



Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Programa Doctorado en Energías

Título

“Análisis de la radiación solar espectral ultravioleta en Chile Central”.

Tesis para optar al grado de

Doctor en Energías

LISDELYS GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

CONCEPCIÓN-CHILE
2021



Universidad de Concepción

Facultad de Ingeniería
Programa Doctorado en Energías

“Análisis de la radiación solar espectral ultravioleta en Chile Central”.

Tesis para optar al grado de

Doctor en Energías



LISDELYS GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

Profesor Guía: Dr. David Contreras Pérez
Profesor Co-Guía: Dr. Ana C. Baeza Freer
Dpto. Química Analítica, Facultad de Química
Dpto. de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción

CONCEPCIÓN-CHILE

2021



A mi abuela...

Contenido

AGRADECIMIENTOS	IV
RESEÑA CURRÍCULUM VITAE	V
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
CAPÍTULO 1: Introducción General y Objetivos	1
1.1. Introducción general	1
1.2 Hipótesis	5
1.3 Objetivo General	5
1.4 Objetivos específicos	6
1.5 Estructura de la tesis	6
CAPÍTULO 2: Fundamentos	7
2.1 Declive del ozono estratosférico	7
2.2 Conceptos básicos sobre radiación solar.....	8
2.3 Radiación solar espectral ultravioleta (RUV)	9
2.4 Radiación espectral ultravioleta eritemática (UVER) y otros índices de eritema	9
2.5 Factores que influyen en la radiación solar.....	12
2.5.1 Factores astronómicos	13
2.5.2 Factores atmosféricos (gases, aerosoles y nubes)	15
2.5.3 Otros factores	18

2.6 Componentes de la radiación solar	18
2.6.1 Índice de claridad	19
2.7 Modelación de la radiación solar espectral ultravioleta.....	20
2.8 Aplicaciones de la modelación.	21
2.8.1 Aplicación para construir mapas de exposición solar	21
2.8.2 Aplicación en el tratamiento solar del agua	22
2.9 Bases de datos globales, locales y satelitales.....	24
2.9.1 Calidad de los datos radiométricos	26
2.10 Influencia directa e indirecta de la radiación solar espectral ultravioleta en la salud humana.	27
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1 Área de Estudio, características climáticas y topográficas	30
3.2 Bases de datos globales, locales y satelitales.....	31
3.3 Control de calidad de los datos radiométricos	34
3.4 Influencia directa e indirecta de la radiación solar espectral ultravioleta en la salud humana. 35	
3.5 Estrategias de modelación y validación	36
3.6 Aplicaciones de la modelación	38
3.6.1 Mapas de exposición solar	38
3.6.2 Tratamiento solar de aguas.....	38
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	40
4.1 Ultraviolet erythemal radiation in Central Chile: Direct and indirect implication for public health.	40

4.2 A Study of UVER in Santiago, Chile Based on Long-Term In Situ Measurements (Five Years) and Empirical Modelling	56
4.3 Aplicaciones.....	82
4.3.1 Simple method for spatio-temporal analysis of UVER exposure: A case study for Chile's Mediterranean region.	82
4.3.2 Characterization of solar-simulated ultraviolet radiation for water treatment applications. 101	
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN GENERAL	114
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y PROYECCIONES	131
Referencias bibliográficas	133
Anexos	156



AGRADECIMIENTOS

A mi familia y Lien por siempre creer en mí.

Esta tesis ha sido desarrollada también, en parte, gracias a datos obtenidos a través de distintas redes de monitoreo en línea y satélites, es por ello que quiero reconocer a la agencia aeroespacial americana (NASA), así como el trabajo del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA), Dirección Meteorológica de Chile (DMC), a la Corporación Nacional del Cáncer (CONAC), AERONET y Ernesto Gramsh por mantener activa la red de monitoreo de UVER. Al estimado Boris Friedman (Apogee-Kipp Zonen Distributor-Technologies Omega Ltd) por ofrecer sus equipos de medición desinteresadamente.

Me gustaría dar las gracias a Jorge Jiménez, con quien he tenido el placer de trabajar conjuntamente durante más de 3 años, y cuya ayuda ha sido inestimable, sobre todo en mis comienzos. Junto al profe Adelqui Fissore. A Claudio y Paty por compartir sus consejos cuando todo esto era nuevo para mí. Sin dejar de mencionar a mis profesores guías David Contreras y Ana C. Baeza.

Agradezco al profesor Amauri, Yendry's familia, Masiel y demás integrantes del grupo del IAG en la USP, Brasil. Así como al querido Jorge Rosas por el trabajo a mi lado y compartir lo que sabe. A los demás chicos del Laboratorio de Micrometeorología, IAG, USP.

Por supuesto a Wirmer, Iongel, Ely, Kenzo (Yosvany), Juanfe, Dana, Laura y Juanca por escuchar y ayudar cuando fue necesario.

También a esa gran familia de la PSA, España. Sara, Alex, Sixto, Isa, Eli, Pachy, junto a los chicos que coincidieron en mi estancia Isaac, Kasia, Gulnara y Samira. ¡Ojalá la vida permita otro reencuentro!

A las entidades y proyectos financiadores de este proyecto de tesis: Programa BECAS DOCTORADO NACIONAL de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) y del Gobierno de Chile por la beca Doctoral (Nro. 21170226). Junto a su programa complementario de Gastos Operacionales. A la Dirección de Postgrado de la Universidad de Concepción, a la Dirección del programa Energías y a los proyectos ANID/Iberoamerican Solar Water Treatment Network (UMASOLAR)/Millennium Nuclei on Catalytic Process towards Sustainable Chemistry (CSC)/Solar Energy Research Center, SERC.

A todos, mi agradecimiento.

Uno de los principales objetos de la investigación en cualquier campo del conocimiento consiste en hallar el punto de vista desde el cual pueda verse el asunto en su mayor simplicidad.

Gibbs

RESEÑA CURRÍCULUM VITAE

1. ANTECEDENTES PERSONALES

Nombre: Lisdelys González Rodríguez

Título profesional: Licenciatura en Química

Instituto: Universidad Central Marta Abreu de las Villas

Grado académico: Magister en Gestión Integrada, Medio Ambiente, Riesgos Laborales y Responsabilidad Social Empresarial

Instituto: Universidad de Concepción

2. DOCENCIA

2019 código **999.046**, Sistemas de gestión. Carrera Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción, Chile. Colaborador (Clases Prácticas, Seminarios y Terrenos).

2018, código **999040**, Evaluación de Impacto Ambiental. Carrera Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción, Chile. Colaborador (Seminarios, terrenos)

2011-2014, código **QIM-1**. Química General, en las carreras de Ingeniería Química, Licenciatura en Química e Ingeniería Industrial. Universidad Central de las Villas, Cuba. Profesor principal responsable.

3. INVESTIGACION

3.1. Proyectos de investigación

ANID-FONDECYT REDES

Iberoamerican Solar Water Treatment Network (UMASOLAR) 2019-2021. Estudiante de Doctorado.

ANID-Millennium Science Initiative Program

ANID – Millennium Science Initiative Program- Millennium Nuclei on Catalytic Process towards Sustainable Chemistry (CSC), Chile. NCN17_040. Estudiante de Doctorado.

<https://quimicasustentable.cl/estudiantes/>

ANID-FONDAP

Solar Energy Research Center, SERC Chile Nro. 15110019. Estudiante de Doctorado.

3.2. Publicaciones

3.2.1 Relacionadas directamente con el proyecto de tesis (WoS).

2021 González-Rodríguez L, David Contreras, Ximena Zarate, Yoan Hidalgo-Rosa, Mario Saavedra-Torres, Eduardo Schott, Carolina Baeza, Lien Rodríguez-López, Udayabhaskar Rednam, and Daniel Mondaca: Understanding of the optical/photocatalytic properties of bismuth oxyiodide with reduced graphene oxide. (Enviado a *Journal of Material Science*)

2021 González-Rodríguez, L., Jiménez, J., Rodríguez-López, L. *et al.* Ultraviolet erythral radiation in Central Chile: direct and indirect implication for public health. *Air Qual. Atmos. Health* (2021). <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01037-3>

2021 González-Rodríguez, L., de Oliveira, A. P., Rodríguez-López, L., Rosas, J., Contreras, D., & Baeza, A. C. (2021). A Study of UVER in Santiago, Chile Based on Long-Term In Situ Measurements (Five Years) and Empirical Modelling. *Energies*, 14(2), 368. <https://doi.org/10.3390/en14020368>

2020 Contreras D., Melin V., Pérez-González G., Henríquez A., **González L.** (2020) Advances and Challenges in BiOX (X: Cl, Br, I)-Based Materials for Harvesting Sunlight. In: Naushad M., Rajendran S., Lichtfouse E. (eds) *Green Photocatalysts. Environmental Chemistry for a Sustainable World*, vol 34. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15608-4_10

2019 González-Rodríguez L, Rosas J, Pereira de Oliveira A, Rodríguez L, Contreras D and Baeza C. (2019). Modeling of hourly and daily values of erythemal ultraviolet radiation in Santiago de Chile City. In *ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*. Santiago de Chile. [doi:10.18086/swc.2019.45.04_A](https://doi.org/10.18086/swc.2019.45.04_A)

2017 González-Rodríguez L., Pérez L., Fissore A., Rodríguez-López L., Jimenez J. (2019) Tilt and Orientation of a Flat Solar Collector to Capture Optimal Solar Irradiation in Chilean Latitudes. In: Cárdenas R., Mochalov V., Parra O., Martin O. (eds) *Proceedings of the 2nd International Conference on BioGeoSciences*. BG 2017. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04233-2_19

3.2.2 Otras publicaciones del período (2017-2021)

2021 Rodríguez-López, L., Duran-Llacer, I., **González-Rodríguez, L.**, Cardenas R, Urrutia, R. Retrieving water turbidity in Araucanian lakes (South-Central Chile) based on hyperspectral Landsat imagery. *Remote Sensing (under review)*

2021 Rodríguez-López, L., **González-Rodríguez, L.** Duran-Llacer, I., Cardenas R, Urrutia, R. Spatio-temporal analysis of Chlorophyll in six Araucanian lakes of Central-South Chile from Landsat imagery. *Ecological Informatics. (under review)*

2021 Rodríguez-López, L., **González-Rodríguez, L.**, Cardenas, R. *et al.* Inclusion of ionizing radiation in a mathematical model for photosynthesis. *Radiat Environ Biophys* (2021). <https://doi.org/10.1007/s00411-021-00918-6>

2021 Rodríguez-López L, Cardenas R, **González-Rodríguez L**, Guimaraes M, Horvath J. Influence of a galactic gamma ray burst on ocean plankton. *Astron. Nachr.* 2021;1–4. <https://doi.org/10.1002/asna.202113878>

2020 Rodríguez-López, L., Duran-Llacer, I., **González-Rodríguez, L.**, Abarca-del-Rio, R., Cárdenas, R., Parra, O., ... & Urrutia, R. (2020). Spectral analysis using LANDSAT images to monitor the chlorophyll-a concentration in Lake Laja in Chile. *Ecological Informatics*, 101183. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101183>

2019 Rodríguez-López L, Cárdenas R, **González-Rodríguez L**, Peñate L, Parra O, Urrutia R. Perturbation to aquatic photosynthesis due to high energy muons from cosmic ray bursts due to neutron star mergers. *Astron. Nachr.* 2019; 340:828–833. <https://doi.org/10.1002/asna.201913753>.

2019 Rodríguez-López, L., Parra, O., Cárdenas, R., **González, L.**, Pedreros, P., Karrasch, B., ... & Urrutia, R. (2019). Influence of (extreme) radiation and optical characteristics in physical and biological features of a regulated lake. Web of Conferences, E3S (*Environment, Energy and Earth Sciences*) (Vol. 127, p. 02012). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912702012>

2019 López L.R., Cárdenas R., Parra O., Urrutia R., **González L.**, Martínez R. (2019) On the Subaquatic Light Fields in Lakes of Southern Chile and Their Photosynthetic Potential. In: Cárdenas R., Mochalov V., Parra O., Martin O. (eds) *Proceedings of the 2nd International Conference on BioGeoSciences*. BG 2017. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04233-2_9

2018 Rodríguez-López L, **González-Rodríguez L**, Peñate-Alvariño L, Cardenas R, Parra O (2018). Influence of solar and geomagnetic storms on terrestrial photosynthesis. Web of Conferences, E3S (*Environment, Energy and Earth Sciences*). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186202007>

2018 Rodríguez-López L, Cardenas R, Parra O, **González-Rodríguez L**, Martin O, Urrutia R (2018). On the quantification of habitability: merging the astrobiological and ecological schools. *International Journal of Astrobiology* 1–4. <https://doi.org/10.1017/S1473550418000344>.



RESUMEN

En las últimas décadas, se ha prestado mucha atención a la cantidad de radiación solar espectral ultravioleta (RUV) que llega a la superficie terrestre debido al adelgazamiento de la capa de ozono (O_3) estratosférica. Esto ha provocado que se reciban altos valores de RUV en el hemisferio sur desde la primavera hasta otoño. La RUV es un componente muy energético y su efecto es acumulativo por lo que debe vigilarse al desempeñar un papel importante en la salud ambiental y laboral. Por otro lado, su análisis en la superficie de la Tierra es esencial debido al rápido avance del tratamiento de aguas residuales mediado por nuevos materiales y el espectro solar. Sin embargo; son escasas las mediciones y series de tiempo extensas de RUV, los estudios de dosis recibidas dependiendo de la susceptibilidad individual y la caracterización de su distribución espacio-temporal está lejos de ser completa. Esto particularmente preocupante en Chile, y especialmente en el centro, donde se concentra la mayor población del país.

Este es el motivo por el cual en esta tesis se propuso; cuantificar y modelar la RUV que llega a la superficie terrestre en Chile Central. Con el fin de evaluar su impacto directo e indirecto sobre la salud de las personas, así como proponer herramientas que estimen valores de RUV para su uso en cualquier estudio futuro que requieran datos (variación espacio-temporal, valores promedios horarios o diarios, así como en potenciales aplicaciones) en sitios de Chile. Se trabajó con datos de radiación solar espectral UV-B (280-315nm), mediante la información que brinda el UVER (280-315nm) y se simuló valores de RUV (280-400nm). Se incluyó en el estudio ciudades de Chile ubicadas entre las latitudes $24^{\circ}S$ y $-37^{\circ}S$ como, Antofagasta, Valparaíso, Santiago, Rancagua y Concepción. Por sus características climáticas, demográficas y geográficas se dedicaron dos trabajos a la zona más poblada Chile Central, Santiago de Chile. Se analizó la RUV bajo diferentes condiciones de cielo, épocas del año y distintas escalas de integración temporal. A su vez se obtuvieron medidas de O_3 (troposférico y estratosférico), cobertura de nubes, humedad relativa, temperatura, precipitaciones, velocidad de viento, aerosoles, material particulado (MP_{10}) y óxido de nitrógeno (NO_2). Los datos mencionados, así como las medidas meteorológicas registradas en cada estación de medida, han sido analizados para caracterizar el tipo de atmósfera y su aerosol predominante en cada localidad de estudio.

Se evaluó el impacto directo e indirecto que tiene la radiación espectral UVER en la salud humana. El efecto negativo directo del UVER se analizó a través de cuatro índices de eritema; el índice ultravioleta (UVI), el tiempo de exposición máximo (t_{ery}), la dosis eritemática mínima (MED_{I-IV}) para diferentes fototipos de piel (I-IV) o susceptibilidades de piel y la dosis eritemática estándar (SED). Se tuvo en cuenta la variación estacional de la nubosidad empleando el índice de claridad atmosférico (K_T) y otras características climáticas al evaluar la exposición al UVER en la población chilena. Para conocer el rol indirecto del UVER en la salud humana se analizó la relación entre el UVER y la contaminación atmosférica en la superficie de Santiago. Dado el papel fundamental de la RUV y la falta de mediciones a largo plazo, se desarrolló y validó un set de modelos empíricos (horarios y diarios) que estiman el UVER bajo diversos escenarios en una superficie horizontal, desde mediciones simultáneas de radiación global y UVER durante 5 años (2015-2019) obtenidas en la estación radiométrica del Departamento de Física en la Universidad de Santiago (USACH). El modelo que tuvo el mejor desempeño se empleó como parte de una estrategia para extender el análisis realizado en Santiago a la Región Mediterránea Chilena (RMCh). Así se produjeron dosis de UVER para esta región utilizando el mejor modelo y las observaciones de radiación global obtenidas en 57 estaciones radiométricas durante el año 2019. Las dosis modeladas se

validaron utilizando mediciones terrestres en los sitios de, Gobernación marítima (GOB, Valparaíso), El Colorado (COL, Santiago) y Rancagua (RAN, O'Higgins). Con las series disponibles se desarrolló la distribución espacio-temporal de la exposición a UVER en RMCh a escala mensual y anual. Atendiendo a la posibilidad de conocer el potencial que tiene la RUV, como fuente de energía en el proceso de degradación fotocatalítica de contaminantes en ciudades pobladas de Chile, se simularon valores de RUV en tres ciudades chilenas, Antofagasta, Santiago y Concepción. Se empleó un periodo de 8 años y el modelo de transferencia radiativa UVSPEC/LibRadtran. Se incluyó en las simulaciones parámetros atmosféricos como, la cobertura de nubes, columna de O₃, aerosoles, ángulo solar cenital, latitud y altitud. Se analizó de forma estacional en términos de irradiancia (Wm⁻²) e irradiación (kJm⁻²) los valores de RUV simulados en las tres ciudades de Chile. Ambos enfoques (empírico y transferencia radiativa) con el objetivo de obtener valores de UVER (280-315nm) y RUV (100-400nm) donde no se poseen mediciones.

Las observaciones indican que para alertar a la población sobre los riesgos de la sobreexposición al UVER es necesario utilizar, además del UVI, tres índices más de eritema: SED, MED y t_{ery}. La combinación de estos índices muestra que, en Chile Central, los individuos con tipos de piel III y IV (fototipos de piel más frecuentes en Chile) están expuestos a dosis UVER perjudiciales durante el 46% del tiempo donde el UVI indica que es seguro. Esto ocurre bajo condiciones de nubosidad y antes de las 11:00 LT durante la primavera, el verano y el otoño. De hecho, esta tesis muestra que los cielos nublados minimizan la intensidad del UVER y el correspondiente UVI (2) en la superficie, pero las dosis acumuladas superan los niveles recomendados por OMS/WHO incluso en individuos melano-competente (fototipos III-IV). Enviando el mensaje que una exposición a niveles bajos de UVI (2) parece engañosa y la información reportada por la OMS/WHO de no proteger la piel en estas condiciones necesita reconsiderarse. El O₃ troposférico tuvo una correlación positiva con la UVER, revelando un incremento de 27 ppbv en la concentración de ozono cuando los niveles de UVER eran superiores a 0,10 Wm⁻² (UVI = 4). Por tanto, la RUV entrante que alcanza la superficie de Chile Central llega con la energía suficiente para provocar quemaduras solares y aumentar los niveles de O₃ troposférico desde finales de la primavera hasta principios de otoño.

Para las zonas pobladas no cubiertas por la red solar chilena, los valores horarios y diarios de radiación solar espectral (UVR y UVER) pueden estimarse mediante los modelos desarrollados en este trabajo. Los modelos empíricos que estiman los valores horarios y diarios de UVER teniendo en cuenta las condiciones de cielo (K_T), muestran un buen desempeño para la RMCh. Se presentan aquí datos del espectro solar (entre 250 y 4000 nm) con 1 nm de resolución espectral para cielo claro y nublado. La RUV-simulada mensual mediante el LibRadtran muestra similitud con las simulaciones de RUV que hace la herramienta en línea Explorador Solar en la ciudad de Antofagasta. Con los valores estimados (UVER y RUV) mediante las técnicas de modelación fue posible conocer la distribución espacio-temporal a escala mensual y anual del UVER a través de la región mediterránea chilena y sugerir que es posible el tratamiento solar de aguas en las ciudades de Antofagasta, Santiago y Concepción empleando la RUV como fuente de energía. Contribuyendo con dos herramientas que estiman valores de radiación solar espectral ultravioleta para su uso en cualquier estudio futuro que requiera datos sobre UVER o RUV (variación espacio-temporal, valores promedios horarios o diarios, así como otras potenciales aplicaciones) en sitios de Chile.

En esta tesis se aportó al conocimiento de (a) exposición solar según susceptibilidad individual por tipo de piel (Capítulo 4, Resultados 4.1, 4.2), (b) influencia indirecta de la RUV sobre la formación y descomposición de contaminantes urbanos fotosensibles (Capítulo 4, Resultado 4.1); (c) creación y aplicación de modelos empíricos y de transferencia radiativa para obtener datos de UVER y RUV en ciudades pobladas de Chile (Capítulo 4, Resultados 4.2 y 4.3.2), (d) obtención de mapas mensuales, estacionales y anuales de la exposición al UVER así contar con una climatología sencilla, disponible y validada del UVER en Chile Central (Capítulo 4, Resultado 4.3.1), y (e) aplicación de explotar el potencial de la RUV como fuente de energía para el tratamiento de aguas en ciudades pobladas (Capítulo 4, Resultado 4.3.2).



ABSTRACT

In recent decades, much attention has been paid to the amount of solar spectral ultraviolet radiation (UVR) reaching the Earth's surface due to the thinning of the stratospheric ozone layer (O₃). This has resulted in high UVR values being received in the southern hemisphere from spring through fall. UVR is a very energetic component and its effect is cumulative so it should be monitored as it plays an important role in environmental and occupational health. On the other hand, its analysis at the Earth's surface is essential due to the rapid advancement of wastewater treatment mediated by new materials and the solar spectrum. However; measurements and extensive time series of UVR are scarce, studies of doses received depending on individual susceptibility and the characterization of its spatio-temporal distribution is far from complete. This is particularly worrying in Chile, and especially in the center, where the largest population of the country is concentrated.

This is the reason why this thesis proposed to quantify and model the UVR reaching the earth's surface in Central Chile. In order to evaluate its direct and indirect impact on people's health, as well as to propose tools to estimate UVR values for use in any future studies that require data (spatio-temporal variation, hourly or daily average values, as well as in potential applications) at sites in Chile. We worked with UV-B spectral solar radiation data (280-315nm), using the information provided by the UVER (280-315nm) and simulated UVR values (280-400nm). The study included Chilean cities located between latitudes 24°S and -37°S, such as Antofagasta, Valparaíso, Santiago, Rancagua and Concepción. Due to its climatic, demographic and geographic characteristics, two studies were dedicated to the most populated area of Central Chile, Santiago de Chile. UVR was analyzed under different sky conditions, times of the year and different time scales of integration. Measurements of O₃ (tropospheric and stratospheric), cloud cover, relative humidity, temperature, precipitation, wind speed, aerosols, particulate matter (PM₁₀) and nitrogen oxide (NO₂) were obtained. The aforementioned data, as well as the meteorological measurements recorded at each measurement station, have been analyzed to characterize the type of atmosphere and its predominant aerosol at each study location.

The direct and indirect impact of UVER spectral radiation on human health was evaluated from the point of view of negative effects. The direct negative effect of UVER was analyzed through four erythema indices; the ultraviolet index (UVI), the maximum exposure time (tery), the minimum erythema dose (MEDI-IV) for different skin phototypes (I-IV) and the standard erythema dose (SED). Seasonal variation of cloudiness using the atmospheric brightness index (K_T) and other climatic characteristics were taken into account when assessing the UVB exposure of the Chilean population. To understand the indirect role of UVR on human health, the relationship between UVR and surface air pollution in Santiago was analyzed. Given the fundamental role of UVR and the lack of long-term measurements, a set of empirical models (hourly and daily) estimating UVER under various scenarios on a horizontal surface was developed and validated from simultaneous measurements of global radiation and UVER for 5 years (2015-2019) obtained at the radiometric station of the Physics Department at the University of Santiago (USACH). The best performing model was employed as part of a strategy to extend the analysis performed in Santiago for the Mediterranean Region of Chile (MRCh). Thus, UVER doses for the region using the best model and global radiation observations obtained at 57 radiometric stations during 2019 were produced. The modelled doses were validated using ground measurements at the sites of, Gobernación marítima (GOB, Valparaíso), El Colorado (COL, Santiago) and Rancagua (RAN, O'Higgins). With the available series, the spatio-temporal distribution of UVR exposure in MRCh at monthly and annual scales was developed. In order to determine the potential of UVR as an energy source in the process of

photocatalytic degradation of pollutants in populated cities of Chile, UVR values were simulated in three Chilean cities, Antofagasta, Santiago and Concepción. An 8-year period and the UVSPEC/LibRadtran radiative transfer model were used. Data from the solar spectrum (between 250 and 4000 nm) with 1 nm spectral resolution for clear and cloudy skies are presented here. Atmospheric parameters such as cloud cover, O₃ column, aerosols, zenith solar angle, latitude and altitude were included in the simulations. The simulated UVR values in the three Chilean cities were analyzed seasonally in terms of irradiance (Wm^{-2}) and irradiance (kJm^{-2}). Both approaches were used to obtain values of UVER (280-315nm) and UVR (100-400nm) where no measurements are available.

The observations indicate that in order to alert the population to the risks of UVER overexposure it is necessary to use, in addition to the UVI, three more erythema indices: SED, MED and t_{ery} . The combination of these indices shows that, in Central Chile, individuals with skin types III and IV (most frequent skin phototypes in Chile) are exposed to harmful UVER doses during 46% of the time where the UVI indicates that it is safe. This occurs under cloudy conditions and before 11:00 LT during spring, summer and fall. In fact, this thesis shows that cloudy skies minimize UVER intensity and the corresponding UVI (2) at the surface, but cumulative doses exceed WHO/WHO recommended levels even in melano-competent individuals (phototypes III-IV). Sending the message that a low UVI (2) exposure seems misleading and the WHO/WHO reported information of not protecting the skin under these conditions needs to be reconsidered. Tropospheric O₃ had a positive correlation with UVR, revealing a 27 ppbv increase in ozone concentration when UVR levels were above 0.10 Wm^{-2} (UVI = 4). Thus, incoming UVR reaching the surface of Central Chile arrives with sufficient energy to cause sunburn and increase tropospheric O₃ levels from late spring to early autumn.

