemally effective irradiance by clouds. *Photochemistry and photobiology*, 65(6):969–973.

- Thompson, D. W., Wallace, J. M., y Hegerl, G. C. (2000). Annular modes in the extratropical circulation. part ii: Trends. *Journal of climate*, 13(5):1018–1036.
- Utrillas, M., Marín, M., Esteve, A. R., Salazar, G., Suarez, H., Castillo, J., y Martínez-Lozano, J. A. (2016). Uver and uv index at high altitude in northwestern argentina. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 163:290–295.
- Vasconcellos, F. C., Mattos-Gava, M. L. L., y Sansigolo, C. A. (2022). Statistical analysis of the relationship between quasi-biennial oscillation and southern annular mode. *Atmósfera*, 35(2):221–235.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*, volumen 100. Academic press.
- Wolfram, E., D’Elía, R., Otero, L., Piacentini, R., y Quel, E. (2004). Analisis de la irradiancia espectral solar uv en superficie medida con un espectro-radiómetro de banda angosta en el ceilap, Buenos Aires. En *ANALES AFA*, volumen 15.
- Wolfram, E. A., Orte, F., Salvador, J., Quiroga, J., D’Elia, R., Antón, M., Alados-Arboledas, L., y Quel, E. (2017). Study of uv cloud modification factors in southern patagonia. En *AIP Conference Proceedings*, volumen 1810. AIP Publishing.
- Wu, W., Liu, Y., y Betts, A. K. (2012). Observationally based evaluation of nwp reanalyses in modeling cloud properties over the southern great plains. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D12).
- Yao, B., Teng, S., Lai, R., Xu, X., Yin, Y., Shi, C., y Liu, C. (2020). Can atmospheric reanalyses (cra and era5) represent cloud spatiotemporal characteristics? *Atmospheric research*, 244:105091.