For populated areas not covered by the Chilean solar network, hourly and daily values of spectral solar radiation (UVR and UVER) can be estimated using the models developed in this work. The empirical models that estimate the hourly and daily values of UVER taking into account the sky conditions (KT), show a good performance for the Chilean Mediterranean region. The monthly UVR-simulated monthly UVR using LibRadtran shows similarity with the UVR simulations made by the online tool Solar Explorer in the city of Antofagasta. With the estimated values (UVER and UVR) using the modelling techniques, it was possible to know the spatio-temporal distribution at monthly and annual scale of the UVER throughout the Chilean Mediterranean region and to suggest that it is possible to use solar water treatment in the cities of Antofagasta, Santiago and Concepción using UVR as an energy source. Contributing with two tools that estimate solar spectral ultraviolet radiation values for use in any future study that requires data on UVER or UVR (spatio-temporal variation, hourly or daily average values, as well as other potential applications) at sites in Chile.

This thesis contributed to the knowledge of (a) solar exposure according to individual susceptibility by skin phototype (Chapter 4, Results 4.1, 4.2), (b) indirect influence of UVR on the formation and decomposition of photosensitive urban pollutants (Chapter 4, Result 4.1); (c) creation and application of empirical and radiative transfer models to obtain UVR data in populated cities of Chile (Chapter 4, Results 4.2 and 4.3.2), (d) obtaining monthly, seasonal and annual maps of UVR exposure in order to have a simple, available and validated climatology of UVR in Central Chile (Chapter 4, Result 4.3.1), and (e) application of exploiting the potential of UVR as an energy source for water treatment in populated cities (Chapter 4, Result 4.3.2).

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. (a) Evolución en el tiempo de la tasa de mortalidad por melanomas malignos de la piel a nivel nacional. (b) Tasa de cambio de mortalidad entre los años 2000 y 2006 en las regiones de Chile Central. Elaboración en base a Ministerio de Salud, Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS). Fuente <https://deis.minsal.cl/>. 2
- Figura 2. (izquierda) Área del agujero de O₃ y (derecha) columna mínima de O₃ en el HS. Fuente: COPERNICUS/ECMWF <https://atmosphere.copernicus.eu/ozone-monitoring>. 7
- Figura 3. Espectro electromagnético. 9
- Figura 4. Valores espectrales del coeficiente de acción eritemático $\epsilon(\lambda)$ propuestos por (CIE, 2002). ... 10
- Figura 5. Espectro de emisión solar siguiendo el propuesto por ASTM G173-03 para radiación directa y global en una inclinación de 37°. La curva de línea negra representa la radiación solar al tope de la atmósfera (I_{TOA}) y el área naranja es la radiación que llega a la superficie terrestre. Los valles que se observan se deben a la absorción por parte de diferentes componentes atmosféricos (Vapor de agua, O₃, CO₂). Líneas verticales violeta y naranja representan los límites de la banda UV y VIS respectivamente. 13
- Figura 6. (a) Movimiento de la Tierra alrededor del Sol. y (b) representación del ángulo cenital solar (SZA, solar zenith angle). Fuente: NREL 15
- Figura 7. Representación del O₃ estratosférico global correspondiente al 6 de abril, 2021 con ampliación de Suramérica. Las zonas coloreadas en amarillo, naranja y rojo muestran valores altos de O₃, mientras que las zonas verdes y azules muestran valores bajos. Fuente: COPERNICUS/ECMWF <https://atmosphere.copernicus.eu/>. 16
- Figura 8. (izquierda) Representación de aerosol atmosférico modelado en el sistema integrado de predicción de ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) correspondiente al día 3 de julio, 2021. Las zonas coloreadas en amarillo, naranja y rojo muestran valores altos de ozono, mientras que las zonas azules muestran valores bajos. Fuente WHO, <https://public.wmo.int/>. (arriba derecha) Concentración de masa de aerosol en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de orgánicos, nitrato, sulfato, NH₃ y Cl⁻. Fuente (Carbone et al., 2013) y (abajo derecha) fotografía de niebla fotoquímica sobre Santiago metropolitano. 16
- Figura 9. Degradación fotocatalítica de Oxamyl (plaguicida) empleando dióxido de titanio (TiO₂) en una planta piloto ubicada en Plataforma Solar de Almería (37.05°N, 2.21°O, 100masl). Concentración de Oxamyl en función del tiempo del experimento (arriba) y de la energía acumulada (abajo). La energía solar UV a lo largo del experimento también se muestra. 18
- Figura 10. Componentes de la IG incidente sobre un colector solar en una superficie inclinada. 19
- Figura 11. Espectro de emisión solar siguiendo el propuesto por ASTM G173-03 para radiación directa y global en una inclinación de 37°. La curva de línea azul representa la IG y el área naranja es la radiación

que llega a la superficie terrestre. Líneas verticales representan la máxima absorción ($\lambda_{\text{máx}}$) reportada por diversos materiales con el referente TiO_2	23
Figura 12. Evolución de la fracción diaria (24 hrs.) de aerosoles secundarios (en %) en las Condes. Los resultados se muestran para todo el año (barras negras), así como para las estaciones fría (verde) y cálida (roja). Fuente de referencia: (Menaes et al., 2020).	28
Figura 13. (izquierda) Evolución trianual del Percentil 99 de las concentraciones de O_3 troposférico en la Región Metropolitana, 2003-2018, Fuente: SINCA - MMA 2019. (derecha) O_3 troposférico modelado en el sistema integrado de predicción de ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) correspondiente al día 4 de julio, 2021. Las zonas coloreadas en amarillo, naranja y rojo muestran valores altos de O_3 , mientras que las zonas verdes y azules muestran valores bajos. Fuente WHO, https://public.wmo.int/	29
Figura 14. (a) Ubicación del área de estudio en Chile, con (b) distribución espacial de las estaciones radiométricas localizadas en la zona central de Chile y perfil topográfico y (c) clasificación de zonas climáticas Köppen-Geiger para el área de estudio. Los shapefile fueron obtenidos en el Ministerio de Bienes Nacionales, Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE, http://www.ide.cl/).	31
Figura 15. Instrumentos radiométricos ubicados en el techo del edificio del Departamento de Física en la USACH con vista hacia el poniente y hacia el oriente, al fondo, Cerro San Ramón. Fuente: http://ambiente.usach.cl/uv/santiago.html	32
Figura 16. Media UVER acumulada y dosis MED I y IV, según la hora y para cada mes del año; Santiago de Chile.....	116
Figura 17. Variación horaria mensual de O_3 troposférico, promedio horario de UVER, UVI y O_3 troposférico, variabilidad anual de condiciones meteorológicas y medioambientales en Santiago, Chile durante 2015-2018.....	117
Figura 18. Comparación del UVER con las concentraciones troposféricas de O_3 y NO_2 empleando valores horarios del período 2015-2018.	118
Figura 19. Distribución estacional de los valores medios diarios mensuales de UVER para todas las condiciones cielo, despejado, parcialmente despejado, parcialmente nublado y nublado observados durante 2015-2019 en Santiago.....	119
Figura 20. Gráfico de contorno de los valores medios horarios mensuales de UVER para (a) todas las condiciones de cielo, (b) despejado, (c) parcialmente despejado, (d) parcialmente nublado y (e) nublados observados durante 2015-2019 en Santiago.....	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tasa de mortalidad por melanomas malignos de la piel en Chile Central (por cada 100.000 hab).	3
Tabla 2. Escala de exposición solar propuesta por la OMS (WHO, 2002) y categoría de exposición según EPA (EPA, 2020).	10
Tabla 3. Límites de exposición de la piel y los ojos a la RUV. Fuente: (ICNIRP, 2004)	11
Tabla 4. Límite de energía, características típicas por (Vanicek and Frei, 2005), y MED para diferentes fototipos de piel definidos por (Fitzpatrick, 1988).	12
Tabla 5 Posición de bandas para algunos semiconductores. Adaptado de (Malato et al., 2009)	24
Tabla 6. Bases de datos radiométricos y variables meteorológicas con resolución horaria.	24
Tabla 7. Estaciones radiométricas seleccionadas que miden IG en Chile central.	33
Tabla 8. Estaciones radiométricas seleccionadas que miden UVER en Chile central.	34
Tabla 9. Parámetros estadísticos para los valores diarios de UVER medido en Santiago de Chile (2015-2018).	115

CAPÍTULO 1: Introducción General y Objetivos

1.1. Introducción general

En las últimas décadas, se ha prestado mucha atención a la cantidad de radiación solar espectral que llega a la superficie terrestre debido al adelgazamiento de la capa de ozono (O_3) estratosférica y al rápido avance del tratamiento de aguas residuales mediado por nuevos materiales y el espectro solar. La mayor parte de la radiación solar se emite en el rango de “onda corta”, es decir, entre las longitudes de onda 280 nm y 2500 nm. Donde se distingue la radiación ultravioleta (RUV, 280-400 nm), visible (VIS, 400-700 nm), e infrarrojo (IR, 700-3000 nm). Dentro de la RUV se reconocen además tres sub-rangos: UV-C (100-280 nm), UV-B (280-315 nm) y UV-A (315-400 nm) (Madronich Sasha, 1993). La denominada UV-C, es absorbida completamente en la atmósfera por el O_3 estratosférico. Conjuntamente son fuertemente afectadas por la concentración de O_3 la UV-B y UV-A (Mckenzie and Matthews, 1991) y por las condiciones climáticas y ambientales particulares de cada región. En la actualidad es de gran interés el conocimiento de la RUV, por lo que se estudian tanto su aplicación beneficiosa en diversos procesos fotoquímicos (Malato et al., 2016), (Serrano et al., 2017), como los efectos perjudiciales sobre diversos materiales (Urrejola et al., 2016), (Cogulet et al., 2016) y la salud humana (Rivas et al., 2015), (Miguel Rivas et al., 2017).

Efectos adversos en la salud humana por exposición directa a la RUV incluyen daños en el ADN de las células de la piel (Ravanat et al., 2001), envejecimiento acelerado de la piel (Battie et al., 2014), cataratas (Wang et al. 2012; Delcourt et al. 2014), cánceres de queratinocitos (Whiteman et al. 2016) y cáncer de melanoma (Rivas et al. 2014b). Según estimaciones del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) una disminución del 1% de O_3 estratosférico, podría aumentar un 0.5% los casos de cáncer. Este efecto adverso reconocido especialmente en zonas donde la capa de O_3 se ha agotado, lo que incluye a Chile (Rivas and Rojas, 2018). El efecto de la RUV en la piel humana suele basarse en el estudio de la radiación ultravioleta eritémica (UVER). La UVER representa un 17% de UV-A y un 83% de UV-B (Miguel et al., 2012) en la superficie de la Tierra. Se calcula mediante la irradiancia solar UV-B integrada espectralmente ($Wm^{-2}nm^{-1}$) en la superficie y ponderada con la curva del espectro de acción del eritema estándar por la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) (McKinlay, A.F. and Diffey, 1987). Se asocia frecuentemente con otros índices de eritema, como el índice UV (UVI) y la dosis mínima eritémica (MED) y dosis mínima estándar (SED). El UVI se basa en el espectro de acción eritemático y sirve como indicador de la exposición aguda a niveles elevados de RUV (Fioletov et al., 2010), mientras las MED y SED señalan la dosis más baja de UVER que causará eritema/inflamación o enrojecimiento de la piel (Harrison and Young, 2002) para cada fototipo de piel. La clasificación de fototipos más utilizado es la de Fitzpatrick (Fitzpatrick, 1988). Reconocida como la clasificación cutánea más empleada para evaluar el riesgo de quemaduras solares mediante la evaluación de la sensibilidad al sol. Varía desde una piel muy clara (fototipo cutáneo I) hasta una piel negra (fototipo cutáneo VI). Se atribuye a la cantidad de melanina presente en la piel, las personas con pieles oscuras tienen más melanina que los individuos de piel clara. La melanina es un pigmento natural que protege la piel en entornos con mucha radiación solar (Hearing, 2008; Solano, 2020).

A nivel mundial, la incidencia de cáncer de piel por melanoma ha ido en aumento constante y rápido (Nikolaou and Stratigos 2014; de Vries et al. 2016), y es mayor en los países sudamericanos que en los

tropicales (de Vries et al., 2016). La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, <https://www-dep.iarc.fr/>) estimó que el número de muertes por cáncer de piel o melanoma en Chile fue de 4.62 para el período 1955-2016. También ha mostrado que la tasa de incidencia estimada de melanoma en piel para Chile durante el 2018 fue de 2,5 por 100.000 habitantes (IARC, 2021). Lo anterior se ha visto representado con gran variación a lo largo del país en varios estudios (Alonso et al. 2010); (Rivas et al., 2011); (Rivas et al. 2017); (Rivas et al. 2020). Según American Cancer Society, comúnmente el riesgo de contraer este tipo de cáncer se incrementa al envejecer. Al momento del diagnóstico, la edad promedio de las personas es de 65 años. Pero el melanoma no es poco común incluso entre las personas menores de 30 años. De hecho, es uno de los cánceres más comunes en los adultos jóvenes (especialmente en mujeres jóvenes). En Chile resulta más común en hombres que en mujeres donde se da cuenta de un promedio de 462 fallecimientos por melanoma y otros tumores malignos por año, entre 2016 y 2019 (ver Anexo I). Cifra que guarda relación a que en la última década se ha duplicado el número de fallecidos con cáncer a la piel en el país, llegando a más de cuatro mil, donde 54% de ellas corresponde a hombres.

Uno estudio en particular, realizado entre los años 1997-2016 por el Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS, <https://deis.minsal.cl/>) muestra un leve incremento ($p < 0.05$) en la tasa de mortalidad por melanoma maligno de la piel a nivel nacional (Figura 1^a). La tasa de mortalidad por melanoma observada corresponde al número de defunciones por melanoma maligno de la piel (causas CIE-10:C43 de la base de datos del Ministerio de Salud) según región de residencia por cada 100.000 habitantes. Durante el año 2016 se alcanzó el segundo valor más alto del periodo (1,14 por cada 100.000 habitantes para el total nacional). Ese año para hombres la tasa fue 1.23 y 1.06 en las mujeres. Como resultado principal muestra que 10 regiones de Chile han visto aumentada su tasa de mortalidad en el periodo y 6 superaron la tasa nacional el 2016. Dentro de las regiones que registran mayor índice de mortalidad se encuentran Antofagasta, Valparaíso y Metropolitana. Así en el Centro del país, 3 de las 4 regiones presentan un alza en la tasa de mortalidad por melanomas malignos de la piel (Figura 1b). Ñuble no posee registros por lo que no incluye resultados en el estudio. Si a esto le agregamos que la expectativa de vida de la población seguirá creciendo en los próximos años, es posible que estas cifras también se sigan incrementando.

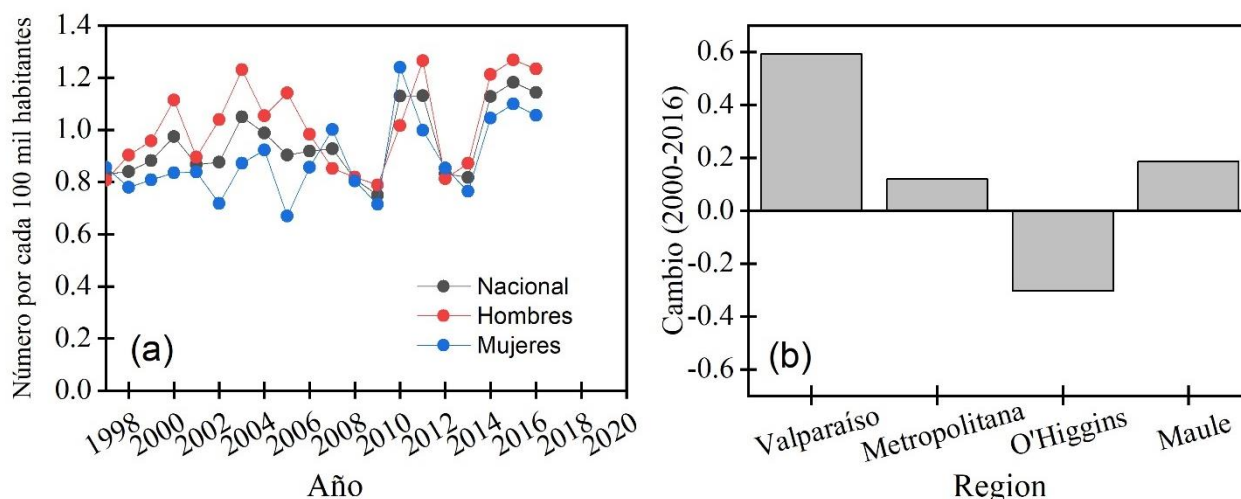


Figura 1. (a) Evolución en el tiempo de la tasa de mortalidad por melanomas malignos de la piel a nivel nacional. (b) Tasa de cambio de mortalidad entre los años 2000 y 2016 en las regiones de Chile Central. Elaboración en base a Ministerio de Salud, Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS).

Fuente <https://deis.minsal.cl/>.

La Tabla 1 muestra la comparación de los resultados durante el 2000 y 2016 por el Ministerio de Salud (MMA, 2020).

Tabla 1. Tasa de mortalidad por melanomas malignos de la piel en Chile Central (por cada 100.000 hab).

Región Central de Chile	2000	2016	Cambio
Valparaíso	1.088	1.682	0.592
Metropolitana	0.988	1.108	0.120
O'Higgins	1.382	1.079	-0.303
Maule	1.622	1.809	0.187
Ñuble	-	-	-

Diversas variables geográficas y ambientales como la altitud, latitud, la concentración en la columna de ozono, el clima y la nubosidad inciden en la acción biológica de la RUV (Parker, 2021). Se ha demostrado que la interacción entre RUV y diversos contaminantes troposféricos tiene efectos negativos sobre la piel (Baudouin et al., 2002; Abolhasani et al., 2021). Estudios realizados por Li et al. (2017) encontraron que cambios significativos en la intensidad de la RUV a nivel del suelo alteraron la calidad del aire en la ciudad de Nanjing, China. Otro estudio por (Wilson et al., 2019) informa que los efectos negativos sobre la salud humana dependerán del equilibrio entre el impacto de la RUV y la reducción de la calidad del aire. Se conoce que la RUV influye en las reacciones fotoquímicas de producción de O₃ troposférico (Hodzic and Madronich, 2018). Este gas altamente reactivo constituye uno de los principales componentes del smog en ciudades contaminadas. La exposición diaria al O₃ a nivel del suelo en ciudades está asociada con un mayor riesgo de muerte, según (Vicedo-Cabrera et al., 2020). Los hallazgos, basados en datos de más de 400 ciudades en 20 países de todo el mundo, muestran que más de 6.000 muertes cada año se habrían evitado en las ciudades seleccionadas si los países hubieran implementado estándares más estrictos de calidad del aire (Vicedo-Cabrera et al., 2020). Otros efectos negativos de la exposición a altas concentraciones de O₃, incluyen la reducción de la biomasa (Ambasht and Agrawal 2003), el aumento del riesgo de mortalidad prematura (Bell et al. 2006), o estrés oxidativo en la piel (He et al. 2006; Fuks et al. 2019). Según Fuks et al. (2019) este gas, al entrar en contacto con la superficie de la piel, modifica sus componentes reparadores y acelera la producción de radicales libres, que acaban oxidándola. Esta piel debilitada es mucho más vulnerable al daño genético producido por el efecto acumulativo de la RUV. Lo que hace que el riesgo de desarrollar cáncer de piel sea mayor en ciudades contaminadas como Santiago de Chile. Esta metrópoli urbana ubicada en Chile Central destaca históricamente por problemas de calidad del aire debido a los altos niveles de contaminantes fotoquímicos, que incluyen al O₃ troposférico (Rubio et al. 2004; Gramsch et al., 2016^a; Seguel et al. 2020). Así la alta prevalencia (Sabatini-Ugarte et al. 2018) e incremento actual en la incidencia del cáncer cutáneo en Chile, (Rivas et al., 2020) pudiese ser la consecuencia de la agresividad del medio ambiente contra la piel. En este sentido, la radiación solar no sólo supone un riesgo para la salud debido al impacto directo de la exposición a la RUV, sino que un efecto indirecto adicional que afecta negativamente a la salud humana es la formación de O₃ troposférico a nivel del suelo.

Dado el aumento de los problemas relacionados con la exposición a la RUV en Chile (Alonso et al. 2010); (Rivas et al., 2011); (Rivas et al. 2017); (Rivas et al. 2020), (MMA, 2020) han sido incorporadas a la red

solar mediciones espectrales. La herramienta en línea “Explorador solar”, <http://solar.minenergia.cl/espectros> ha incorporado estimaciones de radiación espectral, UV-B, UV-A, VIS e IR. También se han producido mapas con climatologías de la RUV (Cordero et al., 2018). Pero, estos modelos y mapas se concentran desde Antofagasta hacia el norte. Dejando fuera la mayor parte del territorio chileno, incluyendo la región central donde se concentra la mayor población y recibe altos valores de RUV. Por lo tanto, dado que los datos disponibles sobre la exposición al UVER son espacial y temporalmente limitados en Chile, deben realizarse esfuerzos en esta dirección. Las principales instituciones involucradas en el monitoreo de la RUV son la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) (DMC, 2021), la Corporación Nacional del Cáncer (CONAC) y la Universidad de Santiago (USACH). Actualmente, la DMC mantiene 29 estaciones miden el UVER and UVI y 22 de ellas miden la banda UV-B. Mientras la USACH y CONAC realizan mediciones de UVI en algunas localidades del país, las cuales pueden ser consultadas en <http://ambiente.usach.cl/uv/index.html>. Sin embargo, existen pocos estudios sobre las dosis eritémica recibidas en los períodos de exposición de los trabajadores y las susceptibilidades individuales (Zemelman et al., 2002), (Rivas et al., 2014b), (Rivas et al., 2015), así como una distribución espacio-temporal de exposición al UVER. Esto particularmente preocupante en Chile, y especialmente en el centro, donde se concentra la mayor población del país. Como se mostrará en esta tesis, las mediciones a largo plazo de UVER y sus correspondientes índices eritemático (UVI, SED, MED y el t_{ery}) pueden proporcionar información útil y complementaria para la evaluación del riesgo de exposición y daño cutáneo inducido por el Sol.

Por otro lado, debido al rápido avance del tratamiento de aguas residuales mediado por diversos materiales y el espectro solar, el análisis y cuantificación de la RUV es de gran interés. Desde el punto de vista energético, aunque la RUV constituye la fracción más pequeña del espectro solar (6%) (Escobedo et al., 2009), sus fotones son altamente energéticos. Muchos estudios han ilustrado las influencias de la RUV en muchos sistemas solares fotocatalíticos (Ajona and Vidal, 2000), (Malato et al., 2002) (Malato et al., 2009). Principalmente, utilizando TiO_2 como material semiconductor (Lu et al., 2017), (Lofrano et al., 2018) o sales de hierro en el caso del proceso fotocatalítico homogéneo (Malato et al., 2002), (Cabrera-Reina et al., 2019), (Cabrera-Reina et al., 2021). Los principios de este proceso son bien conocidos. Los radicales fuertemente oxidantes, como el $\bullet OH$, se generan en la superficie del semiconductor tras la excitación con luz UV de <400 nm y la formación de un par electrón-hueco. Estas especies son responsables de la oxidación no selectiva de diversos compuestos orgánicos. Sin embargo, una importante limitación de la fotocatalisis heterogénea es la necesidad de que la RUV excite el fotocatalizador. Para la mejora de la cosecha de UVR se han reportado otros semiconductores entre ellos, ZnO (Navarro et al., 2009, Antil-Martini et al., 2017), o Oxihaluros de Bismuto ($BiOI$) (Mahmoodi et al., 2018; Ribeiro et al., 2019). La capacidad de la RUV para fotodegradar, en condiciones catalíticas, una amplia gama de contaminantes ha sido ampliamente demostrada en la literatura, Bisfenol A (S. Malato et al., 2000), Oxamil (Malato et al., 2002), Oxitetraciclina (Pereira et al., 2011), Espiramicina (Lofrano et al., 2018). Mostraron una dependencia lineal de la degradación de los contaminantes aumenta con el aumento de la RUV, con el aumento de la intensidad de la luz de 20 a 30 Wm^{-2} ($0,2-0,3 \text{ mol de fotones m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en los 300-400 nm) (Malato et al., 2009). Por lo tanto, altos valores de UVR pueden mejorar el rendimiento fotocatalítico. Aunque recientemente, en (Cabrera-Reina et al., 2021) mostraron que en el proceso de fotofenton cuando surgen condiciones de foto-saturación, la energía extra disponible no puede ser absorbida por el fotocatalizador y no mejora la tasa de mineralización. Por tanto, en ocasiones demasiada energía no es necesaria para lograr un buen rendimiento de la fotocatalisis solar homogénea.

Dada la escasez de datos de RUV en superficie (Utrillas et al., 2018^a) es de vital importancia disponer de modelos que permitan estimar dichos valores. Una alternativa, que se abordará en esta tesis es utilizar técnicas de modelación. Una elección sencilla cuando se dispone de mediciones es utilizar expresiones empíricas derivadas de la correlación entre la radiación solar global (IG) y su componente RUV, ambas medidas independientemente en la superficie (Escobedo et al., 2009), (Tereszchuk et al., 2018). Por ejemplo, (Robaa, 2008) desarrolló expresiones empíricas para los valores diarios de UV-B, y (Kudish, & Evseev, 2000), (Kalogirou et al., 2017) lo hicieron para los valores horarios de UV-B y UVER, respectivamente. Un trabajo reciente ha propuesto una regresión lineal simple para estimar UVER en dos localidades a gran altura en Argentina (Utrillas et al., 2018^a). Pero, la mayoría de los modelos de correlación que aparecen en la literatura se han desarrollado en el hemisferio norte, para una variedad de condiciones climatológicas, por ejemplo, en Kwangju, Corea del Sur (Ogunjobi and Kim, 2004), España (Murillo et al., 2003, Cañada et al., 2007, Foyo-Moreno et al., 2007, Gandía et al., 2015); Israel (Kudish et al., 2005), China (Wang et al., 2014b; Feng et al., 2015); Qena, Egipto (Adam, 2015), Athalassa and Larnaca, Cyprus (Kalogirou et al., 2017) Kuwait (Ghoneim et al., 2013) y la distribución espacial del O₃ estratosférico difiere de la del hemisferio sur, donde hay menos trabajos (Utrillas et al., 2018^a). Otra alternativa cuando no se dispone de datos es usar modelos de transferencia radiativa, entre ellos el Tropospheric Ultraviolet Visible radiative transfer (TUV, <http://www.acd.ucar.edu/TUV/>) (Madronich, S. & Flocke, 1995), (Palancar et al., 2017), MODTRAN (Chile, 2020) y el modelo UVSPEC (UV-Visible Spectroscopy) desde el LibRadtran (Mayer and Kylling, 2005), (Antón et al., 2012), (Cordero et al., 2016). Estos modelos son más complejos que los modelos empíricos ya que requieren una descripción detallada de la composición de la atmósfera, principalmente la concentración de ozono, y del estado termodinámico (Brelford, 2017). En el simulado del espectro solar en Chile mediante modelos de transferencia radiativa se puede encontrar el trabajo de (Cordero et al., 2016), (Cordero et al., 2018) y la colaboración del Centro de Energía, USCAH –FCFM –Universidad de Chile (Chile, 2020). Pero ambas investigaciones como se mencionó anteriormente concentran sus resultados desde Antofagasta hacia el norte. Muchos estudios indican que la relación RUV/IG no es constante (Al-Aruri, 1990; Robaa, 2008; Escobedo et al., 2011; Kalogirou et al., 2017) y que su variabilidad está vinculada al clima local, lo que se atribuye a las condiciones atmosféricas: nubosidad, turbidez, contenido de humedad, tipo de aerosoles, etc. Por lo tanto, es necesario verificar cuidadosamente el funcionamiento de los modelos nuevos y también es necesaria una validación local de ellos.

Dado que el estudio de la radiación solar espectral ultravioleta en Chile es fundamental para la utilización y el desarrollo de los múltiples servicios y tecnologías que se derivan de su uso. Así como los posibles efectos directos e indirectos que pueden causar a la salud de las personas se plantea como hipótesis de trabajo:

1.2 Hipótesis

La modelación de la radiación solar espectral ultravioleta que llega a la superficie terrestre en Chile Central podría asociarse con la capacidad de que es suficiente para generar daño en los fototipos de piel característicos de la población chilena cuando el UVI indica que es seguro y con la posibilidad de llevar a cabo tratamiento solar de aguas.

1.3 Objetivo General

Para responder la hipótesis de trabajo se establece como objetivo general (OG):

OG: Cuantificar y modelar la radiación solar espectral ultravioleta que llega a la superficie terrestre, en Chile Central.

En este contexto se propusieron los siguientes objetivos específicos (OE):

1.4 Objetivos específicos

OE1: Caracterizar el recurso solar espectral ultravioleta en latitudes medias de Chile (33° - 36° S) bajo distintas condiciones de cielo y distintas escalas de integración temporal.

OE2: Evaluar los efectos negativos de la radiación solar espectral ultravioleta usando cuatro índices de eritema (UVI, SEDs, MEDs, y t_{ery}) identificando casos de riesgo para las personas que viven en Chile Central (33° - 36° S).

OE3: Desarrollar y validar modelos empíricos para estimar los valores horarios y diarios de radiación solar espectral ultravioleta a partir de la IG en la superficie, bajo distintas condiciones de cielo y distintas escalas de integración temporal.

OE4: Construir mapas de exposición a la radiación solar espectral ultravioleta en latitudes medias en Chile Central (33° - 36° S).

OE5: Simular los valores de radiación solar espectral ultravioleta en la superficie horizontal empleando un modelo de transferencia radiativa en latitudes medias altas de Chile (24° - 36° S).

OE6: Analizar la viabilidad del empleo de la radiación solar espectral ultravioleta simulada como fuente de energía para el tratamiento solar de aguas en ciudades pobladas.

1.5 Estructura de la tesis

Esta tesis está organizada de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se ofrecen los principales fundamentos teóricos de esta investigación, en el Capítulo 3 se caracteriza la región de estudio y se presentan los instrumentos de medición y bases de datos utilizadas, conjuntamente se ofrece las estrategias de modelación y validación empleadas. Al final de este capítulo 3 se describe el método empleado para evaluar el riesgo de exposición a la radiación solar espectral UV-B mediante la información que brinda el UVER. Además, se informa como se evalúa el potencial de RUV para degradar contaminantes de diversa naturaleza. En los Capítulos 4 y 5 se muestran los resultados obtenidos en función de los objetivos propuestos y se realiza una síntesis con la discusión de los principales resultados. Por último, el Capítulo 6 ofrece las conclusiones, así como las líneas abiertas que quedan para continuar el trabajo realizado.

CAPÍTULO 2: Fundamentos

2.1 Declive del ozono estratosférico

En el período de 1960 hasta 1980, debido a las emisiones antropogénicas de gases halógenos se evidenció un aumento de la destrucción fotoquímica del ozono (O_3) estratosférico, especialmente en las latitudes altas de los hemisferios Norte y Sur (Jacob, 1992). Este agotamiento condujo a la formación del agujero de la capa de ozono en la Antártida. Se han realizado proyecciones del tiempo de recuperación del O_3 , se plantea que hasta 2050-2065 sino hay incrementos significativos en las emisiones actuales se podrán recuperar los valores iniciales de gas estratosférico (Hegglin and Shepherd, 2009). También la más reciente Evaluación Científica del Agotamiento del O_3 de la OMM y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (WHO, 2018) muestra que la capa de O_3 en algunas partes de la estratosfera se ha recuperado a un ritmo del 1-3% por década desde el año 2000. Según las previsiones, se espera que el O_3 del Ártico y de las latitudes medias del hemisferio norte (HN) se recupere por completo antes de mediados de siglo (~2035), seguido de las latitudes medias del hemisferio sur (HS) hacia mediados de siglo y de la región antártica hacia 2060. Este aumento puede suponer una reducción de los efectos adversos de la sobreexposición a la radiación UV (RUV) en latitudes meridionales en primavera y verano. Sin embargo, a pesar de que en 2019 se observó una disminución del agujero de O_3 - ~10 millones de km^2 - (Scambos and Stammerjohn, 2020) el año 2020 fue reconocido por el agujero de O_3 récord y que lo ubica como el agujero más grande desde 2003 como se muestra en la Figura 2. Uno de los mayores y más profundos agujeros desde que se empezó a vigilar la capa de O_3 hace 40 años (WHO, 2020) y la RUV se mantiene entre los niveles más peligrosos de los últimos años (Parra et al., 2019). Esto significaría más de 80 años de aumento de RUV que recibe la superficie terrestre, con un marcado incremento en el HS. Además, es conocido que el Sol presenta ciclos de máximos y mínimos en su actividad con una duración de 22 años. El año 2020 fue el comienzo de un ciclo máximo de actividad solar. Por lo cual se esperaría que la próxima década la superficie terrestre reciba mayor potencial solar que el pasado ciclo mínimo de actividad solar. Este efecto natural del Sol combinado con los efectos actuales que supone el cambio climático en la estratosfera condicionaría que llegase a la superficie terrestre niveles de RUV elevados, exposición que supone un impacto considerable sobre el medio ambiente y la vida terrestre. También, se espera que las alteraciones de las temperaturas estratosféricas y de los patrones de circulación inducidas por el cambio climático tengan un impacto significativo en los niveles futuros y en la distribución espacial del O_3 estratosférico (Dhomse et al., 2018), lo que a su vez afectaría a la RUV solar (Lamy et al., 2019).

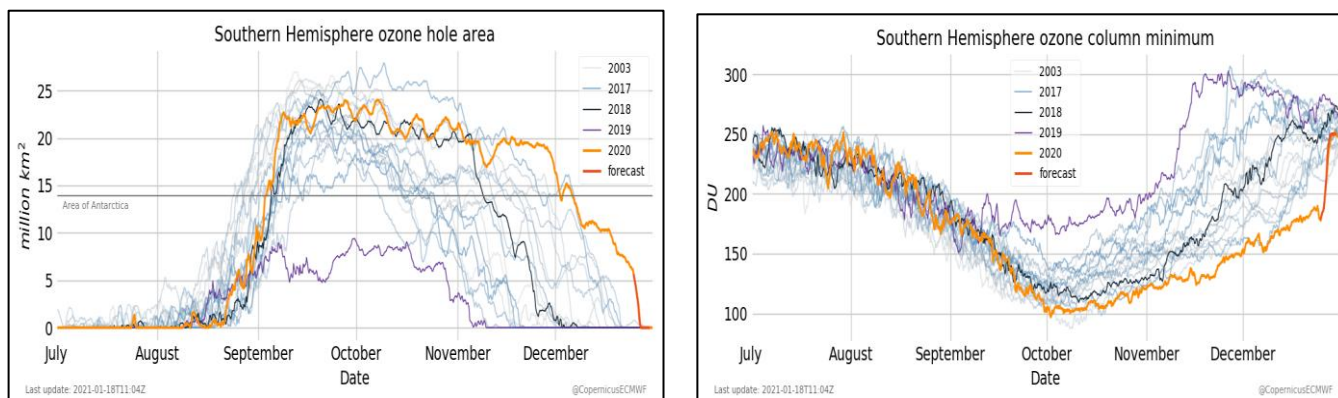


Figura 2. (izquierda) Area del agujero de O_3 y (derecha) columna mínima de O_3 en el HS. Fuente:

2.2 Conceptos básicos sobre radiación solar

El Sol es la fuente de energía más abundante. Además de ser gratuita y limpia, la energía emitida por el Sol es prácticamente inagotable ya que está garantizada para los próximos 6000 millones de años. Se ha estimado que la cantidad de energía anual proveniente del Sol a la Tierra corresponde a 3×10^{24} Joules, es decir, 10.000 veces más energía del consumo actual de la población mundial (GRATZEL, 2007). En el Sol se dan diversos procesos químicos y físicos que están constantemente cambiando se les llama actividad solar. La actividad solar y su variabilidad es una preocupación actual de nuestra sociedad moderna, cada vez más tecnológica. Las llamaradas solares y erupciones de masa coronal pueden inhabilitar satélites, causar fallos en las redes eléctricas, e interrumpir comunicaciones. Las actividades solares son tan poderosas que incluso pequeños cambios en su magnitud pueden tener efectos sobre el clima y ecosistemas en la Tierra (Rodríguez-López et al., 2018). La radiación solar es considerada por su:

Naturaleza ondulatoria: Indica que la radiación solar se propaga por el espacio como ondas electromagnéticas. Aplicando las ecuaciones de Maxwell, se obtiene que la velocidad de propagación c , de cualquier onda electromagnética en el vacío o permitividad eléctrica del vacío ($\epsilon_0 8,85 \times 10^{-12}$ F/m) y permeabilidad magnética del vacío ($\mu_0 4\pi \times 10^{-10}$ H/m). Está dado por la ecuación (1):

$$c = 1/\mu_0\epsilon_0 = 2,99 \times 10^8 \text{ m/s} \quad \text{Ecuación 1}$$

Naturaleza corpuscular: la radiación solar puede ser considerada de acuerdo a la teoría de los fotones o de los “cuantos de energía”, como un conjunto discreto de energía, se diferencian entre sí por el valor de la longitud de onda. La energía de la radiación E , será igual a la suma de la energía de los fotones de distinta longitud de onda y está dada por la ecuación (2).

$$\Delta E = h\nu = hc/\lambda \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío ($\approx 3 \times 10^8$ m/s), λ es longitud de onda, con h como la constante de Planck, con un valor de 6.62×10^{-34} Js y ν es frecuencia.

De esta forma a medida que disminuye la longitud de onda en este espectro, la energía es mayor ya que estos parámetros según la Ley de Planck son inversamente proporcionales. Por lo que, de las radiaciones provenientes del sol, la RUV es la más nociva para la salud humana y ecosistemas terrestres o acuáticos debido a su alto contenido energético.

La energía emitida por el Sol se propaga en todas las direcciones a través del espacio. Cuando alcanza la superficie terrestre se reduce en un intervalo entre $0.3 \mu\text{m}$ y $3 \mu\text{m}$, con el máximo alrededor de los $0.48 \mu\text{m}$. Se divide en varios intervalos en los que la radiación tiene similares características: rayos γ , rayos X, RUV, VIS e IR. Estos grupos se basan en la medida de su longitud de onda, la cual se mide en nanómetros ($\text{nm} = 1 \times 10^{-9}$ metro).

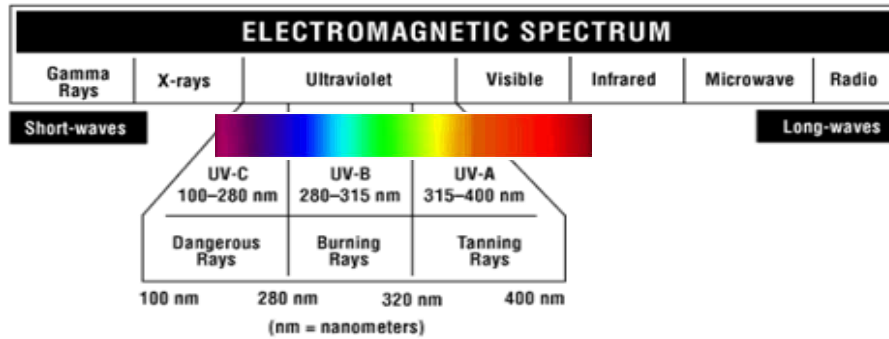


Figura 3. Espectro electromagnético.

El porcentaje de radiación solar recibida en la atmósfera terrestre, conocida como radiación extraterrestre (I_{SC}) alcanza en promedio 1366 Wm^{-2} para la IG (Mechenrikunnel et al., 1988), así, de la tasa de emisión de la energía del Sol, la superficie de la tierra recibe suficiente energía para satisfacer la demanda energética total de la población mundial durante todo un año (Kalogirou, 2014). Aunque, generalmente, este valor se toma como fijo, en realidad no es así, debido a que la órbita elíptica de la tierra alrededor del sol provoca una fluctuación en la distancia sol-tierra de un 1,7% y provoca una variación de la potencia de alrededor del 3,4% (Mechenrikunnel et al., 1988). Su valor ha sido adoptado por la WRC (World Radiation Center). En el caso de la RUV_{SC} , $UV-B_{SC}$ y $UVER_{SC}$ alcanza valores de 78.3 , $21,4$ y $9,8 \text{ Wm}^{-2}$ (Pashiardis et al., 2017) respectivamente. La distribución espectral de la radiación solar que penetran hasta la superficie terrestre depende de la distribución de la radiación extraterrestre y de las interacciones con la atmósfera misma. Según (Gueymard, 2004) antes de interactuar con la atmósfera terrestre aproximadamente el 48,2% de la energía solar se encuentra en la región VIS, seguida de la región IR con el 39,3% y el menor aporte lo representa la RUV con apenas 12,5%.

2.3 Radiación solar espectral ultravioleta (RUV)

Dentro de la RUV están definidas tres bandas según los efectos que producen. La UV-A ($315 < \lambda < 400 \text{ nm}$), UV-B ($280 < \lambda < 315 \text{ nm}$) y UVC ($100 < \lambda < 280 \text{ nm}$) (Madronich Sasha, 1993). Tanto la radiación UV-C como el 90% de la UV-B son absorbidas por moléculas como: vapor de H_2O , CO_2 , O_2 y O_3 . En el caso de la radiación UV-A, la atmósfera no tiene una influencia significativa, por lo tanto, la radiación que llega a la superficie de la Tierra corresponde a este rango y a una pequeña parte de la UV-B. Según estudios la RUV representa entre el 6-5% de la radiación que llega a la superficie (Escobedo et al., 2009). Esta radiación mantiene un delicado equilibrio sobre los efectos biológicos considerados como normales. Pequeños incrementos en las dosis recibidas provocan importantes daños sobre la piel (Rivas et al. 2017); (Rivas et al. 2020), los ojos, entre otros. Actualmente, debido a la importancia del estudio de los efectos biológicos de la RUV, se considera una nueva variable en la región ($280 < \lambda < 400 \text{ nm}$), que equivale a la banda de la radiación UV-B, incluyendo también una parte de la UV-A y que representa la respuesta relativa de la piel humana a la RUV. En la próxima subsección detallaremos sobre esta ponderación de daño e índices que se derivan de la RUV.

2.4 Radiación ultravioleta eritemática (UVER) y otros índices de eritema

Para evaluar los riesgos para la salud de la RUV se ha desarrollado una función ponderada relacionada con la aparición de eritema cutáneo. Esta función de eficacia se conoce como “espectro de acción” para el efecto fotobiológico (CIE and WMO., 2014). Cuando se utiliza un espectro de acción como función de ponderación aplicada a la irradiancia espectral de una fuente de luz, el resultado es la radiación eritemática

ultravioleta (UVER) de esa fuente para el efecto fotobiológico, y está “ponderada espectralmente” para el efecto fotobiológico. De esta variable también se derivan otros índices eritémico como; el índice UV (UVI), la dosis eritémica mínima (MED) y la dosis eritémica estándar (SED). La UVER se compone de un 17% de UV-A y un 83% de UV-B, en la superficie de la Tierra (Miguel et al. 2012). La influencia de la radiación en el intervalo ($280 < \lambda < 400 \text{nm}$), esta modulada por el coeficiente de acción eritémico $\varepsilon(\lambda)$ que fue establecido por McKinlay and Diffey (McKinlay, A.F. and Diffey, 1987) para la Commission Internationale de l' Eclairage (CIE), Este coeficiente espectral, caracteriza que el efecto de eritema, es máximo a partir de las 280nm y va decreciendo a medida que aumenta la λ . Así, el UVER se define mediante la integral de irradiancia espectral total ponderada por el coeficiente de acción eritémico, se expresada por la ecuación 4:

$$\text{UVER} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda)\varepsilon(\lambda)d\lambda \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde UVER es la irradiancia eritémica efectiva ($\mu\text{W cm}^{-2}$ o $\mu\text{J cm}^{-2}$), $I(\lambda)$ es la irradiancia espectral solar a la longitud de onda λ a nivel de la superficie ($\mu\text{W cm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ o $\text{Wcm}^{-2}\text{nm}^{-1}$). Los valores del coeficiente de acción eritémico $\varepsilon(\lambda)$ vienen dados por (CIE, 2002) como muestra la Figura 4.

$$\begin{aligned} s_{er}(\lambda) &= 1,0 && \text{for } 250 \text{ nm} \leq \lambda \leq 298 \text{ nm} \\ s_{er}(\lambda) &= 10^{0,094(298-\lambda)} && \text{for } 298 \text{ nm} \leq \lambda \leq 328 \text{ nm} \\ s_{er}(\lambda) &= 10^{0,015(140-\lambda)} && \text{for } 328 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm} \end{aligned}$$

Figura 4. Valores espectrales del coeficiente de acción eritémico $\varepsilon(\lambda)$ propuestos por (CIE, 2002). Con este método, se pueden comparar diferentes condiciones de exposición a la luz solar (o fuentes artificiales) para determinar la eficacia relativa de cada fuente para causar un efecto fotobiológico. Es importante aclarar que la radiación solar UVER se mide en las mismas unidades que la radiación UV-B o la IG, sin embargo, el significado difiere de estas últimas, ya que la radiación UVER no es propiamente una magnitud física, sino que es una variable que informa de la efectividad de la RUV para producir quemadura solar en la piel humana. Constituye el riesgo laboral más común para los trabajadores al aire libre (Modenese et al., 2018).

La herramienta más conocida para informar a la población sobre los peligros de la RUV es el UVI. El valor del UVI es la multiplicación de la irradiancia UVER (Wm^{-2}) por $40 \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ (Rappenglück et al., 2000). La irradiancia UVER y el UVI representan lo mismo pero el UVI muestra valores enteros entre 0 y 11. Aunque puede ser más alto que 11 sobre todo en sitios de elevada altitud (Zaratti et al., 2014). La Tabla 2 muestra los rangos de UVI por colores propuesto por la OMS (WHO, 2002^a) junto a las categorías de exposición o riesgo propuestas por la Environmental Protection Agency (EPA) (EPA, 2020), además de las precauciones que se deben tomar.

Tabla 2. Escala de exposición solar propuesta por la OMS (WHO, 2002) y categoría de exposición según EPA (EPA, 2020).

Color	Verde	Amarillo	Naranja	Rojo	Violeta
Rango UVI	0-2	3-5	6-7	8-10	≥ 11
Categoría de exposición	Riesgo Bajo de los rayos UV del sol	Riesgo Medio de daños por	Riesgo Alto de daños por la exposición al sol	Riesgo Peligroso de sufrir daños por la exposición al sol sin	Riesgo Extremo de daños por exposición al sol sin

	para la persona media.	exposición al sol sin protección.	sin protección. Es necesario protegerse contra los daños en la piel y los ojos.	protección. Tome precauciones adicionales porque la piel y los ojos sin protección se dañan y pueden quemarse rápidamente.	protección. Tome todas las precauciones porque la piel y los ojos sin protección pueden quemarse en minutos.
Precauciones	Sombrero, Gafas de sol	Sombrero, Gafas de sol, Protector solar (SPF 25+)	Sombrero, Gafas de sol, Protector solar (SPF 30+), Sombrilla	Sombrero, Gafas de sol, Protector solar (SPF 50+), Sombrilla, Stay indoors from 10:00 to 16:00 hrs.	Actividad mínima al aire libre, además de todas las precauciones anteriores

SPF= Factor de protección solar

Sin embargo, la UVER es incompleta para determinar efectos nocivos de exposición solar en los individuos, ya que hace referencia a una magnitud de radiación instantánea con unidades de potencia por unidad de superficie. Dado que los efectos producidos por la RUV se manifiestan con posterioridad a la exposición y tienen un efecto acumulativo, hay que introducir otros parámetros derivados; el tiempo de exposición (t_{ery}), las MEDs (Dosis Eritémica Mínima) y SED (Dosis Eritémica Standard). El tiempo de exposición al sol se define como el tiempo (en minutos) que tarda en provocar eritema. Depende de la intensidad del UVER y del valor de sensibilidad personal (fototipo) (Tablas 3 y 4). La MED se define como la irradiación mínima necesaria para producir enrojecimiento en la piel, tras un determinado tiempo de exposición a la radiación. En este sentido queda claro que, el UVI informa de la quemadura solar instantánea de UVER, pero no suministra información sobre los riesgos de la exposición solar en un período de tiempo. Mientras las MED o SED complementan el estudio del riesgo de exposición a las quemaduras solares.

Tabla 3. Límites de exposición de la piel y los ojos a la RUV. Fuente: (ICNIRP, 2004)

Duración de la exposición por día	Irradiancia efectiva	
	UVER (Wm^{-2})	UVER ($\mu W cm^{-2}$)
8h	0.001	0.1
4h	0.002	0.2
2h	0.004	0.4
1h	0.008	0.8
30min	0.017	1.7
15min	0.033	3.3
10min	0.05	5
5min	0.1	10
1min	0.5	50
30s	1.0	100
10s	3.0	300
1s	30	3000

0.5s	60	6000
0.1s	300	30000

El enrojecimiento se produce antes en personas con escasa pigmentación en la piel que en otras pieles más oscuras (o sea depende del fototipo del individuo). Se toma como unidad de referencia individuos con piel blanca ligeramente pigmentada. Los fototipos cutáneos se han establecido según esta susceptibilidad de la piel a sufrir daño por la RUV. Se han clasificado en seis grupos (I-VI) según (Fitzpatrick, 1988). Los números más bajos corresponden a las personas de piel más clara y los números más altos a las de piel oscura y por tanto poseen mayor protección contra la RUV.

La dosis eritémica mínima (MED) se define como una medida de la naturaleza variable de la sensibilidad de la piel a la exposición a la RUV. Para los tipos de piel más sensibles, 1 MED equivale a aproximadamente 200 Jm^{-2} (ponderado por el espectro de acción del eritema), mientras que, para pieles resistentes, un valor de 4 es aproximadamente 500 Jm^{-2} . Según (Zemelman et al., 1990), los fototipos de piel más frecuentemente en Chile son III y IV. Sin embargo, el estudio genético de (Eyheramendy et al. 2015) demostró que la población chilena se origina genéticamente de una piel clara del lado caucásico. Para el caso de la SED se define como una unidad de medida estandarizada de la radiación eritémica. La SED equivale a una exposición radiante eritémica de 100 Jm^{-2} independiente del tipo de piel. La melanina desempeña un papel vital en la protección del cuerpo humano frente a la RUV, filtrando la luz solar antes de que pueda dañar las células de la piel (Solano, 2020), (Hearing, 2008). Las personas con pieles oscuras tienen más melanina que los individuos de piel clara, que es un pigmento natural que protege la piel en entornos con mucha luz solar. Desde el punto de vista clínico, la clasificación cutánea de Fitzpatrick ayuda a predecir el riesgo de fotodaño, a orientar los consejos de protección solar y a estimar la MED con la exposición directa a la radiación UVER. La clasificación de Fitzpatrick identifica los tipos de piel en función del efecto de la RUV sobre la piel. Una persona puede conocer de forma sencilla su grado aproximado de sensibilidad a RUV en base al color natural de su piel y la tendencia a quemarse o a broncearse nada, lentamente, o rápido y con un bronceado final intenso. El color natural de su piel debe observarlo en áreas habitualmente no expuestas a la luz como la zona interna del brazo o del muslo. La Tabla 4 muestra el límite de energía, las características típicas y el MED para cada fototipo de piel.

Tabla 4. Límite de energía, características típicas por (Vanicek and Frei, 2005), y MED para diferentes fototipos de piel definidos por (Fitzpatrick, 1988).

	Fototipos de piel Fitzpatrick's	Quemadura solar	Características típicas	Límite de Energía (Jm^{-2})	1MED
Tipo I	Melano	Siempre se quema	Pale white skin, blue/green	200	1
Tipo II	comprometido	Generalmente se quema	eyes, blond/red air	250	2
Tipo III	Melano	Rara vez se quema	Fair skin, blue eyes	350	3
Tipo IV	competente		Light brown skin Brown skin	450	4
Tipo V	Melano	Nunca se quema	Piel carmelita		
Tipo VI	protegido		Piel negra		

2.5 Factores que influyen en la radiación solar.

Los procesos de interacción de los componentes atmosféricos con la radiación solar presentan selectividad espectral, afectando más a algunas bandas del espectro electromagnético que otras. Los constituyentes atmosféricos como O_3 , vapor de agua, O_2 , etc., desarrollan un papel importante en el fenómeno de la

absorción de la radiación solar, tanto global como su fracción UV y VIS (Mehos et al., 1992). La absorción por parte del O_3 , en la región del VIS de la radiación solar es muy baja. Sin embargo, se vuelve muy importante en la región del UV (<370 nm), llegando una fracción pequeña a la superficie terrestre. La absorción por los diferentes constituyentes de la atmósfera se puede observar en la siguiente figura. La Figura 4 muestra el espectro de emisión del Sol reconocido por la ASTM (American Society for Testing and Materials, EUA) adoptado por NASA en base a la propuesta de (Gueymard et al., 2002), (Gueymard, 2004). Espectro de referencia derivado desde el Modelo Simple de Transferencia Radiativa Atmosférica de la Luz Solar (SMARTS v. 2.9.2) y rango de longitudes de onda de cada región del espectro solar.

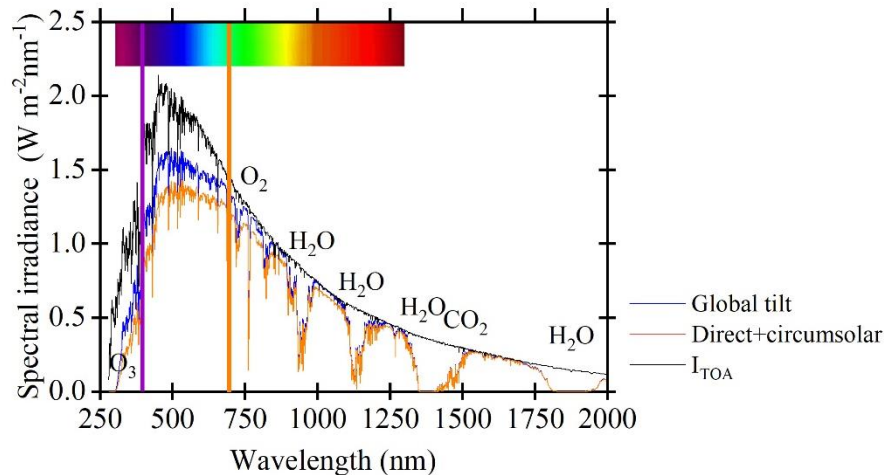


Figura 5. Espectro de emisión solar siguiendo el propuesto por ASTM G173-03 para radiación directa y global en una inclinación de 37° . La curva de línea negra representa la radiación solar al tope de la atmósfera (I_{TOA}) y el área naranja es la radiación que llega a la superficie terrestre. Los valles que se observan se deben a la absorción por parte de diferentes componentes atmosféricos (Vapor de agua, O_3 , CO_2). Líneas verticales violeta y naranja representan los límites de la banda UV y VIS respectivamente.

Dentro de los factores que afectan a los niveles de radiación solar se encuentran la distancia Sol-Tierra, el vapor de agua atmosférico y las nubes, el ozono total en columna, el albedo, los aerosoles, la latitud, la hora del día, la estación del año y la altitud (Rivas et al., 2011), (Singh and Singh, 2004), (McKenzie et al., 2006), (Jacovides et al., 2009), (Cordero et al., 2014), (Cordero et al., 2016) (Utrillas et al., 2018b). Los cuales pueden dividirse en dos grupos, los factores astronómicos, geográficos y atmosféricos o climatológicos. En la próxima sección hablaremos de estos factores con detalle.

2.5.1 Factores astronómicos

Los factores astronómicos se relacionan con la posición relativa Tierra-Sol (U) y la posición sobre la tierra considerada. Estos parámetros son responsables de los cambios estacionales y diarios de la irradiación, ya que condicionan el recorrido del flujo energético a través de la atmósfera y su ángulo de incidencia o ángulo solar cenital (SZA). La Tierra da una vuelta sobre su eje cada 24 horas (23 hrs. y 56 min) y completa una elipse alrededor del sol cada 365.25 días aproximadamente (Figura 6). La excentricidad de la órbita de la Tierra es muy pequeña (0.01673), y la distancia media Tierra-Sol ($r_0 = 1.496 \times 10^8$ km = 1UA) (Iqbal, 1983). En la trayectoria de la tierra alrededor del Sol hay que destacar los siguientes estados: (i) Solsticio de verano: máxima duración del día, (ii) Solsticio de invierno: mínima duración del día, y (iii) Equinoccios

de primavera y otoño: igual duración del día y la noche. En torno al 4 de julio la I_{TOA} será menor que en cualquier otra época ($r_0=0.967$), debido a que la Tierra se encuentra en la posición más lejana del Sol (Afelio), al contrario que seis meses antes (4 de enero), cuando la I_{SC} es máxima ya que la Tierra se encuentra en el Perihelio ($r_0=1.033$). De esta forma, el verano del hemisferio sur es más cálido que el verano del HN, porque el verano en el HS sucede cuando la Tierra está más cerca del Sol. Originando una oscilación anual de un $\pm 3\%$ en la cantidad de radiación solar recibida por la Tierra. Estos movimientos influyen en las características del clima y en la distinta duración del día y la noche en un mismo lugar en distintos días del año, y entre distintos puntos de la Tierra el mismo día. Esto será fundamental para determinar el potencial y los lugares óptimos para instalaciones de aprovechamiento solar.

$$U = 1.00011 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma \quad \text{Ecuación 4}$$

$$+ 0.00007 \sin 2\Gamma$$

$$\Gamma = 2\pi \cdot (\text{Jday} - 1)/365 \quad \text{Ecuación 5}$$

$$U = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde Γ es el ángulo del día en radianes.

El eje de giro de la Tierra permanece constante a lo largo del año y tiene una inclinación de $\pm 23,5^\circ$ respecto del plano de traslación. Este ángulo es reconocido como declinación solar (δ) se determina a través de la Ecuación 4 (Cooper, 1969). Su valor varía a lo largo del año, de $23,45^\circ$ (21 de junio, solsticio de invierno), a $-23,45^\circ$ (21 de diciembre, solsticio de verano), pasando por cero en los equinoccios de primavera y de otoño.

$$\delta = 23,45 * \sin\left(\frac{360}{365} * (280 + n)\right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde: n es el número de día. Los valores de n se han elegido como sugiere Klein (Klein, 1976), para que la radiación extraterrestre sea igual a los valores medios mensuales.

La radiación proveniente del Sol disminuye con el cuadrado de la distancia, así que la I_{SC} es equivalente a la que llegaría a una distancia Tierra-Sol de 1 UA multiplicada por r_0 . El SZA es el complementario de la altura solar y representa el ángulo entre la línea del cenit y una línea dirigida hacia el sol. El valor del SZA depende del día del año, de la latitud de la localidad y de la hora (hr.) del día, alcanzando los valores más bajos en las horas (hrs.) centrales del día. El SZA es el factor principal que controla la variación de la radiación sobre una superficie horizontal durante el día, ya que cuando menor sea el SZA, con mayor inclinación será visto el Sol, y los rayos solares llegarán más perpendiculares sobre la superficie horizontal terrestre siguiendo una ley coseno. A medida que crece el SZA, el flujo de radiación que llega al plano horizontal terrestre es menor, hasta llegar al límite de SZA igual a 90° , cuando el sol desaparece por el horizonte y la radiación solar recibida es nula. Cuanto más perpendicular se encuentra el sol con respecto a la superficie terrestre (es decir, cuanto menor valor del SZA) menor es el camino que recorre la radiación solar a través de la atmósfera. Por el contrario, para ángulos cenitales mayores (menor altura solar) el camino a recorrer por la radiación solar en la atmósfera es mayor, lo que implica que la intensidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre es menor.

(a)

(b)

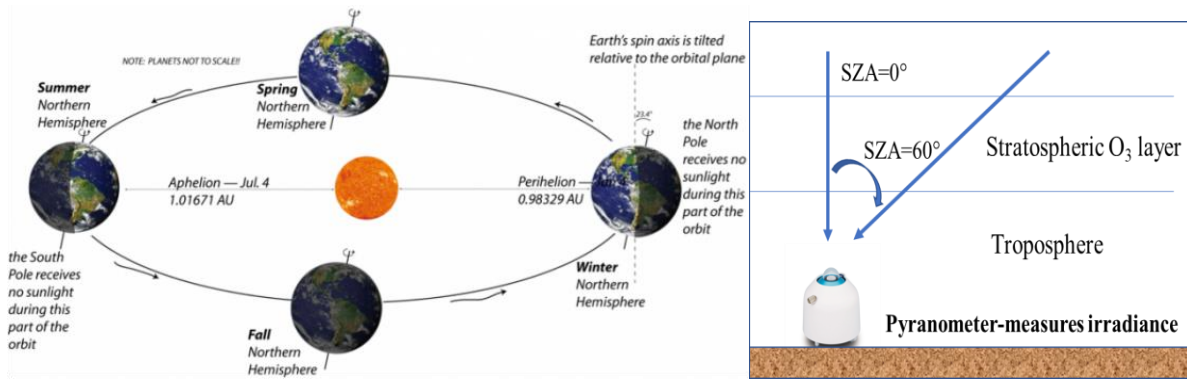


Figura 6. (a) Movimiento de la Tierra alrededor del Sol. y (b) representación del ángulo cenital solar (SZA, solar zenith angle). Fuente: NREL

2.5.2 Factores atmosféricos (gases, aerosoles y nubes)

Como se mostró en la Figura 5 los gases de la atmósfera son absorbedores selectivos de radiación solar, es decir que absorben gran cantidad para algunas longitudes de onda o muy poca en otras. Los principales absorbedores atmosféricos son el vapor de agua, el CO₂ y las moléculas de O₃. El O₃ es un compuesto químico formado por tres átomos de oxígeno (O₂) y cumple dos papeles totalmente distintos según se encuentre en la estratosfera o en la troposfera. El que está en la estratosfera (10-50 km) es imprescindible para que la vida se mantenga en la superficie del planeta porque absorbe la RUV. El O₃ que se encuentra en la troposfera, junto a la superficie de la Tierra, es un contaminante importante. Se forma por reacciones inducidas por la luz solar en las que participan, principalmente, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos presentes en el aire. Representa el componente más dañino del smog fotoquímico y causa daños importantes a materiales (Urrejola et al., 2016) y la salud de las personas y el ecosistema (Ambasht and Agrawal 2003; Bell et al. 2006; He et al. 2006; Fuks et al. 2019). El parámetro más usado para medir el O₃ en la estratósfera es la columna total de O₃ (TOC en inglés). Es definida como el grosor de la columna vertical de O₃ sobre un área si se llevase a condiciones estándar de temperatura y presión: 0°C y 1 atm, expresada en unidades Dobson (UD). La absorción de este gas en las bandas UV-C y UV-B hace que la radiación en la superficie no sea tan dañina para el ser humano. Aproximadamente la irradiancia UVER decrece un 0.31% por cada UD según (Román et al., 2012b). La Figura 7 muestra la distribución del TOC en el mundo para el 6 de abril, 2021, con ampliación del territorio suramericano.

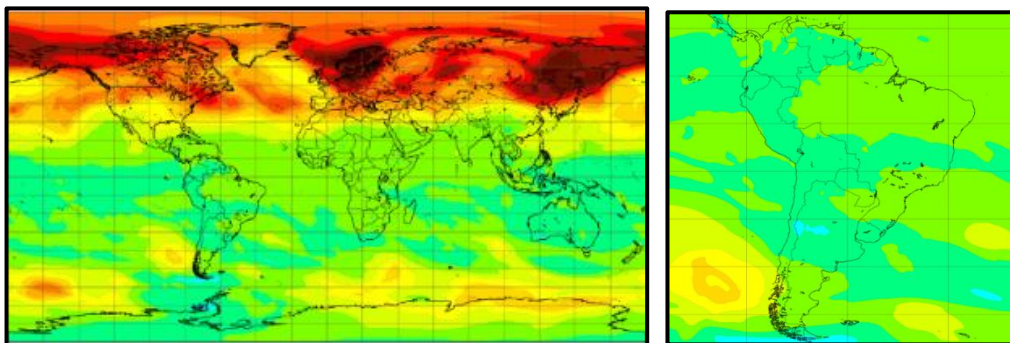


Figura 7. Representación del O₃ estratosférico global correspondiente al 6 de abril, 2021 con ampliación de Suramérica. Las zonas coloreadas en amarillo, naranja y rojo muestran valores altos de O₃, mientras que las zonas verdes y azules muestran valores bajos. Fuente: COPERNICUS/ECMWF <https://atmosphere.copernicus.eu/>.

Además del O₃, otros gases también absorben parte de la RUV (por ejemplo, SO₂ y NO₂), aunque su impacto suele ser menos significativo que el del O₃. El óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) se suelen considerar en conjunto con la denominación de óxidos de nitrógeno (NO_x). El emitido en más cantidad es el NO, pero sufre una rápida oxidación a NO₂. Los NO_x tienen una gran trascendencia en la formación del smog fotoquímico, e influye en las reacciones de formación y destrucción del O₃, tanto troposférico como estratosférico. Las combustiones realizadas a altas temperaturas es la principal actividad humana que produce estos gases. Los aerosoles se diferencian de las moléculas de los gases atmosféricos por su gran variabilidad en cuanto al volumen, tamaño, distribución, forma y composición. Tienen tamaños comprendidos entre 10⁻³ μm y 10² μm. Estas partículas desempeñan importantes y variados papeles en la naturaleza, que van, desde producir la condensación de vapor de agua y la formación de cristales de hielo, a participar en procesos químicos y también el de atenuar la radiación solar o influir en aspectos como la visibilidad y en las propiedades eléctricas de la atmósfera. Pueden tener origen terrestre (humos industriales, polen, erupciones volcánicas, incendios forestales) o marítimo (cristales de sal). El aerosol troposférico en conjunto con los gases trazas SO₂ y NO₂ reduce los niveles de RUV significativamente en regiones contaminadas (Barnard et al., 2003). Su presencia en grandes cantidades puede ser dañina para la salud de las personas y el ecosistema (Li et al., 2017). El efecto del aerosol no tiene variaciones significativas en el efecto sobre la IG, pero sí muestra un marcado incremento de la razón difusa/directa de la RUV (Kim et al., 2020). Existen pocos estudios actuales sobre la composición y origen del aerosol en Santiago, uno que destaca, (Morata et al., 2008) revela que su origen es antropogénico. En Chile central se ha demostrado que el sulfato se encuentra asociado a partículas finas (MP_{2.5}) (Gallardo et al., 2002), (Carbone et al., 2013) Este último informa que además de sulfato (8%), en las partículas de aerosol se tiene sustancias orgánicas (59%), seguidas de nitrato (14%), amonio (12%), carbono negro (3%) y cloruro (3%). La Figura 8 muestra ejemplos de distribución atmosférica del aerosol en Suramérica y concentración horaria de aerosol representativa en Santiago reportada previamente en (Carbone et al., 2013).

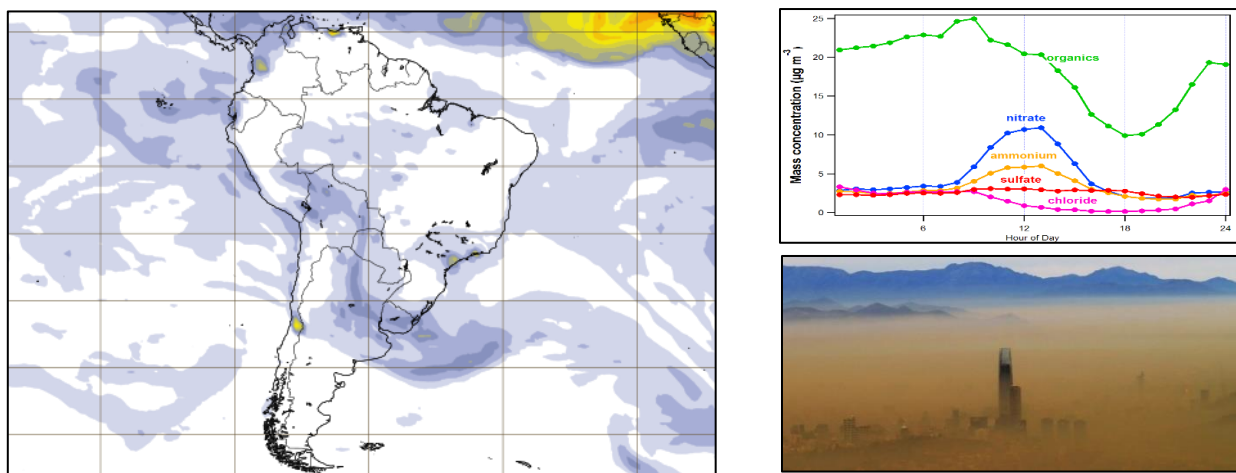


Figura 8. (izquierda) Representación de aerosol atmosférico modelado en el sistema integrado de

predicción de ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) correspondiente al día 3 de julio, 2021. Las zonas coloreadas en amarillo, naranja y rojo muestran valores altos de ozono, mientras que las zonas azules muestran valores bajos. Fuente WHO, <https://public.wmo.int/>. (arriba derecha) Concentración de masa de aerosol en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de orgánicos, nitrato, sulfato, NH_3 y Cl^- . Fuente (Carbone et al., 2013) y (abajo derecha) fotografía de niebla fotoquímica sobre Santiago metropolitano.

Otro factor importante que influye en los niveles de IG y sus componentes espectrales es la cubierta de nubes. La nubosidad tiene un efecto plano sobre la RUV, de modo que atenúa el espectro en la misma medida para todo el rango sin modificar ostensiblemente la estructura espectral. La cantidad de RUV atenuada por la nubosidad será función del tipo de nube y de su desarrollo. Nubes densas y oscuras bloquearán más eficientemente la RUV llegando a atenuar hasta un 93% de la UVER incidente (de Miguel et al., 2011). Mientras que nubes blancas y con menor desarrollo junto con las nieblas y calimas atenúan en menor medida la RUV. Estudios han confirmado que se produce un aumento de RUV bajo cielos parcialmente nublados (Piacentini et al., 2003) (Piacentini et al., 2011), (Wang et al., 2014b), (Tiba and Silva Leal, 2017),. Una capa de nube sobre una superficie de hielo o nieve incrementa significativamente la dosis de RUV, debido al aumento de la dispersión múltiple (Cordero; et al., 2014). Por tanto, el hecho de que exista nubosidad variada durante el día puede resultar engañoso, ya que nos podemos quemar debido a la escasa atenuación de la RUV. Es importante explicar que las nubes se asocian a altos contenidos de vapor de agua en la atmósfera, en el caso de la fracción UV, la nube absorbe más la IG que los rayos UV, aumentando su porción dentro de la global. El estudio de (Escobedo et al., 2009) reporta en Botucatu, Brasil, valores diarios de UV con cielo nublado de 4.9% y para condiciones de cielo despejado el 4.0% de la radiación global. En China Central el promedio anual de UV reportado por (Wang et al., 2014^a) fue de 4.01%, la porción de UV también mostró un aumento con la nubosidad en cada mes, lo que revela que las nubes reducen la IG proporcionalmente más que la RUV. Este fenómeno podría explicarse porque el UV es más susceptible a la dispersión de Rayleigh (Jacovides et al., 2009), que dice que la intensidad de la luz dispersada es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda y al tener el UV menor longitud de onda es mucho más dispersado por las gotas de agua y el hielo que forman las nubes, de manera que el UV “bordea” con facilidad el obstáculo que representa la nube y por tanto aumenta su valor.

Por otro lado, si bien la presencia de nubes es un factor predominante en la RUV y producen, por tanto, una gran disminución de la cantidad de fotones UV que alcanzan la superficie terrestre y por ende disminuciones en el rendimiento de colectores solares, ej. fotovoltaicos, calentadores solares (Alvarado et al., 2014) y/o fotoreactores (Blanco et al., 2009). No significa que pueda lograrse la degradación de un contaminante objetivo en días nubosos, aunque su tratamiento ocurra en un tiempo prolongado (Malato et al., 2003). La Figura 9 muestra un ejemplo de degradación del Oxamyl usando TiO_2 durante dos días con diferentes flujos de RUV incidente.

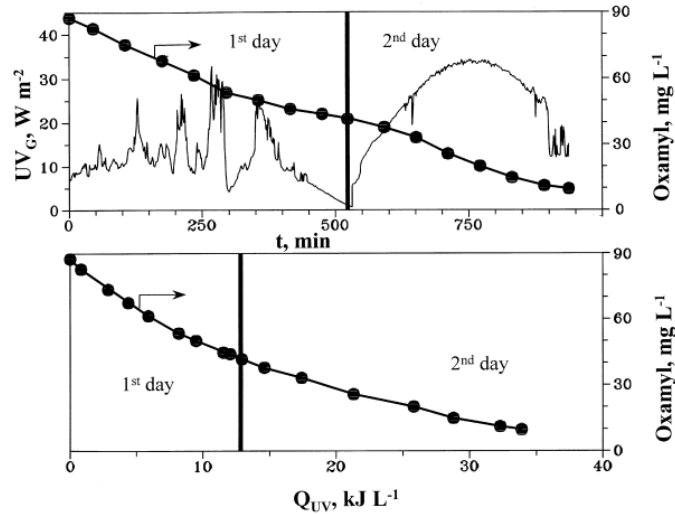


Figura 9. Degradación fotocatalítica de Oxamyl (plaguicida) empleando dióxido de titanio (TiO₂) en una planta piloto ubicada en Plataforma Solar de Almería (37.05°N, 2.21°O, 100masl). Concentración de Oxamyl en función del tiempo del experimento (arriba) y de la energía acumulada (abajo). La energía solar UV a lo largo del experimento también se muestra.

2.5.3 Otros factores

Otros factores que afectan la RUV son, el albedo superficial y la altura del lugar. El albedo superficial es un importante factor regulador adicional de los niveles de RUV, que aumenta la irradiación UV sobre terrenos altamente reflectantes (por ejemplo, cubiertos de nieve o hielo) (Cordero; et al., 2014) cuyo valor de albedo es ~0.90. La RUV que llega a la superficie aumenta con la altitud. A mayor altura menor camino óptico y presión atmosférica, lo que indica que hay menos componentes atmosféricos para atenuar la RUV. Para cielos despejados se han encontrado incrementos de la irradiancia UVER de 6-18% por Km (Blumthaler et al., 1994), (Koepke et al., 1998). En el norte de Chile, (Rivas et al., 2008) ha reportado incrementos de RUV de 10-12% por km. Por tanto, los niveles de RUV que alcanzan la superficie terrestre viene condicionado básicamente por el ángulo cenital solar (SZA, en inglés). Este a su vez condicionado por la hr. del día, la latitud, época del año, contenido total de la columna de ozono, la nubosidad, la altitud sobre el nivel del mar, los aerosoles, el albedo o reflectividad del suelo, el O₃ troposférico y otros contaminantes gaseosos.

2.6 Componentes de la radiación solar

En general, los fenómenos de interacción de la radiación con la atmósfera se pueden esquematizar de acuerdo con la Figura 9. La energía recibida en la superficie de la tierra se conoce como irradiancia; esta energía cuando no es absorbida o desviada, se denomina radiación directa (I_{dir}); aquella que alcanza la superficie, pero que ha sido desviada, corresponde a la radiación difusa (I_{dif}), así como de la radiación reflejada (I_r) por el suelo. La suma de estas constituye la radiación global (IG) y se expresa en Jm⁻² o Wm⁻². (ecuación 8).

$$IG = I_{dir} + I_{dif} + I_r \approx Wm^{-2} \cdot día \quad \text{Ecuación 8}$$

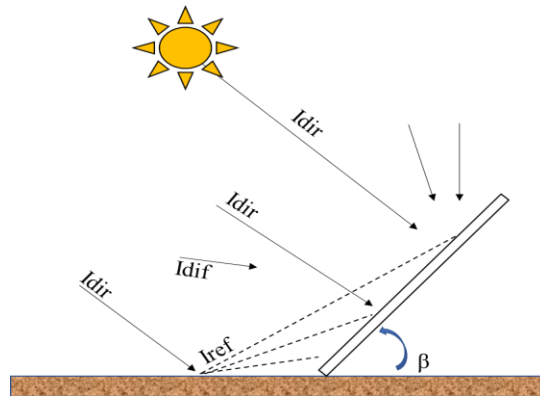


Figura 10. Componentes de la IG incidente sobre un colector solar en una superficie inclinada.

De esta manera, la atenuación en su paso por la atmósfera se debe a las absorciones y dispersiones que sufre la radiación causada por los factores mencionados en la sección anterior. Así parte de los fotones que viajaban en la columna atmosférica, cambian su dirección. La absorción se produce con una transferencia de energía de la radiación a los constituyentes atmosféricos. Este mecanismo implica absorción de energía determinada o determinadas longitudes de onda. Los absorbentes más eficaces de radiación solar son las moléculas de agua, de CO₂ y O₃. La dispersión es una difusión (reflexión y/o refracción) de la radiación producida por partículas de la atmósfera y gases. Se pueden considerar tres mecanismos principales: dispersión de Rayleigh, dispersión de Mie, dispersión no selectiva. La dispersión de Rayleigh tiene gran influencia en RUV ya que la intensidad de la luz dispersada es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. En términos generales, el proceso de dispersión es mucho más complicado de evaluar que el de absorción ya que, mientras que en la absorción una fracción de la energía es sustraída de la radiación directa incidente, la dispersión redirige la radiación incidente en otras direcciones del espacio. La I_{dif} incluye la radiación dispersada por las moléculas (efecto Rayleigh), los aerosoles (efecto Mie) y las nubes (si están presentes). También incluye la radiación retrodispersada que se refleja primero en la superficie y luego se vuelve a reflejar hacia abajo por la atmósfera o las nubes. En general, en días nublados la I_{dir} es mínima, mientras que la I_{dif} es máxima, produciéndose la situación contraria en días despejados.

2.6.1 Índice de claridad

El índice de claridad atmosférico K_T , es un parámetro óptico, cuyo estudio esté ligado al interés mundial en el uso de energías renovables y nos indica en forma general, directa o indirectamente el estado atmosférico local, y el cambio de las mismas en el transcurso del tiempo (Udo, 2000). Este índice, está físicamente relacionado con el camino de la radiación a través de la atmósfera hasta incidir sobre una superficie a nivel terrestre o del mar (Escobedo et al., 2009). El K_T es un valor que se obtiene a partir del cociente entre la radiación solar IG_{TOA} que llega a la parte exterior de la atmósfera y la radiación que llega a la superficie terrestre (IG) como se muestra en la Ecuación 9. Por analogía, el índice de claridad del UVER (K_{TUVER}) se define como la relación entre el UVER en la superficie y el UVER en la parte superior de la atmósfera ($UVER_{TOA}$) (Ecuación 10). Existen varias clasificaciones de K_T , (Udo, 2000) (Ogunjobi and Kim, 2004), (Adam, 2015) todas bajo el mismo principio. La clasificación seleccionada en esta tesis fue la de (Escobedo et al., 2009), (Kalogirou et al., 2017).

$$K_T = IG/IG_{TOA}$$

Ecuación 9

$$K_{\text{TUVER}} = \text{UVER}/\text{UVER}_{\text{TOA}}$$

Ecuación 10

En general, las mediciones de niveles de radiación solar espectral en la superficie terrestre bajo diferentes condiciones de cielo, épocas del año y distintas escalas de integración temporal son escasas, por lo que es de vital importancia disponer de modelos que permitan estimar dichos niveles.

2.7 Modelación de la radiación solar espectral ultravioleta.

Cuantificar la radiación solar espectral usando modelos es esencial para (i) entender los procesos que afectan a la radiación en su paso por la atmósfera, (ii) predecir los valores espectrales y (iii) proveer control de calidad de las mediciones terrestres. Principalmente se encuentran tres técnicas en la literatura:

- **Empírica:** Los modelos empíricos consisten en relaciones simples establecidas entre los datos observados y tienen un número restringido de parámetros de entrada. Por lo general son aplicables al sitio en el que fueron desarrollados. Se ha observado una fuerte correlación entre la RUV y la IG en diversas escalas: hora, día, y estación del año (Murillo et al., 2003), (Adam and Ahmed, 2016), (Antón et al., 2008^a), (Escobedo et al., 2009), (Escobedo et al., 2011), (Tiba and Silva Leal, 2017), (González-Rodríguez et al., 2019). Lo que también se ha observado en partes espectrales del rango de UV, como UVA, UVB (Kudish, & Evseev, 2000), (Kudish et al., 2005), (Jacovides et al., 2009) o UVER (Gandía et al., 2015), (Kalogirou et al., 2017), (González-Rodríguez et al., 2021^a). Esto sugiere que la UVR y sus componentes espectrales pueden obtenerse a partir de numerosas mediciones o estimaciones de IG. Varios autores proponen relaciones entre la UVR, UVA, UVB, o el UVER, y el IG, basándose en análisis de regresión de las observaciones (Ogunjobi and Kim, 2004), (Jacovides et al., 2009), (Escobedo et al., 2009), (Kudish and Evseev, 2011), (Escobedo et al., 2011), (Kudish and Evseev, 2020). En un trabajo reciente se propuso la regresión lineal simple para estimar el UVER en dos localidades a gran altura en Argentina (Utrillas et al., 2018b). El estudio de (Escobedo et al., 2009) reporta en Botucatu, Brasil, valores diarios de UV con cielo despejado el 4.0% de la IG. En China Central el promedio anual de UV reportado por (Wang et al., 2014^a) fue de 4.01%, la porción de UV mostró un aumento con la nubosidad en cada mes, lo que revela que las nubes reducen la IG proporcionalmente más que la UVR (Kim et al, 2020). Este fenómeno podría explicarse porque el UV es más susceptible a la dispersión de Rayleigh, (Jacovides et al., 2009). Muchos estudios indican que no es constante y que la variabilidad de esta relación está vinculada al clima local, lo que se atribuye a las condiciones atmosféricas: nubosidad, turbidez, contenido de humedad, tipo de aerosoles, etc. (Koronakis et al., 2002), (Jacovides et al., 2009), (Escobedo et al., 2011), (Kudish and Evseev, 2011) (Adam and Ahmed, 2016). En ese sentido no sólo es necesario verificar cuidadosamente el funcionamiento de los modelos disponibles en la bibliografía o desarrollados, sino que también es necesaria una validación local de ellos.
- **Parametrizada:** Los modelos espectrales parametrizados suelen ser más complejos que los modelos empíricos y consideran simplificaciones de los procesos físicos de transferencia radiativa atmosférica. La atmósfera es considerada como una sola capa, es decir, homogénea vertical y horizontalmente. Aunque permiten la modificación de una variedad de parámetros de entrada, rara vez consideran el efecto de las nubes. Dos de los modelos parametrizados disponibles gratuitamente para el cálculo del espectro UV bajo condiciones de cielo claro son SPECTRL2 (Riordan, 1986) y SMARTS2 (Gueymard, 2001), disponibles en: <https://www.nrel.gov/>.
- **Transferencia radiativa:** Un modelo de transferencia radiativa es un conjunto de ecuaciones que considera todas las interacciones que tiene un rayo de luz proveniente del sol con los distintos

componentes de la atmósfera. Los modelos de transferencia radiativa permiten introducir información atmosférica muy detallada y la mayoría de ellos dan la opción de considerar los efectos de las nubes. Tratan la atmósfera en un número de capas verticales horizontales homogéneas formada por distintas capas con absorción y dispersión en cada una de ellas. Para dar un enfoque más “real”, algunos modelos incorporan correcciones pseudoesféricas. Otros consideran también correcciones esféricas completas (modelos 3D), pero son exigentes desde el punto de vista computacional y ofrecen precisiones que no suelen ser necesarias para las aplicaciones comunes. Algunos de los modelos de transferencia radiativa disponibles libremente son, Trophospheric Ultraviolet Visible radiative transfer (TUV, <http://www.acd.ucar.edu/TUV/>) (Madronich, S. & Flocke, 1995) y el modelo LibRadtran. El programa central de LibRadtran es la herramienta de transferencia radiativa UVSPEC (UV-Visible Spectroscopy), que calcula el campo radiativo en la atmósfera terrestre. UVSPEC fue diseñado originalmente para calcular el flujo actínico en las regiones UV y VIS del espectro solar (Mayer and Kylling, 2005). El programa UVSPEC está diseñado de manera sencilla y versátil para poder introducir en un fichero de entrada las condiciones en las que se quiere realizar una simulación, permitiendo muchas opciones diferentes: selección de la composición de atmósfera, propiedades del aerosol presente, características de la superficie, etc. Más información sobre el paquete LibRadtran puede encontrarse en la web (<http://www.libradtran.org/>).

Algunos modelos hallan directamente la banda espectral que se requiera, UV-B, UVER o determinan el UVI. Otros dan como salida la irradiancia espectral y hay que realizar una integral numérica, de acuerdo con la Ecuación 3, para hallar la UVR, UVER o el UVI respectivamente. De los modelos mencionados el mejor rendimiento se obtiene cuando se emplean los modelos de transferencia radiativa siempre y cuando la información de entrada es conocida. Sin embargo, hay que tener presente que tienen alta complejidad de cálculo, y que algunos datos de entrada (ej. propiedades ópticas de los aerosoles), no suelen estar disponibles, lo que puede dar lugar a grandes incertidumbres en la modelación. Una alternativa para aplicaciones como la predicción del UVI o la elaboración de mapas es utilizar modelos empíricos (McKenzie, 1996). Los cuales por su facilidad de uso y su velocidad de cálculo se encuentran más extendidos. Mientras otra alternativa sería el uso de los modelos de transferencia radiativa ya disponibles sino se cuenta con medidas terrestres de la variable objetivo.

2.8 Aplicaciones de la modelación.

El conocimiento de la disponibilidad de la energía solar es indispensable porque facilita el aprovechamiento adecuado de este recurso energético mediante el uso de sistemas y tecnologías que lo transforman en diversas formas de energía útil; sistemas fotovoltaicos o térmicos para la producción de electricidad, destilación/detoxificación solar para separación/destrucción de contaminantes, climatización de edificaciones. Lo que deriva en diversos ámbitos de investigación: a) la formación y descomposición de contaminantes urbanos fotosensibles; b) la fotodegradación de plásticos, fibras, colorantes artificiales y naturales; c) el correcto escalado de tecnologías solares para descontaminar el agua (Reina et al., 2019), (d) estudios de exposición solar según susceptibilidad individual por tipo de piel y/o envejecimiento acelerado en función de climas de radiación específicos; (e) el desarrollo y la modificación de los ecosistemas (Häder et al., 2007).

2.8.1 Aplicación para construir mapas de exposición solar

El uso de mapas UVI es necesario para cubrir completamente una región determinada. Sin embargo, suele faltar una alta densidad de mediciones de radiación solar espectral UVR para representar espacialmente todo el territorio. Por tanto, otras fuentes (como la información meteorológica terrestre y por satélite) y métodos (como los algoritmos empíricos y la modelización de la transferencia radiativa vistos en la sección anterior) suelen ser necesarios. En la ref. (McKenzie, 1996) utilizaron la modelización de la transferencia radiativa y las relaciones empíricas para desarrollar un algoritmo que recupera el UVI para todas condiciones de nubosidad considerando las siguientes variables: irradiancia total, la TOC, la altitud, la presión superficial, la temperatura y humedad. Este algoritmo se utiliza actualmente para producir mapas y series temporales de UVI sobre Nueva Zelanda <https://niwa.co.nz/>. En (Fioletov et al., 2003), (Fioletov et al., 2010) encontraron una relación estadística entre la irradiación total y la UVER, teniendo en cuenta la TOC, la cubierta de nieve, la temperatura y la altitud. Aplicaron este algoritmo a 45 estaciones con mediciones de irradiancia total en Canadá para estimar una climatología del UVI. Se produjeron diferentes tipos de mapas estadísticos como la dosis diaria media mensual UVER, el UVI medio del mediodía, el percentil 95 del UVI del mediodía y UVI medio por hora. En la actualidad esta información se encuentra disponible en <https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/e/ozone/uv.htm>. Recientemente el Programa de Ciencias Aplicadas de la NASA se asoció con el CDC (Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades) para crear el primer mapa disponible públicamente de RUV para los Estados Unidos (Zhou et al., 2019). Abarcan el periodo 2005-2015 y está disponible en la red de Seguimiento Nacional de la Salud Pública Ambiental del CDC, que ofrece información y datos sobre cuestiones de salud relacionadas con factores ambientales. Por su lado, Chile incorporó en el año 2020 estimaciones de medidas espectrales de UV-B, UV-A, PAR e IR de forma espacial, pero solo se encuentran disponibles desde Antofagasta hacia el norte (Chilean Ministry of Energy, 2021). Además, la información sobre riesgo de exposición al UVER por DMC solo se presenta usando un índice de eritema (UVI horario), no se ofrecen valores de dosis acumuladas de UVER, (SED/MED), menos aun discutiendo las diferentes susceptibilidades individuales o t_{ery} durante un período de tiempo (mensual, estacional o anual), dependiendo de la susceptibilidad o fototipo de piel. Con este tipo de herramientas los funcionarios de salud pública, los planificadores urbanos o las personas preocupadas por la exposición al sol tendrían información complementaria sobre los valores acumulados mes a mes y las dosis recibidas por tipo de piel y no solo la cantidad de RUV instantánea que llega a la superficie, lo que constituye un paso importante para informar a la población y ayudar a reducir los riesgos de cáncer de piel.

2.8.2 Aplicación en el tratamiento solar del agua

Por otro lado, se requiere de investigación aplicada, que aporte al conocimiento tanto en el desarrollo de nuevos fotocatalizadores para degradar contaminantes orgánicos que utilicen eficientemente el recurso solar, como en la caracterización energética de potenciales áreas de interés. Los métodos fotoquímicos para la degradación de contaminantes disueltos en agua se basan en proporcionar energía a los compuestos químicos, la cual es absorbida por las distintas moléculas para alcanzar estados excitados el tiempo necesario para experimentar reacciones. La energía radiante es absorbida por las moléculas en forma de unidades cuantizadas denominadas fotones, los cuales han de contener la energía necesaria para excitar electrones específicos y formar radicales libres, dando lugar a una serie de reacciones en cadena. Estos métodos basados en la radiación electromagnética utilizan normalmente RUV debido a la mayor energía de sus fotones, tal como indica la Ecuación 2. Si en estos procesos fotoquímicos participa un catalizador, hablamos de fotocatalisis heterogénea. La generación artificial de fotones requeridos para la activación

fotocatalítica de un semiconductor es la principal fuente de costos durante la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales. De ahí, la importancia de buscar fuentes alternativas de suministro de energía en el proceso tecnológico. En este contexto se enmarca la fotocatalisis solar heterogénea para la descontaminación de aguas, una de las aplicaciones más exitosas de la fotoquímica solar, lo cual es corroborado por proyectos que actualmente se encuentran en operación (Malato et al., 2016). La capacidad de la RUV de fotodegradar, en condiciones catalíticas, a un vasto número de contaminantes ha sido ampliamente demostrada en la literatura. Bisphenol A (S. Malato et al., 2000), Oxamyl (Malato et al., 2002), Oxytetracycline (Pereira et al., 2011), Spiramycin (Lofrano et al., 2018). Mostraron una dependencia lineal de la degradación de los contaminantes aumenta con el incremento de la RUV, mostrando una intensidad de luz en el rango de 20 a 30 Wm^{-2} (0,2-0,3 mol de fotones $\text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ en los 300-400 nm) (Malato et al., 2009). Por tanto, altos valores de UVR pueden mejorar el rendimiento fotocatalítico. En los últimos años se han estudiado diferentes tipos de semiconductores TiO_2 (Cuevas, 2011), (Lofrano et al., 2018), CdS (Malato et al., 2009), ZnO (Antil-martini et al., 2017), entre los que podemos encontrar como materiales promisorios los Oxihaluros de Bismuto BiOX , X: Cl, Br, I (Contreras et al., 2019). Sin embargo el dióxido de titanio (TiO_2) ha demostrado tener una de las mayores actividades fotocatalíticas (Fujishima et al., 2000). Este material puede ser activado utilizando RUV, debido a que la energía que separa su banda de valencia y banda de conducción es superada por la energía que contiene parte del espectro solar ($390 \text{ nm} > \lambda > 300 \text{ nm}$) (Malato et al., 2009).

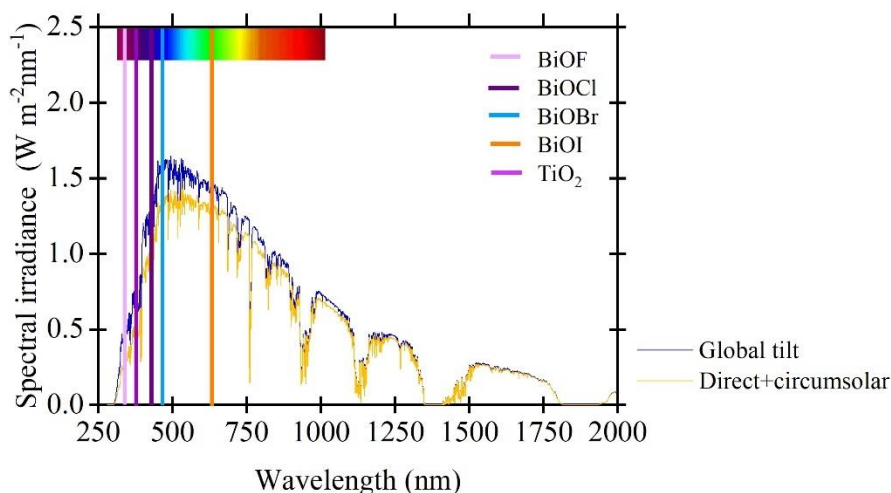


Figura 11. Espectro de emisión solar siguiendo el propuesto por ASTM G173-03 para radiación directa y global en una inclinación de 37°. La curva de línea azul representa la IG y el área naranja es la radiación que llega a la superficie terrestre. Líneas verticales representan la máxima absorción ($\lambda_{\text{máx}}$) reportada por diversos materiales con el referente TiO_2 .

En la Tabla 5 se muestra los distintos valores de energía band gap y las correspondientes energías de valencia y conducción que presentan estos semiconductores basados en Bismuto en comparación al TiO_2 . El BiOBr y BiOI presentan un band gap menor a 3eV, lo que otorga actividad en la región VIS, exceptuando los compuestos BiOF y BiOCl que presentan mejor actividad en el UV. El intervalo de banda

de BiOCl está en el rango de 3.2-3.4 eV, similar al de TiO₂ (3.0-3.2 eV). De esta manera se puede observar que el halógeno tiene un efecto importante en la estructura de la banda de los BiOX. A medida que avanzamos en el grupo VII, aumenta el número atómico lo que genera un estrechamiento de la banda prohibida de BiOF a BiOI. Con respecto a la estructura de la banda, mejorar la sensibilidad de la luz visible (reducir el band gap) resulta crucial para que el semiconductor pueda aprovechar eficientemente el recurso energético solar y alcanzar un método barato y “verde” tan necesario para las aplicaciones industriales a gran escala.

Tabla 5 Posición de bandas para algunos semiconductores. Adaptado de (Malato et al., 2009)

Semiconductor	$\lambda_{\text{máx}}$ (nm)	BV (V vs. NHE±0.1V)	BC (V vs. NHE±0.1V)	Eg (eV)	Ref.
TiO ₂	380	+3.1	-0.1	3.0	(Malato et al., 2009)
SnO ₂	318	+4.1	+0.3	3.9	
ZnO	440	+3.0	-0.2	2.8	
CdS	497	+2.1	-0.4	2.5	
BiOF	341	4.20	0.60	3.64	(Su et al., 2010)
BiOCl	351	1.93	1.29	3.22	(Jiaxin et al., 2018)
BiOBr	422	1.67	0.97	2.64	
BiOI	626	0.83	0.94	1.77	

Banda de valencia (BV) y conducción (BC), energía band gap (Eg)

2.9 Bases de datos globales, locales y satelitales.

La información proveniente de las bases de datos solares históricas puede ser muy útil en la toma de decisiones en centrales térmicas, la elección de la tecnología de conversión óptima, el diseño de sistemas específicos para determinadas regiones o zonas y, por último, la correcta operación y mantenimiento de sistemas de conversión de energía solar ya instalados. Para el estudio del recurso solar, la mejor precisión se consigue con mediciones realizadas con piranómetros y espectroradiómetros. Sin embargo, los altos costos de compra, calibración y mantenimiento de estos dispositivos, supone una limitante actual. Por otro lado, las estaciones de mediciones se hallan en lugares muy heterogéneos a lo largo del planeta. Eso provoca que existan muchas regiones en las cuales el recurso solar está insuficientemente medido; y, a su vez, los valores de radiación que se recogen en muchas ocasiones son el medio diario y medio mensual, cuando lo realmente interesante es poseer valores horarios o más detallados.

Tabla 6. Bases de datos radiométricos y variables meteorológicas con resolución horaria.

Base de Datos	Región	Viabilidad	Fuente	Period	Variables
Meteonorm	Global	Libre	www.meteonorm.com	TMY	GHI, DNI, Wind, RH
NREL	América		http://www.nrel.gov/	1998-2017, TMY	GHI, DNI, DHI
PVGIS v5	Global		https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/releases/pvgis51	2005-2006, TMY	GHI, DNI, DHI
Explorador solar	Chile	Web libre	http://solar.minenergia.cl/	2004-2016 TMY	GHI, DNI, Temp, HR

Solargis	Global	De pago	http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI	1994-today, TMY	GHI, DHI, Temp, WS
Vaisala	Global	De pago	https://www.vaisala.com/	1996-today, TMY	GHI, DHI, DNI, Temp, HR
Reuniwatt	Global	De pago	https://reuniwatt.com/es/	2004-today	GHI, DHI, DNI, Temp, WS
Soda-Helioclim	Europa Africa	De pago	https://www.pvsyst.com/	2004-today, TMY	GHI
Solar Anywhere	USA	De pago	https://www.solaranywhere.com/	1998-today, TMY	GHI, DHI, Temp, WS
Vortex Solar	Global	De pago	Satélite	1997-today	GHI, DNI, Temp

Año típico meteorológico (TMY en inglés), radiación global horizontal (GHI), radiación directa normal (DNI), radiación horizontal difusa (DHI), Temperatura (Temp), velocidad de viento (WS).

La Red Agrometeorológica del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias INIA, disponible en: <http://agromet.inia.cl/> ofrece valores de variables climáticas y radiométricas a lo largo del territorio chileno. Sin dejar de mencionar la herramienta en línea “Explorador Solar” la cual ofrece estimaciones de IG, Idir, Idif, bandas espectrales, así como años típicos meteorológicos (TMY). Datos disponibles en: <http://solar.minenergia.cl/>. Como se muestra en la Tabla 4, Chile ofrece acceso a medidas del recurso solar con libre acceso en comparación con grandes bases de datos globales.

Sin embargo, la Dirección Meteorológica de Chile es la entidad competente para realizar las mediciones de variables radiométricas y meteorológicas. Actualmente ofrece la red de monitoreo de la RUV más amplia en el país. Su catastro de estaciones se encuentra disponible en <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>. Determina el valor del UVI y emite pronósticos e informes relacionados. Una actualización de datos radiométricos del 2021 informa que contiene 432 estaciones de IG y 28 estaciones que miden la RUV en todo el país. Aunque algunas estaciones de UV presentan problemas de intermitencia y faltantes de datos. La CONAC (Corporación Nacional del Cáncer) y el Departamento de Física de la USACH (Universidad de Santiago de Chile) ofrece su apoyo y mide el UV-B, que causa eritema en la piel (UVER). Las estaciones de monitoreo pertenecientes a la Universidad de Santiago de Chile (USACH), disponible en <http://ambiente.usach.cl/meteo/> han estado monitoreando la UVER y otras variables climáticas desde el año 2001. En esta tesis se trabajó con esta variable por contarse una serie de tiempo extensa (5 años) de mediciones simultáneas entre la UVER e IG. En la sección 2.3 se hablará con detalle de los instrumentos de medición de ambas bandas usados en la USACH (Departamento de Física).

A lo largo de la historia se han puesto en órbita distintos instrumentos en el espacio para poder obtener medidas de parámetros atmosféricos a escala global. El departamento de observación por satélite del Instituto de Meteorología de Holanda (KNMI) estudia la composición y la dinámica de la atmósfera global mediante observaciones por satélite de los gases traza, los aerosoles, las nubes y los vientos. Disponible en <https://www.knmi.nl/research/satellite-observations>. Entre los servicios de datos por satélite desarrollados del departamento se encuentran TROPOMI, OMI (Ozone Monitoring Instrument), Aeolus, GOME-2, y SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography), entre otros. El OMI es uno de los cuatro instrumentos de que dispone el satélite EOS-Aura de la NASA, lanzado en julio de 2004. El objetivo de Aura es la observación de la química atmosférica, y en especial,

la monitorización de la capa de ozono, el clima de la Tierra y la contaminación atmosférica. OMI mide ozono, otros gases traza como dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, formaldehído (CH₂O), aerosoles (partículas finas), y también radiación ultravioleta en superficie. El TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) es un instrumento que mide la radiación solar UV proveniente del sol y la retro-dispersada por la atmósfera terrestre a 6 longitudes de onda en las que se produce una absorción parcial del ozono. El primer espectrómetro de TOMS fue puesto en órbita por primera vez el 24 de octubre de 1978 a bordo del satélite Nimbus-7). Los datos de TOC del instrumento TOMS fueron utilizados en este trabajo y obtenidos en (<http://toms.gsfc.nasa.gov>). Las nubes son fuertes reguladores del balance radiativo de la Tierra. Determinamos la cobertura de la nube utilizando International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP-H series) para 21 años desde 1985-2015. Estos datos están disponibles en el ISCCP website (<https://isccp.giss.nasa.gov/>). El ISCCP se creó en 1982 como parte del Programa Mundial de Investigación Climática (WCRP) para recoger mediciones de radiancia de los satélites meteorológicos y analizarlas con el fin de inferir la distribución global de las nubes, sus propiedades y sus variaciones diurnas, estacionales e interanuales (Young et al., 2018a). Los conjuntos de datos sobre las nubes del ISCCP proporcionan nuestra primera visión global sistemática del comportamiento de las nubes en las escalas espaciales y temporales del clima, y además cubren un periodo de tiempo lo suficientemente largo como para abarcar varios ciclos de El Niño - La Niña.

CLOUDSAT es una misión satelital diseñada para medir la estructura vertical de las nubes desde el espacio (<https://cloudsat.atmos.colostate.edu/>). Los datos del radar producen imágenes detalladas de las estructuras de las nubes que contribuirán a una mejor comprensión de las nubes y del clima. CLOUDSAT fue seleccionado como una misión satelital Pathfinder de la NASA en 1999 para proporcionar las observaciones necesarias para avanzar en la comprensión de la abundancia, distribución, estructura y propiedades radiativas de las nubes. Desde 2006, CLOUDSAT ha volado el primer radar de nubes de longitud de onda milimétrica basado en un satélite, un radar que es más de 1000 veces más sensible que los radares meteorológicos existentes. A diferencia de los radares meteorológicos terrestres, que utilizan longitudes de onda centimétricas para detectar partículas del tamaño de una gota de lluvia, el radar de CLOUDSAT permite detectar las partículas mucho más pequeñas de agua líquida y hielo que constituyen las grandes masas de nubes que conforman nuestro clima. CLOUDSAT fue co-manifestado con el satélite CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) a bordo de un cohete Delta II para su lanzamiento el 28 de abril de 2006. En una serie de maniobras, CLOUDSAT y CALIPSO se unieron a tres satélites que ya estaban en órbita (“Aqua”, “PARASOL” y “Aura”) para formar una constelación de satélites conocida como “A-Train” el 1 de junio de 2006. Los satélites vuelan en una órbita casi circular con una altitud ecuatorial de aproximadamente 705km. CLOUDSAT mantiene una formación cercana con Aqua y una formación particularmente cercana con CALIPSO, proporcionando observaciones casi simultáneas y colocadas con los instrumentos de estas dos plataformas. Se están desarrollando productos de datos combinados utilizando flujos de datos de CloudSat + Aqua y CloudSat + CALIPSO. Algunos parámetros pueden que pueden ser extraídos a partir de datos del AQUA, incluyen a; flujo de energía radiante, aerosoles, cobertura del suelo, fitoplancton y materia orgánica disuelta en los océanos y temperatura del agua. Con estos datos, se ha promocionado un gran paso de avance científico en el área de mudanzas climáticas globales.

2.9.1 Calidad de los datos radiométricos

Antes de que las mediciones se utilicen para la evaluación del rendimiento o para la adaptación de series temporales modeladas, todos los valores cuestionables en las series temporales medidas deben

identificarse y marcarse mediante procedimientos de control de calidad. El control de calidad (QC, por sus siglas en inglés) es un proceso tedioso y lento si no se cuenta con las herramientas adecuadas y experiencia de varios años de trabajo. Para poder determinar que los valores de radiación solar medidos son representativos estadísticamente, deben ser filtrados previamente siguiendo algún protocolo de control de calidad. En particular, se utiliza ampliamente la metodología seguida por la Baseline Solar Radiation Network (BSRN) (Heimo et al., 1993), (Dutton, n.d.), (Zo et al., 2017), o los controles de calidad de NREL SERI QC (NREL, 1993). Para resolver este problema, el servicio web gratuito, www.bqcmethod.com, implementa el algoritmo BQC incorporando tanto los conjuntos de datos reticulados como las estaciones de referencia necesarias para utilizarlo en toda Europa desde 1983 hasta 2018 (Urraca et al., 2020). Otros científicos y organizaciones también han propuesto sus metodologías alternativas, como es el caso del servicio web BQC <http://www.bqcmethod.com/>, o el servicio basado en la web de SoDa <http://www.soda-pro.com/>. La mayoría de estos niveles de control de calidad, presentan las mismas restricciones, (1) rangos físicamente posibles, (2) outliers, (3) relaciones entre cantidades, (4) consistencia, (5) examen de series temporales. Según (Armada, 2017) un proceso simple de filtrado seguiría los siguientes pasos:

1. Determinación de valores con problemas de medición (NaN): dichos valores no se consideran en los procesos subsiguientes.
2. Cálculo de valores horarios usando la técnica de las “4-cajas” de Roesch y Long (Roesch et al, 2011): el cálculo del promedio horario se calculó dividiendo la hora (hr.) en cuatro periodos de 15 minutos. El cálculo del promedio de la hr. se realiza considerando dos cajas de 15 minutos antes y dos cajas después.
 - 2.1 Una caja de 15 minutos debe tener al menos 60% de sus datos válidos (9 minutos) para ser considerada valida.
 - 2.2 Una hr. debe tener sus cuatro cajas de 15 minutos para ser considerada valida.
3. Control de valores contra irradiancia extraterrestre I_{TOA}
4. Control de ciclo diurno. Un día debe tener todas sus hrs. válidas para ser considerado válido.
 - 4.1 Un mes debe tener al menos 60% (17 o 18) de sus días válidos para ser considerado válido.
 - 4.2 Un Mes Representativo (o sea, un Ciclo Diurno) se expresa como un día medio con sus hrs., en el que cada hr. es el promedio de las hrs. de los días válidos del mes en cuestión.

2.10 Influencia directa e indirecta de la radiación solar espectral ultravioleta en la salud humana.

Las radiaciones espectrales UV, VIS e IR tienen características físicas, fotobiológicas y fotoquímicas distintivas. La mayoría de los efectos fotobiológicos en la región IR se deben a la disipación de calor mientras que los efectos en la región UV y VIS se deben a reacciones fotoquímicas. Aunque pequeñas dosis de RUV son esenciales para la salud y pueden utilizarse para; tratar la psoriasis, desinfección/esterilización (Sagripanti and Lytle, 2020), o la producción de vitamina D (McKenzie et al., 2009), (Corrêa et al., 2013). Existe evidencias de efectos adversos que justifican la necesidad de establecer dosis límites de exposición solar. La gravedad del efecto depende principalmente de la longitud de onda, su intensidad, la duración de la exposición, la sensibilidad individual de cada piel. Los efectos crónicos incluyen dos grandes problemas en la salud: cáncer de piel (Rivas et al., 2020), cataratas (Wang et al., 2012) y otras enfermedades oculares (Behar-Cohen et al., 2014). Otros efectos adversos cutáneos de la

exposición a la RUV sin las medidas preventivas mínimas son, las quemaduras solares, la fotosensibilidad, las fotodermatitis, la inmunodepresión, el fotoenvejecimiento (Flament et al., 2013) y la fotocarcinogénesis (Parker, 2021).

Por otro lado, la RUV desempeña un papel importante en las reacciones fotoquímicas de producción de O_3 troposférico (Hodzic and Madronich, 2018). Estudios realizados por Li et al. (2017) encontraron que cambios significativos en la intensidad de la RUV a nivel del suelo alteraron la calidad del aire en la ciudad de Nanjing, China. Otro estudio por (Wilson et al., 2019) informa que los efectos negativos sobre la salud humana dependerán del equilibrio entre el impacto de la RUV y la reducción de la calidad del aire. Según el estudio de (Vicedo-Cabrera et al., 2020) la exposición diaria al O_3 troposférico en ciudades contaminadas está asociada con un mayor riesgo de muerte. Los hallazgos, basados en datos de más de 400 ciudades en 20 países de todo el mundo, muestran que más de 6.000 muertes cada año se habrían evitado en las ciudades seleccionadas si los países hubieran implementado estándares más estrictos de calidad del aire (Vicedo-Cabrera et al., 2020). La mayoría de estos estudios han encontrado asociaciones positivas entre el O_3 troposférico y la mortalidad, pero las diferencias en el diseño y la calidad del estudio hacen que sea difícil sacar conclusiones consistentes entre los diferentes países de estudio.

Este gas oxidante y altamente reactivo es uno de los principales componentes del smog. Además, impacta el clima, ya que es un gas de efecto invernadero, que se estima contribuye entre $0,2$ y $0,6 W m^{-2}$ al forzamiento radiativo global del clima actual (Myhre et al., 2013). Por otro lado, la producción de O_3 ocurre principalmente durante periodos cálidos del año y junto a él se forma también material particulado secundario que contribuye a la concentración de $MP_{2.5}$ (Menaes et al., 2020). Menaes ha reportado el incremento de la fracción de aerosoles secundarios en Santiago. La Figura 12 muestra la evolución de partículas secundarias especialmente en la época cálida en la comuna de las Condes, ubicada en Santiago de Chile superando desde mediados de la década recién pasada el 50 % del $MP_{2.5}$.

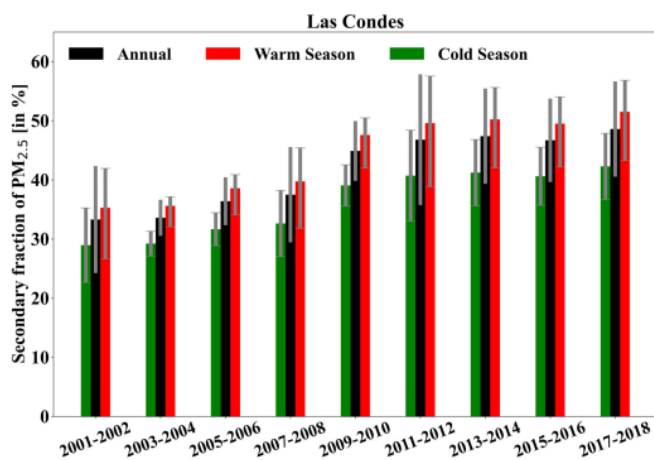


Figura 12. Evolución de la fracción diaria (24 hrs.) de aerosoles secundarios (en %) en las Condes. Los resultados se muestran para todo el año (barras negras), así como para las estaciones fría (verde) y cálida (roja). Fuente de referencia: (Menaes et al., 2020).

Se han documentado efectos negativos de la exposición a altas concentraciones de O_3 , algunos de los cuales incluyen la reducción de la biomasa (Ambasht and Agrawal 2003), el aumento del riesgo de

mortalidad prematura (Bell et al. 2006) o el estrés oxidativo en la piel (He et al. 2006; Fuks et al. 2019). Según Fuks et al. (2019) este gas, al entrar en contacto con la superficie de la piel, modifica sus componentes reparadores y acelera la producción de radicales libres, que acaban oxidándola. Esta piel debilitada es mucho más vulnerable al daño genético producido por el efecto acumulativo de la RUV y esto hace que el riesgo de desarrollar cáncer de piel aumente en ciudades contaminadas como Santiago. La metrópoli urbana de Santiago de Chile, ha destacado históricamente problemas de calidad del aire debido a los altos niveles de contaminantes fotoquímicos, donde se incluye el O₃ troposférico (Rubio et al. 2004); (Gramsch et al., 2016^a); (Seguel et al. 2020). En la Figura 13 se evidencia la evolución trianual del percentil 99 de las concentraciones de O₃ troposférico.). Claramente se puede apreciar la continua excedencia de la norma de calidad del aire para el O₃ según el límite recomendado por la Comisión Nacional del Medio Ambiente correspondiente a 120µg/m³N (media de 8h, p99 de máx. 24h) (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2013). Resultado similar fue reportado por (Seguel et al. 2020), donde se detalla que el sector oriente es el más afectado por excedencias de la norma de 8hrs. (61µg/m³N). Es importante mencionar que, al momento de escribir esta tesis, en Chile solo se cuenta con 30 estaciones que miden O₃ troposférico y apenas 6 poseen registros validados o preliminares.

Así el incremento actual de enfermedades en la piel en Chile (Rivas et al., 2020) (ver Figura 1 y Tabla 1) puede ser la consecuencia de la agresividad del medio ambiente contra la piel. Por lo que, la radiación solar no sólo supone un riesgo para la salud debido al impacto directo de la exposición a la RUV, sino que un efecto indirecto adicional que afecta negativamente a la salud humana es la formación de O₃ troposférico a nivel del suelo, lo que a su vez tiene influencia en la formación de partículas secundarias y, más general, por su impacto sobre la capacidad oxidativa de la atmósfera.

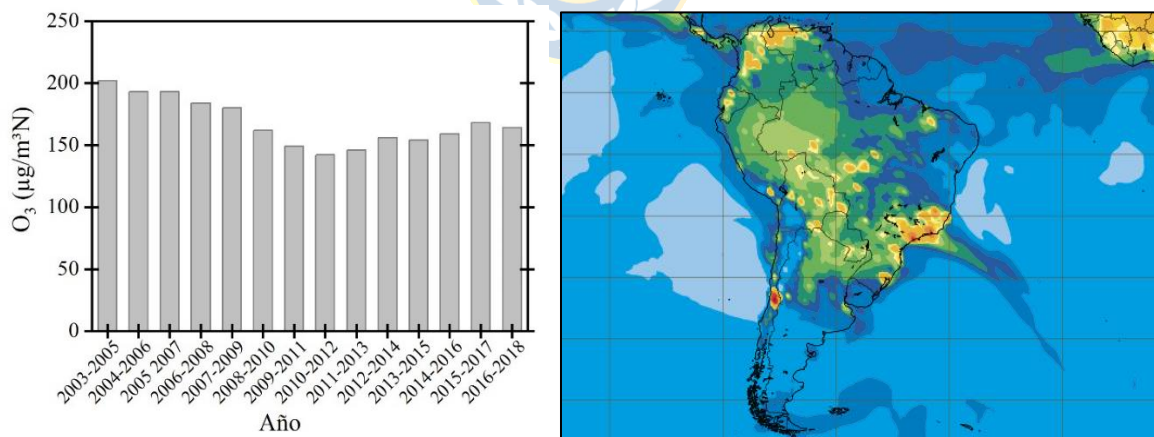


Figura 13. (izquierda) Evolución trianual del Percentil 99 de las concentraciones de O₃ troposférico en la Región Metropolitana, 2003-2018, Fuente: SINCA - MMA 2019. (derecha) O₃ troposférico modelado en el sistema integrado de predicción de ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) correspondiente al día 4 de julio, 2021. Las zonas coloreadas en amarillo, naranja y rojo muestran valores altos de O₃, mientras que las zonas verdes y azules muestran valores bajos. Fuente WHO, <https://public.wmo.int/>.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de Estudio, características climáticas y topográficas

El área de estudio se extiende a lo largo de la costa oeste de Sudamérica (32°S-37°S), incluye las regiones de Valparaíso, Santiago metropolitano, Bernardo O'Higgins, Maule y Ñuble en las cuales se alberga la mayor parte de la población chilena. Según el Censo de 2017 (<https://www.ine.cl/>), la población alcanzó los 11.101.673, habitantes (DGA, 2016) que corresponden al 61,65% de la población chilena. Tiene una superficie de 78.482 km². Actualmente ocupa principalmente los sectores del secano, desde el río Petorca (32°S), limitando con la región mediterránea árida, hasta el río Laja (37°S), limitando con la región per húmeda (DGA, 2016). El relieve que presenta esta región corresponde a tres unidades que son de este a oeste, la Cordillera de Los Andes, depresión central (cuenca de Santiago) y la Cordillera de la Costa. La zona central de Chile está muy contaminada debido a la combinación de las emisiones urbanas de Santiago y las ciudades vecinas, debido a los patrones de circulación a escala sinóptica y la topografía circundante (Gramsch et al., 2016b), (Lapere et al., 2021b). Así, durante los meses cálidos y secos del verano, por ejemplo la ciudad de Santiago está expuesta a concentraciones relativamente altas de oxidantes secundarios (González-Rodríguez et al., 2021b), mientras que en invierno está expuesta a altas concentraciones de partículas y óxidos de nitrógeno (Rappenglück et al., 2000), (Gramsch et al., 2016b). Siguiendo la clasificación de Köppen-Geiger (Figura 8c) en esta parte central de Chile predomina el clima mediterráneo con lluvias invernales (Csb-Csb), y el clima mediterráneo con lluvias invernales e influencia costera (Csb). Los veranos son cálidos, áridos y despejados y los inviernos son fríos. La temperatura media anual es de 12,7°C, mientras que el mes más cálido es enero, con una temperatura de 18,8°C, y el mes más frío es julio, con 7°C, según datos medios por el Centro de Investigación del Clima y la Resiliencia en (CR2, <http://www.cr2.cl/>). La región central se caracteriza por ser semiárida, con una precipitación media anual que oscila entre los 100-500 mm en el valle central, concentrada en el invierno austral (junio-agosto), (Viale and Garreaud, 2015). Con una estación seca prolongada, de 7 a 8 meses con alta radiación global (González-Rodríguez et al., 2017), baja humedad relativa y altas temperaturas desde septiembre hasta abril. La región también se caracteriza por tener muchos días de sol a lo largo del año. Producto de sus características climáticas, demográficas y geográficas se dedicó dos trabajos a la ciudad de Santiago y se incorporó la ciudad de Antofagasta (-23.59°S, -70.39°W, 150 msnm) ubicada en el Norte de Chile (Anexo I). La Figura 14 muestra el area de estudio donde se realizó esta tesis, y se incluyó una ampliación donde se incluye la ciudad de Antofagasta en el Anexo II.

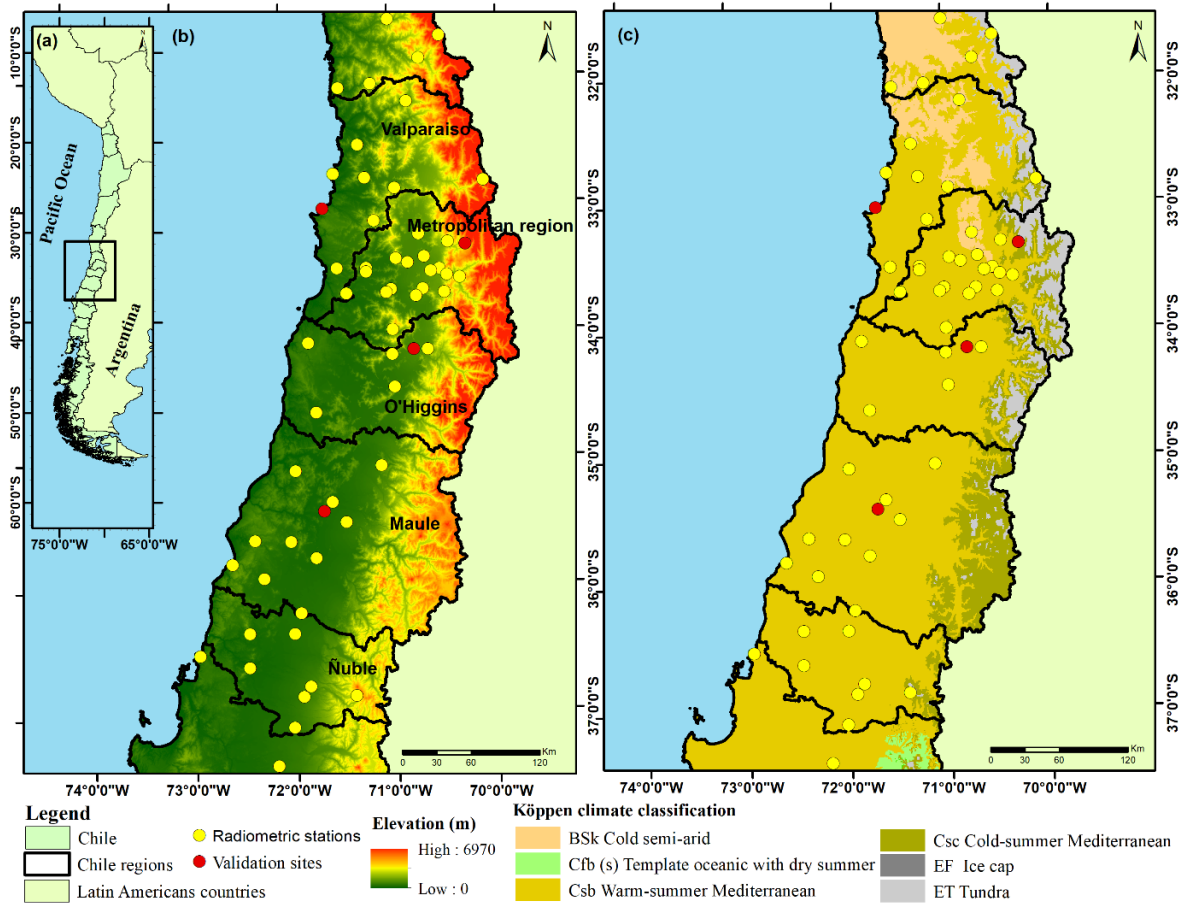


Figura 14. (a) Ubicación del área de estudio en Chile, con (b) distribución espacial de las estaciones radiométricas localizadas en la zona central de Chile y perfil topográfico y (c) clasificación de zonas climáticas Köppen-Geiger para el área de estudio. Los shapefile fueron obtenidos en el Ministerio de Bienes Nacionales, Infraestructura de Datos Geospaciales (IDE, <http://www.ide.cl/>).

3.2 Bases de datos globales, locales y satelitales.

Valores diarios de la columna total de O_3 estratosférica (TOC, DU) se obtuvieron de la página web OMI/OMPS Ozone Time Series Data (<http://toms.gsfc.nasa.gov>). El TOC y el OC se calcularon mediante promedios de 7 años (2012-2019) y (2007-2015) respectivamente. Los perfiles de la frecuencia de aparición de nubes (OC, %) a lo largo de Chile se estiman como la relación entre el número de bins nublados y el total de bins escaneados por CLOUDSAT Y CALYPSO (<http://www.cloudsat.cira.colostate.edu/>). La máscara de nubes del radar (o lidar) del producto (Hagihara et al., 2010) fue empleada para los cálculos. La inclusión de ambos instrumentos permite mejorar la presencia de nubes debido a que el radar no observa bien las nubes finas mientras que el lidar puede detectar las nubes ópticamente finas. Por otro lado, se obtuvieron valores horarios de la cobertura de nubes (CC, oktas) desde Proyecto Internacional de Climatología de Nubes por Satélite (ISCCP-H, <https://isccp.giss.nasa.gov/>) para los 21 años comprendidos entre 1985 y 2015. Estos datos están disponibles en el sitio web del ISCCP. Los parámetros meteorológicos, incluida la temperatura del aire

ambiente (T), la precipitación (lluvia) y la humedad relativa (HR) se recogieron utilizando los registros oficiales del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA, <https://agrometeorologia.cl/>). Las nubes son uno de los principales moduladores de la radiación UV, especialmente en las latitudes medias (Miguel et al., 2012). El total de horas anuales de insolación depende de la ubicación geográfica y se estimó a partir de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC, <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>). Mediciones de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de radiación solar global (IG) y Fracción de nube (CF, cloud fraction) fueron obtenidas desde <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>. La profundidad óptica del aerosol (AOD) fue obtenida desde el sitio de Aerosol Robotic Network (AERONET, <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) (Giles et al., 2019).

El sitio radiométrico empleado para el desarrollo de los modelos empíricos se encuentra en la zona urbana de Santiago (33,27°S, 70,41°O, 512 m.s.n.m), en la comuna de Estación Central. Se midió la radiación UVER y el IG en el techo del edificio del Departamento de Física en la Universidad de Santiago (USACH). Los valores horarios de la IG (350-1150 nm) fueron medidos con un piranómetro construido en la USACH. El mismo se encuentra compuesto por un detector de silicio acoplado a un amplificador encerrado en una carcasa de aluminio. El cual fue calibrado con un piranómetro Kipp y Zonen modelo CMP22. El sensor analógico de eritema biológico UV-B; modelo PMA-2101 (Solar Light Company, Inc.) fue usado para la medida horaria del UVER (280-315 nm). La Figura 15 muestra la ubicación de los sensores en el techo del edificio.

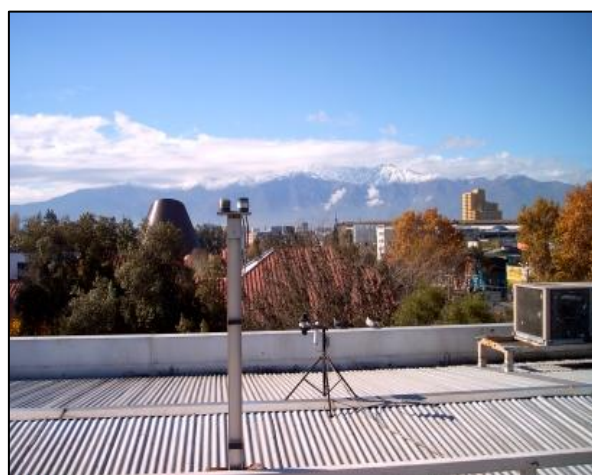


Figura 15. Instrumentos radiométricos ubicados en el techo del edificio del Departamento de Física en la USACH con vista hacia el poniente y hacia el oriente, al fondo, Cerro San Ramón. Fuente: <http://ambiente.usach.cl/uv/santiago.html>

El conjunto de datos actualizados de 2021 de la DMC contiene datos de IG para ~199 lugares en la región central de Chile (hasta la región de Ñuble). Las mediciones de IG fueron sometidas a un análisis de calidad de datos para identificar errores y datos faltantes siguiendo el criterio de la Red de Radiación Superficial de Referencia (BSRN) (Heimo et al., 1993), (Zo et al., 2017). En la sección 2.4 se mostraron detalles de

este proceso. Sólo se consideraron las estaciones radiométricas con series de datos a largo plazo (más de 5 años). Bajo este criterio fueron seleccionadas 57 estaciones a través de la región de Chile mediterráneo, 9 estaciones de Valparaíso, 17 de Metropolitana, 7 de O'Higgins, 8 de Maule, y 5 de Ñuble. Incluyendo algunas estaciones en regiones cercanas, e.g., 5 para Coquimbo y 4 para el Biobío. Las series horarias de IG se obtuvieron del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA, <https://agrometeorologia.cl/>). Las estaciones de monitoreo se muestran a continuación en la Tabla 7 y Figura 12 b, c.

Tabla 7. Estaciones radiométricas seleccionadas que miden IG en Chile central.

Id	Nombre de la estación (Region)	Zona geográfica	Altitud (m)	Lat.	Lon.
1	Huintil, Illapel (Coquimbo)	Valle	590	-31.57	-70.99
2	Hualtatas, Salamanca (Coquimbo)	Cordillera Andina	3632	-31.70	-70.52
3	Chillepin, Salamanca (Coquimbo)	PreCordillera	887	-31.88	-70.71
4	Tilama, Los Vilos (Coquimbo)	Valle	449	-32.08	-71.16
5	Quillimari, Los Vilos (Coquimbo)	Valle	27	-32.11	-71.46
6	Liceo Agrícola (Valparaíso)	Valle	665	-32.22	-70.83
7	Catapilco, Zapallar (Valparaíso)	Valle	81	-32.56	-71.29
8	Quintero (Valparaíso)	Costa	5	-32.78	-71.52
9	Llay llay (Valparaíso)	Valle	442	-32.90	-70.95
10	La Cruz (Valparaíso)	Valle	181	-32.82	-71.23
11	Los Libertadores (Valparaíso)	Cordillera Andina	2955	-32.84	-70.11
12	Cuncumen (Valparaíso)	Valle	215	-33.73	-71.42
13	San Antonio, Lo Zarate (Valparaíso)	Costa	103	-33.53	-71.51
14	Colliguay, Quilpué (Valparaíso)	Inland Rainfed	0	-33.16	-71.15
15	Lo Pinto, Colina (RM)	Valle	512	-33.27	-70.73
16	Aguas Andinas, la florida (RM)	Costa	1008	-33.33	-70.46
17	El Colorado, Lo Barnechea (RM)	Cordillera Andina	2750	-33.35	-70.29
18	Quinta Normal (RM)	Valle	534	-33.44	-70.68
19	Cerro San Francisco, (RM)	Inland Rainfed	1068	-33.46	-70.95
20	Rinconada - U de Chile (RM)	Valle	462	-33.49	-70.84
21	Chorombo Hacienda (RM)	Valle	145	-33.53	-71.23
22	Central Florida, La Florida (RM)	Inland Rainfed	659	-33.54	-70.54
23	La Platina, La Pintana (RM)	Valle	630	-33.56	-70.62
24	San Pedro de Melipilla (RM)	Valle	169	-33.56	-71.23
25	Bocatoma, Puente Alto (RM)	PreCordillera	778	-33.59	-70.47
26	Guayacán (RM)	Cordillera Andina	928	-33.61	-70.35
27	Los Tilos, Buin (RM)	Valle	530	-33.70	-70.70
28	El Paico, Talagante (RM)	Valle	275	-33.70	-71.00
29	Río Clarillo, Pirque (RM)	PreCordillera	876	-33.73	-70.50
30	San Antonio de Naltahua (RM)	Valle	249	-33.73	-71.04
31	El Milagro, Buin (RM)	Valle	460	-33.75	-70.76
32	El Asiento (O'Higgins)	Valle	351	-34.02	-70.99
33	Hidango (O'Higgins)	Valle	300	-34.11	-71.80
34	Rancahua (O'Higgins)	Valle	484	-34.17	-70.79
35	Codelco (O'Higgins)	PreCordillera	552	-34.18	-70.66
36	Quimávida (O'Higgins)	Valle	316	-34.22	-70.99
37	El Tambo (O'Higgins)	Valle		-34.47	-70.98
38	Nilahue-La Quebrada (O'Higgins)	Valle	81	-34.66	-71.74

39	San Jorge Los Niches, Curicó	Valle	310	-35.09	-71.12
40	Deuca, Curepto	Inland Rainfed	48	-35.12	-71.95
41	Panguilemo (Maule)	Valle	119	-35.37	-71.60
42	San Clemente (Maule)	Valle	221	-35.53	-71.47
43	Chanco (Maule)	Inland Rainfed	60	-35.70	-72.51
44	Sauzal, Cauquenes (Maule)	Valle	162	-35.71	-72.11
45	Miraflores, Longaví (Maule)	Valle	124	-35.81	-71.77
46	Lomas, Pelluhue (Maule)	Costa	172	-35.83	-72.58
47	Cauquenes (Maule)	Inland Rainfed	162	-35.95	-72.28
48	Monte Flor-Tucapel (Maule)	Valle	548	-36.24	-71.93
49	Ninhue, chillan (Ñuble)	Valle	91	-36.39	-72.39
50	CE Arroz, San Carlos	Valle	162	-36.40	-72.00
51	Nueva Aldea (Ñuble)	Valle	82	-36.64	-72.51
52	Chillan, Mayulermo (Ñuble)	Valle	396	-36.82	-71.86
53	Termas de Chillán (Ñuble)	PreCordillera	1708	-36.90	-71.41
54	Dichato, Tome (Bio Bio)	Costa	0	-36.54	-72.93
55	Navidad (Bio Bio)	PreCordillera	314	-36.90	-71.93
56	Yungay (Bio Bio)	Valle	265	-37.14	-72.01
57	Human, (Bio Bio)	Valle	314	-37.43	-72.24

Las medidas de UVER se obtuvieron desde el Servicio Meteorológico Nacional (DMC, <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>). Además del sitio radiométrico localizado en la Universidad de Santiago de Chile (USACH), el cual ha estado monitoreando la RUV y otras variables climáticas desde el año 2001. Los datos se encuentran disponibles en <http://ambiente.usach.cl/meteo/>. En la sección 3.2 se describe con detalle las características principales de los instrumentos de medición empleados en el sitio de la USACH. Si bien en el territorio central se encuentra una distribución espacial adecuada de estaciones que miden el IG no sucede de la misma forma para la radiación espectral. Las mediciones de UV-B y UVER son realmente escasas en el territorio chileno. La Tabla 8 muestra las estaciones radiométricas seleccionadas para el desarrollo de esta tesis.

Tabla 8. Estaciones radiométricas seleccionadas que miden UVER en Chile central.

Id	Nombre de la estación (Region)	Zona geográfica	Altitud (m)	Lat. (°S)	Lon. (°W)
GOB	Gobernación marítima (Valparaíso)	Costa	28	-33.03	-71.62
COL*	El Colorado, Lo Barnechea (RM)	Cordillera Andina	2750	-33.35	-70.29
RAN	Rancahua (O'Higgins)	Valle	484	-34.17	-70.79

*el único sitio con medidas simultáneas UVER e IG. Datos horarios y diarios en el COL durante el período (2017-2020) y GOB, y RAN, durante (2015-2020).

3.3 Control de calidad de los datos radiométricos

Se aplicó un procedimiento de control de calidad a las mediciones de las irradiancias donde se descartaron los valores negativos y los valores superiores a la parte superior de la atmósfera (TOA). Los valores horarios de las irradiancias UVER e IG en el TOA se estiman utilizando las ecuaciones (7)-(8). El ángulo cenital solar (SZA) en (7) se estima mediante el algoritmo propuesto por (Reda and A, 2004), el factor de distancia tierra-sol (U) en (8) se basan en la expresión propuesta por (Iqbal, 1983). I_{SC} es la irradiación

extraterrestre a 1 distancia astronómica fijada en 1366 Wm^{-2} para IG y $9,89 \text{ Wm}^{-2}$ para UVER (Utrillas et al., 2018b). La variación anual de la posición relativa sol-tierra está indicada por (Γ) en (9) estimada en términos de día del año (Jday), varía de 1 el 1 de enero a 365 (366) el 31 de diciembre (año bisiesto). El índice de claridad (K_T) se define en (10) como la relación entre la radiación solar global en la superficie (IG) y la irradiación global extraterrestre en la parte superior de la atmósfera (I_{TOA}). Es un buen indicador del proceso de absorción y dispersión de todos los componentes atmosféricos (Udo, 2000), por ejemplo, cuando la atenuación atmosférica aumenta, el índice de claridad disminuye, debido principalmente a la nubosidad.

$$I_{TOA} = I_{SC} U \cos SZA \quad \text{Ecuación 11}$$

$$U = 1.00011 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.00007 \sin 2\Gamma \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\Gamma = 2\pi \cdot (\text{Jday} - 1)/365 \quad \text{Ecuación 13}$$

$$K_T = IG/I_{TOA} \quad \text{Ecuación 14}$$

Tras el procedimiento de calidad, las series temporales resultantes constan de 13011 valores horarios y 1574 valores diarios para las mediciones simultáneas de UVER e IG durante el período 2015-2020. Dado que la mayoría de los años están bien cubiertos por las observaciones (Frecuencia de Observación Total > 86%), es plausible asumir que los cinco años de mediciones de UVER e IG entre 2015 y 2020 son condiciones climatológicas representativas e incluyen la mayoría de los patrones atmosféricos relevantes del clima de Chile Central.

3.4 Influencia directa e indirecta de la radiación solar espectral ultravioleta en la salud humana.

Se utilizaron cuatro índices de eritema (UVI, MED, SED and t_{ery}) para evaluar los posibles efectos perjudiciales para la salud humana de la exposición directa a la RUV en Chile Central. Se calculó el UVI como UVER (Wm^{-2}) x 40 según (Rappenglück et al., 2000). Para la evaluación del riesgo de exposición se empleó la escala de propuesta por la OMS (WHO, 2002^a). Además, se calcularon las dosis acumuladas UVER, MED y SED considerando una exposición entre las 8:00 y las 18:00 hora local (HL). Las dosis MED se calcularon considerando los fototipos de piel Fitzpatrick (I-IV, MED = 200-450 Jm^{-2}) mostrados en la Tabla 3. Estudios médicos han determinado que una Exposición o DEM mayor que 1 ya produce algún daño en la piel (Lehmann et al., 2019), (de Troya Martín et al., 2020). Por lo tanto, es recomendable que la exposición sea siempre con un MED menor que 1. DOSIS (MED):

DOSIS<1: Puede exponerse sin riesgo de enrojecimiento de la piel (eritema), (Riesgo bajo).

DOSIS>1: Es probable que sufra algún tipo de enrojecimiento, (Riesgo medio).

DOSIS>2: Su exposición puede ser excesiva. Se sugiere no exponerse, (Riesgo alto).

Asimismo, se estimó el t_{ery} por cada fototipo como $t_{ery} = SPF(MED/UVER)$, donde SPF es el factor de protección solar, cuando es igual a 1 entonces la piel no presenta protección. Por último, se analizó la relación entre el UVER y variables que señalan contaminación atmosférica terrestre, principalmente el O_3 troposférico y su gas precursor NO_2 .

3.5 Estrategias de modelación y validación

Estrategia usando modelos empíricos

Para el desarrollo de nuevos modelos empíricos que permitan estimar el UVER en términos de IG se empleó la regresión lineal (Furlan et al., 2012). Todos los modelos de regresión fueron construidos usando MATLAB software. El conjunto de datos UVER e IG de cinco años (2015-2019) medidos en Santiago se dividió en dos partes, los datos medidos entre 2015 y 2018 (cuatro años) se utilizaron exclusivamente para construir los modelos, mientras las mediciones realizadas durante 2019 (un año) se utilizaron únicamente para la validación. A partir de las observaciones realizadas entre 2015 y 2018 se establecieron relaciones entre UVER e IG (valores horarios y diarios) para las estaciones del año y diferentes condiciones de cielo. Las condiciones de cielo fueron definidas empleando el rango de K_T ofrecido en (Escobedo et al., 2009), (i) nublado ($K_T \leq 0,35$), (ii) parcialmente nublado ($0,35 < K_T \leq 0,55$), (iii) parcialmente despejado ($0,55 < K_T \leq 0,65$), (iv) cielo despejado ($K_T > 0,65$), y (v) todas las condiciones de cielo ($0 \leq K_T \leq 1$). Las series horarias de UVER e IG (Wm^{-2}) fueron integradas en una escala diaria. Escala entre las 8:00-18:00 hora local (LT) para obtener las dosis diarias de UVER (kJm^{-2}) e IG (MJm^{-2}) mostrando la variación estacional. En este sentido se procesaron 18 datasets, horario, diario, estacional y bajo diferentes condiciones de cielo. Obteniéndose un set de 50 modelos horarios y diarios considerando las mediciones simultáneas entre ambas variables desde 2015-2018.

Se seleccionó el mejor modelo para estimar las dosis de UVER desde medidas de radiación global (IG) realizadas durante el año 2019 sobre Chile Central. Las estimaciones fueron validadas siguiendo la metodología propuesta por (Kudish and Evseev, 2020) con mediciones de otros sitios alejados del lugar donde se crearon los modelos. Se seleccionaron dos estaciones radiométricas con mediciones simultáneas de UVER e IG en la superficie terrestre (Tabla 7). La estación radiométrica de El Colorado (COL) y Rancagua (RAN), representativas de las regiones de Santiago metropolitano y O'Higgins respectivamente. Incluido un sitio radiométrico con mediciones de UVER cercano a la estación de IG. Para este caso fue seleccionada la estación de Gobernación Marítima (GOB) cerca de la estación de Quintero (Tabla 7). Las estaciones radiométricas seleccionadas para la validación se mostraron en la Tabla 8 y señaladas en color rojo en la Figura 14.

Estrategia usando modelos de transferencia radiativa (UVSPEC/LibRadtran)

Para simular los valores de radiación espectral ultravioleta (UVR) se empleó el modelo de transferencia radiativa UVSPEC/LibRadtran. Este simulador se ha reconocido como una poderosa herramienta de excelentes resultados cuando se incluyen variaciones en el estado termodinámico de la atmósfera (Antón et al., 2012; Roman, 2014; Cordero et al., 2016). Se seleccionaron las ciudades de, Antofagasta ($-23.59^{\circ}S$, $-70.39^{\circ}W$, 150masl), Santiago ($-33.49^{\circ}S$, $-70.73W$, 500 masl) y Concepción ($-36.73^{\circ}S$, $-72.46W$,

121masl). La selección se basó por incluir, la mayor cantidad de habitantes en el país, gran actividad económica e industrial y siguiendo la recomendación de (Wald, 2012) se encuentran en excelentes zonas de aprovechamiento solar. Para estimar la relación entre la RUV/IG, incluyendo variables como la columna de ozono, altitud, nubes, albedo de superficie y aerosoles se usó el modelo de transferencia radiativa LibRadtran (<http://www.libradtran.org/>). La profundidad óptica de los aerosoles (AOD) es el producto de la densidad de las partículas y la probabilidad de intercepción de la radiación, generalmente entre 0,09 y 1 (Madronich Sasha, 1993). Para Santiago y Concepción, los valores de AOD se encontraron en el sitio web de AERONET, mientras que para Antofagasta se consideró un valor fijo de 0,2. Para muchas superficies, excepto la nieve, para el espectro UV el albedo del suelo se encuentra entre 0 y 0,2 (Chadyšiene and Girgždys, 2008). En nuestro caso se consideró 0,16 para todas las ciudades. Para la estimación del factor K final en cada medición tenemos en cuenta la fracción de nubes (dada por el proyecto ISCCP) y el factor K para cielo despejado (Kclear) y para condiciones de nublado (Kcloudy), entonces la ecuación propuesta es la siguiente:

$$K = K_{clear}(1 - CF) + K_{nublado}(CF) \quad \text{Ecuación 15}$$

Si la medición fuera sin nubes entonces K sería el correspondiente a Kclear. Si la medición tiene 100 de cobertura de nubes entonces el K que le corresponde es el Knublado. En la ecuación 15 el CF estaría entre 0 y 1, 0 para cielo claro y 1 para completamente nublado. CF=0.5, corresponde como si fuera 50 % de cobertura de nube. si CF=1, entonces está completamente nublado 1-CF=0 por tanto, K=Knublado*1. Una vez determinado K para cada observación, la RUV sería estimada como IG*K. Se simularon un total de 5389 situaciones atmosféricas (cielos despejados y nublados) con ángulos del coseno del cenit solar que iban de 0,1 a 1.

El archivo de entrada al UVSPEC/LibRadtran haciendo uso de los datos auxiliares disponibles se puede ver en el Anexo II. Colocando un caso específico donde se asumió una atmósfera de latitudes medias, O₃ estratosférico de 309 DU, AOD en 500nm de 0.4, altura sobre el nivel del mar de 6km y calculado para cielo claro. Las últimas líneas resaltadas en negrita se agregaron cuando se considera cielo nublado para el cálculo de K. Hasta el momento no se tienen mediciones en tierra de RUV para las áreas de estudio. Por lo cual las simulaciones realizadas con esta estrategia no se validaron. Aunque se realizó una primera aproximación de validación empleando estimaciones de RUV obtenidas por el Explorador Solar (Chilean Ministry of Energy, 2021).

La evaluación de la calidad y aplicabilidad de los modelos matemáticos para calcular la UVER se basó en indicadores estadísticos según (Despotovic et al., 2016). Estos indicadores cuantitativos son mostrados en las Ecuaciones 16-21, en orden, coeficiente de determinación (R²), coeficiente de correlación de Pearson ®, error de sesgo medio (MBE), error cuadrático medio (RMSE), error cuadrático medio normalizado (NRMSE), error porcentual absoluto medio (MAPE) e índice de acuerdo (IA). En general, errores (RMSE, MAPE y NRMSE) bajos indica un mejor rendimiento del modelo. El NRMSE puede interpretarse como una fracción del error medio con respecto a la media. Un R² e IA cercano a 1 indica modelos más

eficientes. P_i representa los valores modelados, O_i representa las medidas, y n representa el número de mediciones.

$$R^2 = r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad \text{Ecuación 16}$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad \text{Ecuación 17}$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\frac{\sum_{i=1}^n O_i}{n}} \times 100 \quad \text{Ecuación 19}$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad \text{Ecuación 20}$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad \text{Ecuación 21}$$

3.6 Aplicaciones de la modelación

3.6.1 Mapas de exposición solar

Se seleccionó el mejor modelo empírico desarrollado en la ciudad de Santiago por (González-Rodríguez et al., 2021^a) y se obtuvieron las dosis diarias de UVER derivadas del modelo a partir de las mediciones de IG. Se emplearon las estaciones radiométricas expuestas en amarillo en la Figura 12 y en la Tabla 5. Luego, se descargaron dos herramientas espaciales: Google Maps import y Import shapefile. Las aplicaciones (Google Maps import) permitieron obtener imágenes de mapas MRCh desde un servidor Web Map Service (WMS) y colocarlas como imagen de fondo en un gráfico. Los shapefile de las regiones de Valparaíso, Santiago metropolitano, O'Higgins, Maule y Ñuble se obtuvieron del Ministerio de Bienes Nacionales, Infraestructura de Datos Geospaciales (IDE, <http://www.ide.cl/>). Las características de los mapas MRCh de importación fueron las siguientes: híbrido sin etiquetas, proyección Mercator activada, margen de reescalado activado y nivel de zoom igual a 8. Se generaron los mapas de dosis mensuales y anuales de UVER sobre MRCh empleando el software OriginPro 2021 9.8.0.200 (Academic).

3.6.2 Tratamiento solar de aguas.

El estudio del rendimiento de los procesos de fotocátalisis solar, se debe realizar mediante el análisis de la degradación del compuesto que se desea eliminar del agua en función del tiempo transcurrido y la radiación solar incidente sobre el reactor fotocatalítico. Se trata de una aproximación que integra la densidad de energía radiante del espectro solar útil para la fotocátalisis solar (Malato et al., 2000). En este

sentido, se simularon valores espectrales de la RUV para tres ciudades chilenas mediante el modelo de transferencia radiativa LibRadtran (Mayer and Kylling, 2005), (Cordero et al., 2016). Dichos valores fueron integrados en valores diarios de RUV para posterior análisis de valores medios mensuales. Se revisó en la literatura valores medios mensuales de RUV reportados para la destrucción de contaminantes orgánicos de diversa naturaleza. Ambos análisis de RUV (simulada vs. reportada) se compararon para las tres ciudades de Chile. De esta manera y realizando una descripción completa de las principales condiciones de operación y medida en experimentos prácticos se puede concluir si es o no posible la fotocatalisis solar para diferentes latitudes en Chile. La radiación solar es normalmente expresada como “Irradiancia” (potencia incidente sobre una superficie de una unidad de área, en Wm^{-2}). Sin embargo, en la descripción de experimentos prácticos para la destrucción de contaminantes se emplean otras magnitudes derivadas. La irradiancia solar depende de varios factores (ver sección 2.4.1-2.4.3), por lo que es necesaria una completa descripción de las condiciones de medida para realizar una comparación directa con los resultados de la literatura. La ecuación (22) muestra la fórmula usada en la descripción de experimentos prácticos.

$$\text{Irradiation UV } \int_{200}^{400} \text{ spectral irradiance } d\lambda dt \quad \text{Ecuación 22}$$

Por tanto, los valores de RUV simulados en las áreas de estudio fueron evaluadas en términos de irradiancia (Wm^{-2}) e irradiación (kJm^{-2}), para poder ser comparadas con la literatura.



CAPÍTULO 4: RESULTADOS

González-Rodríguez, L., Jiménez, J., Rodríguez-López, L. *et al.* Ultraviolet erythemal radiation in Central Chile: direct and indirect implication for public health. *Air Qual Atmos Health* (2021). <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01037-3>

4.1 Ultraviolet erythemal radiation in Central Chile: Direct and indirect implication for public health.

Abstract: Ultraviolet radiation plays a key role in the photochemistry in the atmosphere and has a detrimental impact on human health from direct exposure to sunlight and enhancing photochemical pollutants. Characterizing the levels of solar UV radiation and its role in the production of photochemical pollutants is important in order to provide awareness of its negative health effects on the human population. Four years (2015-2018) of ultraviolet erythemal radiation (UVER) measurements for Santiago, Chile were analyzed and the potential impact of UVER on human health were assessed from both, direct and indirect effects. High values of UVER occurred from spring to early fall, with a maximum of 0.33 Wm^{-2} . Extreme ultraviolet index (UVI) values were observed in 17% of the days, while high ultraviolet index accounts for up to 50% of the days during the observation period. The population in the Metropolitan Region of Santiago (Central Chile) is exposed to high levels of UVER, increasing the risk of severe sunburn and developing skin cancer. Tropospheric ozone had a positive correlation with ultraviolet erythemal radiation, indicating an increment of 27 ppbv in ozone concentration when UVER levels were above 0.10 Wm^{-2} (UVI=4). Incoming sunlight reaches the surface of Central, Chile energetically enough to cause sunburn and increase the levels of tropospheric ozone from late spring to early autumn. This study provides useful information for public awareness and for adopting strategies to reduce the negative impacts on the human population from direct exposure to sunlight and its role in production of photochemical pollutants

Keywords: UVER, Ultraviolet Index, cumulative doses, tropospheric ozone.

Ultraviolet erythematous radiation in Central Chile: Direct and indirect implication for public health

Lisdelys González-Rodríguez¹, Jorge Jiménez¹, Lien Rodríguez-López², Amauri Pereira de Oliveira³, and Ana Carolina Baeza², David Contreras⁴, Laura Pérez-Hernández¹

¹ Faculty of Engineering, University of Concepcion, Concepcion, Chile

² Faculty of Environmental Sciences & EULA Center, University of Concepcion, Concepcion, Chile.

³ Department of Atmospheric Sciences, Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

⁴ Centre for Biotechnology, Department of Analytical and Inorganic Chemistry, Faculty of Chemical Sciences, University of Concepcion, Concepcion, Chile

Abstract. Ultraviolet radiation (UV) plays a key role in the photochemistry in the atmosphere. UV has a detrimental impact on human health from direct exposure to sunlight and indirect effect by enhancing photochemical pollutants. Characterizing the levels of solar UV and its role in the production of photochemical pollutants is important to provide awareness of its negative health effects on the human population. Four years (2015-2018) of ultraviolet erythematous radiation (UVER) measurements for Santiago, Chile were analyzed and the potential impact of UVER on human health were assessed from both, direct and indirect effects. High values of UVER occurred from spring to early autumn, with a maximum of 0.33 Wm^{-2} . Extreme ultraviolet index (UVI) values were observed in 17% of the days, while high ultraviolet index accounts for up to 50% of the days during the observation period. The population in the Metropolitan Region of Santiago (Central, Chile) is exposed to high levels of UVER, increasing the risk of severe sunburn and developing skin cancer. Tropospheric ozone had a positive correlation with ultraviolet erythematous radiation, indicating an increment of 27 ppbv in ozone concentration when UVER levels were above 0.10 Wm^{-2} (UVI=4). Incoming sunlight reaches the surface of Central, Chile energetically enough to cause sunburn and increase the levels of tropospheric ozone from late spring to early autumn. This study provides useful information for public awareness and for adopting strategies to reduce the negative impacts on the human population from direct exposure to sunlight and its role in the production of photochemical pollutants.

Keywords: UVER, Ultraviolet Index, cumulative doses, tropospheric ozone

1. Introduction

Ultraviolet radiation (UV) is a component of the solar electromagnetic spectrum and its interaction with the biosphere is relevant (Asta Juzeniene et al., 2011). UV radiation splits into three fractions according to wavelength λ : UV-C ($\lambda=100\text{-}280 \text{ nm}$), UV-B ($\lambda=280\text{-}315 \text{ nm}$) and UV-A ($\lambda=315\text{-}400 \text{ nm}$). The UV-C fraction is completely absorbed by ozone and oxygen present in the high atmosphere (Mckenzie and Matthews, 1991), but depending on the ozone layer thickness, part UV-B radiation reaches the Earth's surface with sufficient energy to cause damage. Exposure to direct sunlight is known to have positive and negative impacts on human health. The beneficial effects include the synthesis of vitamin D in the human body with appropriate exposure time (Miyachi and Nakajima, 2016). Although, UV-B represents only 3% of the incoming solar radiation (Iqbal, 1983), its harmful energy can cause damage to human health (Rivas et al., 2017), inorganic materials (Cogulet et al., 2016; Malato et al., 2016) and biological systems (Ferrero et al., 2006).

Adverse effects on human health by direct exposure to UV radiation include DNA damage in skin cells (Ravanat et al., 2001), accelerated skin ageing (Battie et al., 2014), cataracts (Wang et al. 2012; Delcourt et al. 2014), keratinocyte cancers (Whiteman et al. 2016) and melanoma cancer (Rivas et al., 2014b). Some of these harmful effects are recognized especially in areas where the ozone layer has been depleted, which includes Chile (Rivas and Rojas, 2018). The effect of UV radiation on human skin is usually based on the ultraviolet erythematous radiation (UVER). UVER consists of 17% UV-A and 83% UV-B, at the Earth's surface (Miguel et al. 2012) and is calculated by the spectrally integrated UV-B solar irradiance at surface weighted with the

standard erythema action spectrum curve by Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) (McKinlay and Diffey 1987). UVER is frequently associated with other erythema indices such as UV index (UVI). The UVI is based on the erythema (skin reddening) action spectrum and serves as a proxy for acute exposure to high UV levels (Fioletov et al., 2010), and the minimal erythema doses (MED), which demonstrates the lowest UVER dose that will cause erythema or skin inflammation or redness (Harrison and Young, 2002) for each skin phototype. Fitzpatrick's phototype classification is the most commonly used method to assess risk of sunburn by evaluating patient-reported sun sensitivity (Fitzpatrick, 1988). Sun sensitivity ranges from very fair (skin phototype I) to black skin (skin phototype VI). People with dark-pigmented skins have more melanin than fair-skin individuals, which is a natural pigment that protects the skin in higher sunlight environments. Clinically, Fitzpatrick's skin classification helps to predict the risk of photodamage, guide sun protection advice, and estimates the MED with direct exposure to UVER radiation.

Globally, the incidence of melanoma skin cancer has been increasing steadily and rapidly (Nikolaou and Stratigos 2014; de Vries et al. 2016) and is higher in South American than in tropical countries (de Vries et al. 2016). In Chile, the incidence of skin cancer varies throughout the country, being highest in the north (Alonso et al. 2010; Rivas et al. 2017; Rivas et al. 2020). Nevertheless, (Sabatini-Ugarte et al. 2018) has demonstrated that Santiago de Chile has a high prevalence of malignant melanoma, and recently (Rivas et al. 2020) documented that the nonmelanoma skin cancer prevalence rate per 100,000 inhabitants in the Metropolitan region was 41.2. The International Agency for Research on Cancer (IARC, <https://www-dep.iarc.fr/>) estimated that the number of deaths by melanoma skin cancer in Chile was 4,623 for the period 1955-2016. Despite the concern of the negative health effects from direct UVER exposure, limited studies and UVER measurements are available for the Southern Hemisphere (Utrillas et al., 2018b).

Santiago of Chile has historically experienced air quality problems from high levels of photochemical pollutants including tropospheric ozone (O₃) (Rubio et al. 2004; Gramsch et al. 2016; Seguel et al. 2020). O₃ is a highly reactive oxidizing gas, which is a major component of smog. Negative effects of exposure to high concentrations of O₃ have been documented, some of them including reduced biomass (Ambasht and Agrawal 2003), oxidative stress in the skin (He et al. 2006; Fuks et al. 2019), or increased risk of premature mortality (Bell et al. 2006). UV radiation plays an important role in the mechanism of O₃ production (Hodzic and Madronich, 2018). (Li et al. 2017) found significant changes in UV intensity at ground-level that altered the air quality of Nanjing city, China. Another recent study report that negative effects on human health will depend on the balance between the impact of UV radiation and reduced air quality (Wilson et al., 2019). According to (Fuks et al., 2019) this gas, when it comes into contact with the surface of the skin, modifies its repairing components and accelerates the production of free radicals, which end up oxidizing it. This weakened skin is much more vulnerable to the genetic damage produced by the cumulative effect of UV radiation and this means that the risk of developing skin cancer increases in polluted cities like Santiago. Therefore, sunlight not only poses a health risk due to direct impact UVER exposure, an additional indirect effect that negatively affects human health is the formation of ground-level tropospheric O₃.

This study aims to characterize UVER levels observed in central Chile and its influence on the photochemical pollutants affecting the Metropolitan Region of Santiago. Meteorological and atmospheric conditions were analyzed for the years 2015-2018, including rain, temperature, wind speed, cloud cover, nitrogen dioxide and ozone (tropospheric and stratospheric). Also, the observed UVER levels were assessed in terms of potential erythema effects of exposure through the UVI and MED for four skin phototypes. This study may contribute to future research efforts to better understand the role of local meteorological conditions in the production of photochemical pollutants, to improve empirical and phenomenological air quality models.

2. Methods and Data

2.1 Description of the study site

Santiago, Chile (33°30'S, 70°42'W, 520 m.a.s.l.) is a large metropolis in the center of Chile, a country that is 4,270 km long and 356 km wide at the widest point (see Figure 1a). It is the capital and home to 7.1 million inhabitants, the largest populated area of the country (<https://www.ine.cl/>). Santiago is surrounded by mountain ranges with the Andes Mountains to the east (highest peaks of 5 km) and the coastal ranges to the west (highest peak of 1 km), as well as emergent so-called island hills, such as Santa Lucía, Blanco, and Renca, located within in the city of Santiago. The mountain ranges and hills surrounding the area affect its ventilation and dispersion capacity of air pollutants (Figure 1c). These topographic features affect negatively the

air quality in the region during the autumn and winter months (Morata et al. 2008) when lower temperatures enhance persistent thermal inversions and stagnant conditions in the valley.

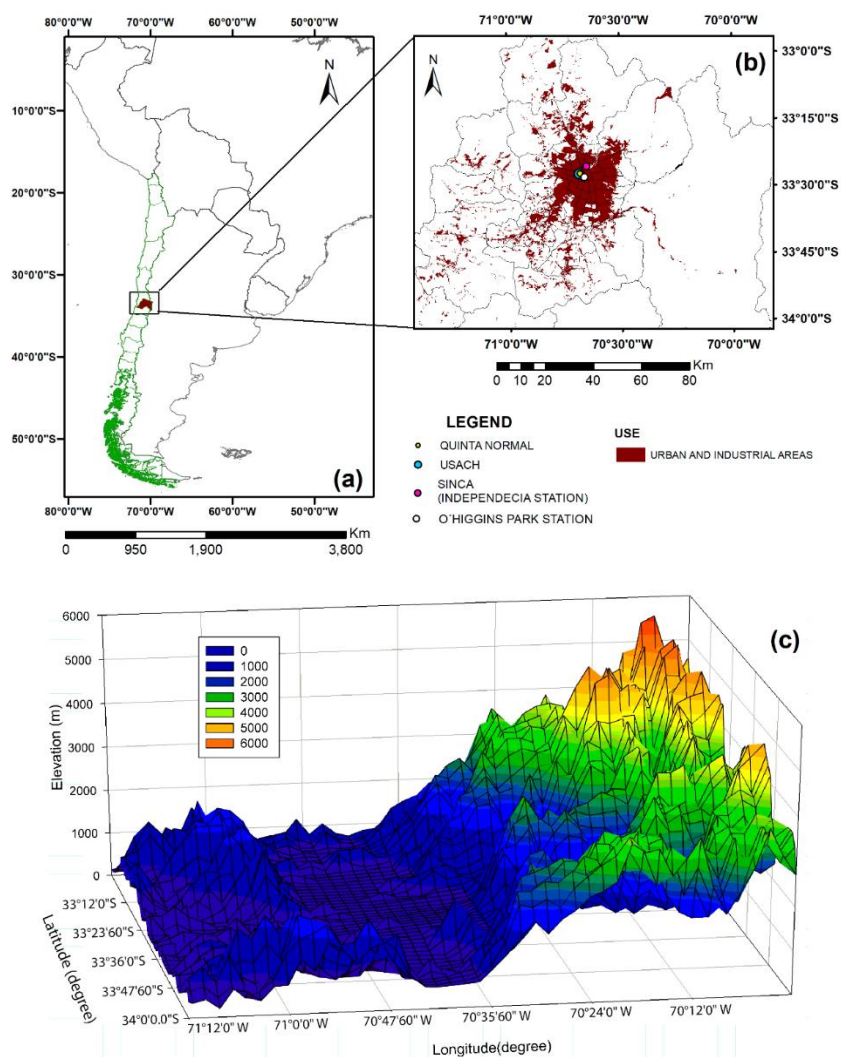


Fig. 1 Location of Santiago, Chile in South-America (a), monitoring sites in Santiago (b) and the elevation profile of the Metropolitan Region of Santiago (c) obtained from USGS-EROS.

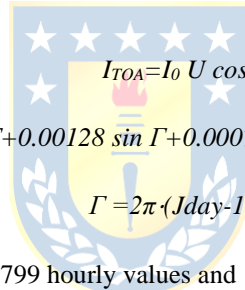
2.2 Ground-based and satellite measurements

Ground-based UVER was measured at a monitoring site located at the University of Santiago, USACH (33°27'24"S, 70°38'53"W, 512 m.a.s.l.) within the Central Station district of Santiago. Hourly values of UVER (μWcm^{-2}) were measured with a biologically-weighted erythema sensor (Model PMA2101, Solar Light Company, Inc.). The erythema sensor had a spectral response near the Erythema Action Spectrum by CIE (McKinlay, A.F. and Diffey, 1987) which represents the sensitivity of human skin to sunburn. It was calibrated using official records from the Chilean Climate Service (DMC, <http://www.meteochile.gob.cl/>) located in Quinta Normal (see Figure 1b). Meteorological parameters, including ambient air temperature (T), precipitation (rain), and relative humidity (RH) were collected from the meteorological monitoring site located in Quinta Normal (33°26'27"S, 70°40'57"W, 520 m.a.s.l., see Figure 1b). Ground-level ambient concentration of particulate matter with an aerodynamic diameter of $\leq 10 \mu\text{m}$, (PM_{10}), nitrogen oxides (NO_x), tropospheric ozone (O_3), and wind speed (WS) were collected from the Parque O'Higgins monitoring site (33°25'00"S, 70°40'00"W, 536 m.a.s.l., see Fig. 1b). These

monitoring sites are part of the Air Quality Information System Network (SINCA, <https://sinca.mma.gob.cl>) from the Ministry of the Environment. PM₁₀ was measured using a TEOM 1405 monitor with a PM₁₀ inlet (measuring range of 0-1,000mgm⁻³); NO_x (NO + NO₂) and tropospheric O₃ were measured using a Thermo chemiluminescent gas analyzer, model 42i (measuring range 0.05-100 ppmv with a detection limit of 0.40ppbv) and a Thermo UV-Photometric ozone analyzer, model 49i (measuring range: 0-0.5ppm), respectively. The total ozone column (TOC) was obtained from satellite measurements of the Ozone Monitoring Instrument–Total Ozone Mapping Spectrometer (OMI–TOMS) onboard NASA’s Aura satellite available at <https://www.esrl.noaa.gov/>. OMI-TOMS has a spatial resolution of 0.25 degrees, that results in a ground resolution at nadir ranging from 13 x 24 km to 13 x 48 km. Another known factor that influences the intensity of ground-based UV radiation is cloudiness. Total cloud cover (CC) for the period 1983-2015 was obtained from the International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP-H series), with a 1-degree resolution for the nearest grid point to Santiago, Chile available on the ISCCP website (<https://isccp.giss.nasa.gov/>)

2.3 Treatment of data and quality control

Quality control (QC) procedures were applied to measurements following González-Rodríguez et al. (2021), which included criteria for deleting or adding a flag to records including (i) hourly values equal to 0, (ii) negative values (cosine of solar zenith angle, C_{SZA}<0) and (iii) values higher than top-of-atmosphere (TOA) records for the same period. The last step was used to check for consistency with the data registered at the monitoring site. Hourly UVER values at TOA were estimated using Eqs. (1-3). The solar zenith angle (SZA) in equation (1) was estimated by the algorithm proposed by (Reda and Afshin 2004), the earth-sun distance factor (*U*) in Eq. (2) was based on the expression proposed by Iqbal (1983). I₀ is the extraterrestrial irradiance at 1 astronomical distance set equal to 9.89 Wm⁻² for UVER (Utrillas et al., 2018b). The yearly variation of the sun-earth relative position is indicated by (*Γ*) in Eq. (3), that is estimated in terms of the year-day (*Jday*) and vary from 1 on January 1 to 365 (366) on December 31 (leap year).



$$I_{TOA}=I_0 U \cos SZA \quad (1)$$

$$U=1.00011+0.034221 \cos \Gamma+0.00128 \sin \Gamma+0.000719 \cos 2\Gamma+0.00007 \sin 2\Gamma \quad (2)$$

$$\Gamma =2\pi (Jday-1)/365 \quad (3)$$

After QC, the resulting time series consisted of 10,799 hourly values and 1,366 daily values for UVER measurements. Hourly values are expressed in irradiance units (Wm⁻²) and daily values are expressed in kJm⁻² for UVER, respectively. UVER records were analyzed for the years 2015-2018. The number of validated records is shown in Table 1.

Table 1. Summary of amount of UVER measurements considered for analysis.

Records	2015	2016	2017	2018	Total
Hourly-averaged values	2,593	3,022	2,631	2,533	10,799
Daily-averaged values	338	351	345	332	1,366

2.4 UV Index and cumulative doses

The UV index (UVI) is an indicator recommended by the World Health Organization (WHO) for determining potentially harmful radiation levels that can cause skin damage. UVI was calculated using Eq. (4) and by applying a scaling factor of 40 m² W⁻¹ to provide a convenient set of numerical values ranging from 0 to 12 (Fioletov et al. 2010). UVI values were rounded to the nearest integer. One unit of UVI represents 0.025 Wm⁻² (0.15 mJ cm⁻²min⁻¹).

$$UVI = UVER (Wm^{-2}) \times 40 \quad (4)$$

These values were divided into five levels of ultraviolet exposure based on the WHO scale (WHO et al. 2002), as described in Table 2.

Table 2. WHO ultraviolet exposure scale WHO et al. (2002).

Colour	green	yellow	orange	red	violet
UVI range	0-2	3-5	6-7	8-10	≥11
Exposure Category	Low danger from the sun's UV rays for the average person.	Moderate risk of harm from unprotected sun exposure.	High risk of harm from unprotected sun exposure. Protection against skin and eye damage is needed.	Very high risk of harm from unprotected sun exposure. Take extra precautions because unprotected skin and eyes will be damaged and can burn quickly.	Extreme risk of harm from unprotected sun exposure. Take all precautions because unprotected skin and eyes can burn in minutes.
Precautions	Hat, Sunglasses	Hat, Sunglasses, Sunscreen (SPF 25+)	Hat, Sunglasses, Sunscreen (SPF 30+), Umbrella	Hat, Sunglasses, Sunscreen (SPF 50+), Umbrella, Stay indoors from 10:00 to 16:00 hrs.	Minimum outdoor activity in addition to all the previous precautions

SPF= Sun protection factor

To assess the negative impacts on human health, accumulated UVER levels and MED values between 8:00-19:00 local time (LT) were calculated. Accumulated UVER values are reported in kJm^{-2} and MEDs were described following Fitzpatrick's phototype classification (McKinlay & Diffey 1987). Skin phototypes III and IV are the most frequent type of skin observed in Chile (Zemelman et al. 1990; Rivas et al. 2017). However, the genetic study by (Eyheramendy et al. 2015) showed that the Chilean population originates genetically from Caucasian-Amerindians, which indicates a fair-skin from the Caucasian side. Table 3 shows the energy limit, typical features and the MED for each skin phototype.

Table 3. Energy limit, characteristics and MED for different skin phototypes.

Fitzpatrick's skin phototypes	Typical features	Energy limit (Jm^{-2})	MED
Type I	Pale white skin, blue/green eyes, blond/red hair	200	1
Type II	Fair skin, blue eyes	250	2
Type III	Light brown skin	350	3
Type IV	Brown skin	450	4

3. Results and Discussion

3.1 Climate and environmental conditions

Figure 2 shows the seasonal variability of several meteorological (T, RH, rain, CC and WS) and atmospheric parameters including tropospheric O_3 , PM_{10} , NO_2 and TOC for Santiago during the years 2015-2018. The mean ambient temperature was 15°C , varying from a minimum of 8°C in the winter to a maximum of 22°C in the summer. The maximum RH (90%) was observed in the winter, while the minimum record (61%) was observed during the summer (see Figure 2a). As the T increases in the summer, the ventilation of the valley improves as the average WS increases, which allows for the dispersion of air pollutants such as PM_{10} and NO_2 (see Figure 2b). The mean WS was 1 ms^{-1} , varying from a minimum of 0.7 ms^{-1} during winter

and a maximum of 1.3 ms^{-1} for the summer (see Figure 2b). Considering a period of observation from 1983 to 2015, the percentage of CC for Santiago experienced a significant seasonal variation. CC increases in April, with its highest peak in June and decreases in October. During predominant overcast sky conditions, lower UV irradiation levels are reported (Antón et al. 2008) and Santiago had overcast skies during 53% of the year. The mean annual accumulated precipitation (rainfall) was 242 mm with a maximum of 111 mm during the winter of 2015. On average, 57% of the rainfall observed in Santiago occurred between the months of June to August (see Figure 2c) decreasing significantly during the summer months. The driest period was observed during the summer of 2016, which did not report rainfall. The period from 2015 to 2018 was considered as representative for the climate conditions of Santiago (Stolpe and Undurraga 2016; Boisier et al. 2018).

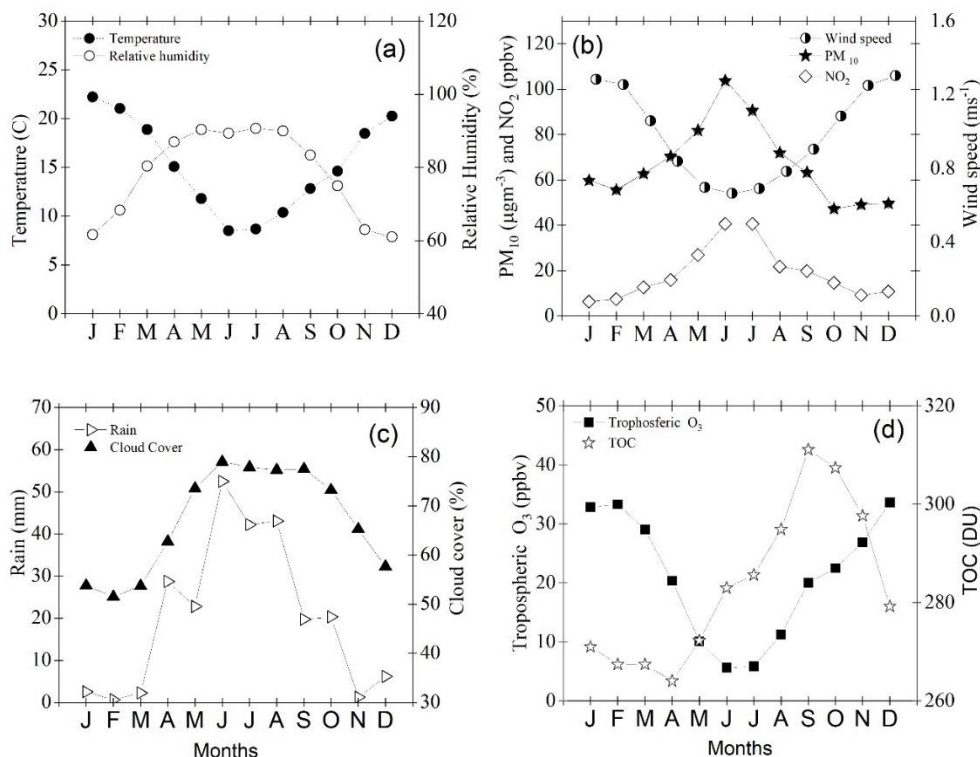


Fig. 2 Annual variability of meteorological and environmental conditions in Santiago, Chile during the period 2015-2018.

Higher concentrations of tropospheric O_3 were observed during the summer months (Figure. 2d), when PM_{10} , NO_2 , cloud cover and TOC were lower (Figures 2 b,c,d). The mean PM_{10} concentration in Santiago was $67 \mu\text{gm}^{-3}$, varying from a minimum of $41 \mu\text{gm}^{-3}$ in December of 2015 to a maximum of $113 \mu\text{gm}^{-3}$ during the winter of 2017, while the mean NO_2 concentration was found between 6.4 ppbv during summer and 40.7 ppbv in winter when the ventilation conditions of the valley are reduced. Santiago has severe air pollution problems during the winter months due to stagnant conditions and atmospheric emissions from transportation and residential wood combustion (Gramsch et al. 2016; Moisan et al. 2018). The mean TOC was 283 DU (Dobson Units), varying from a minimum of 264 DU during the autumn of 2015 and a maximum of 320 DU observed during the early spring of 2017. The months between May and April had a $\text{TOC} \leq 270$ DU, which may provide less UV protection from incoming solar radiation. Mean TOC values in Santiago were lower to those reported in locations with a similar latitude in the Northern Hemisphere (Rafiq et al. 2017). The TOC has a greater impact on the UVER than on global radiation (Esteve et al. 2009), that indicates higher risks from direct sunlight exposure may occur during the summer and autumn in Santiago.

3.2 Characteristics of ground-based UVER

3.2.1 Daily UVER values

Figure 3 shows the time series of daily UVER and ozone column for Santiago during 2015-2018 years. A strong seasonal variation of UVER levels was observed due to changes in local atmospheric conditions including TOC as well as CC, RH and atmospheric aerosols (Figures 2c, a,b). Several studies have demonstrated that these atmospheric parameters influence the amount of UV received at the Earth's surface (Gallardo et al. 2002; Koronakis et al. 2002; Kim et al. 2008; Wang et al. 2014; Antón et al. 2016). The maximum daily UVER value (7.22 kJm^{-2}) was registered in January 2017 when TOC and CC were at its minimum (Figures. 2c, d), while the minimum UVER value (0.04 kJm^{-2}) was observed in July 2016. The difference between the minimum TOC and the maximum UVER level is closer in the Southern Hemisphere compared to the Northern Hemisphere. The predominance of Brewer-Dobson circulation in the Northern Hemisphere (Shepherd 2007) modulates the above behaviour while in the Southern Hemisphere it is controlled by SAM (Southern Annular Mode) (Bornman et al. 2019). These findings add to the evidence provided by some other studies that show the Chilean territory that is directly affected by the ozone hole (Rivas and Rojas 2018). During several days the daily TOC levels remained below 320 DU, which was proposed as a normal value for this parameter (Sharma 2014). The maximum daily TOC value (370 DU) was observed in October 2017 and the minimum value (234 DU) was registered in April 2016.

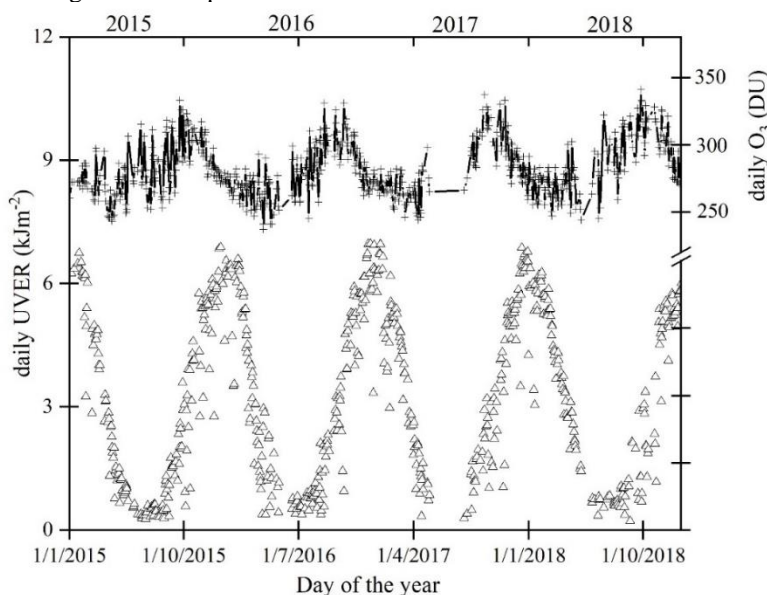


Fig. 3 Annual variability of ground-based UVER flux (grey) and the daily ozone column (black) amount in Santiago, Chile for the years 2015-2018.

Table 4 shows a summary of the statistical parameters obtained for the daily mean UVER values for all-sky conditions. These parameters include the arithmetic mean (mean), standard deviation (σ), coefficient of variation (CV), minimum (Min), the first and third quartiles (Q1 and Q3), median, maximum (Max), 5th percentile (P5), 95th percentile (P95) and the number of observations (N). The annual mean UVER value was 2.95 kJm^{-2} and varied from a minimum mean of 0.52 kJm^{-2} in June (winter) to a mean averaged value of 5.67 kJm^{-2} in January (summer). The highest and lowest UVER values were compared with their corresponding quartile to verify if they are representative for the grouped observations. When comparing the monthly mean UVER values, the difference between the Q1 quartile and the minimum value was 95%, whereas the difference between the Q3 quartile and the maximum value was 31%. This indicates that minimum UVER levels are unusual values, while the maximum observed levels can be considered as a more representative UVER value for the month. Also, the coefficient of variation shows lower values for the summer months, which means that these months had less variability among the observed UVER levels. The months from September to November showed high standard deviation values that may be explained by changes in atmospheric attenuation factors, such as atmospheric aerosols and CC (see Figures. 2b, c). A recent study in Granada, Spain (37.16° N , 3.58° W , 680 m.a.s.l.) showed great sensitivity in UVER levels due to changes in TOC and CC conditions (Antón et al., 2016).

Table 4. Statistical parameters for daily UVER observed in Santiago, Chile during the years 2015-2018

Months	UVER (kJm^{-2})										
	N	Mean	Median	Max	Min	σ	CV (%)	Q1	Q3	P5	P95
January	120	5.67	6.18	7.22	1.68	0.70	20.82	5.12	6.41	3.40	6.95
February	102	5.31	5.37	6.62	2.86	0.76	14.39	4.92	5.81	4.10	6.41
March	113	3.49	3.66	4.99	0.93	0.87	24.99	2.96	4.08	1.78	4.77
April	107	1.86	1.92	3.64	0.19	0.75	40.09	1.33	2.52	0.58	2.88
May	113	0.84	0.85	1.86	0.04	0.36	43.38	0.57	1.10	0.25	1.43
June	97	0.52	0.51	0.90	0.08	0.21	40.16	0.37	0.73	0.19	0.81
July	93	0.53	0.55	1.01	0.04	0.23	43.51	0.36	0.69	0.14	0.87
August	106	0.94	0.91	2.10	0.22	0.45	48.05	0.55	1.20	0.30	1.76
September	115	1.76	1.80	3.59	0.13	0.89	45.23	1.21	2.38	0.43	2.96
October	114	2.96	3.11	5.01	0.58	1.05	35.56	2.24	3.79	0.94	4.44
November	114	4.84	5.20	5.93	1.04	1.04	21.06	4.52	5.49	2.69	5.75
December	122	5.61	5.81	7.16	0.46	0.80	18.87	5.20	6.29	3.78	6.88
Period	1316	2.95	2.61	7.22	0.04	2.13	72.11	0.88	5.00	0.34	6.36

The seasonal variation of UVER levels for Santiago de Chile (Figure 4a) were compared to reported values for other locations (Figure 4b) in the Northern and Southern Hemisphere (Serrano et al. 2006; Miguel et al. 2012; Pashiardis et al. 2017; Utrillas et al. 2018). Salta (Argentina) and Athalassa (Cyprus) reported similar UVER levels as Santiago (Chile) during the summer months. However, El Rosal (Argentina) reported higher UVER levels for the summer due to altitude. Rivas A et al. (2009) reported that for each km of elevation the UVI increased by 8.1%. This geographical factor is important for settlements located in the mountains (see Figure 1c) because the UVER levels (sunburn potential) increase significantly.

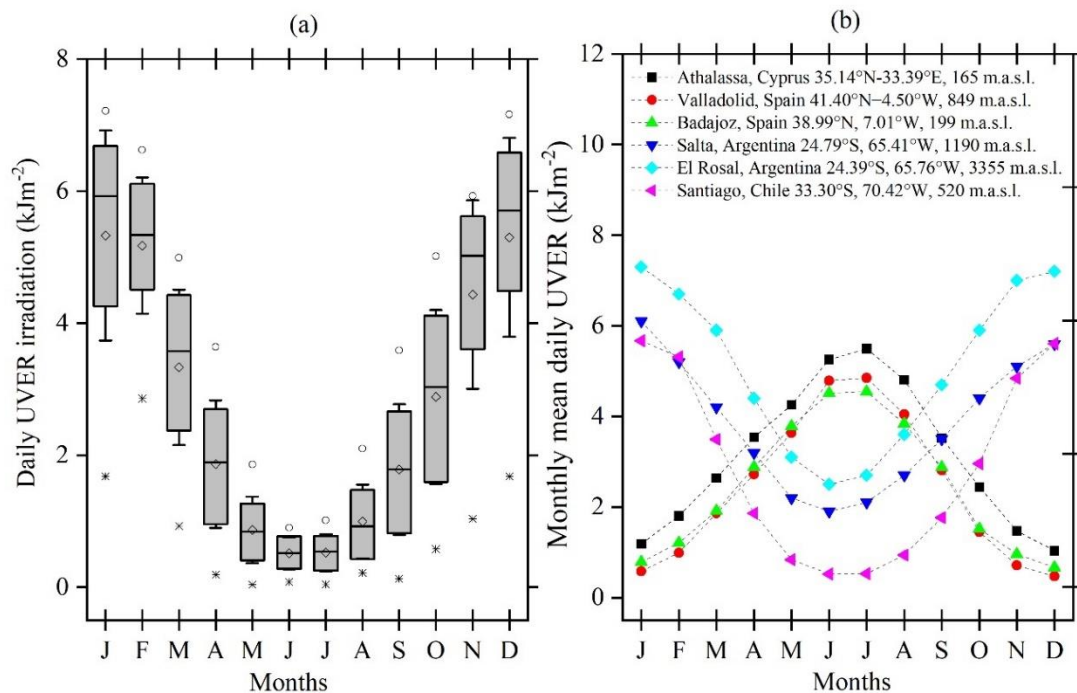


Fig. 4 Monthly variation of ground-based mean daily UVER (a) values for Santiago during the years 2015-2018 and mean daily UVER values observed in other locations (b). The box bars represent the 5th and 95th percentiles. The asterisks and circle denote the minimum and maximum values, respectively. The diamond and line represent the mean and median daily values.

3.2.2 Hourly UVER values

Figure 5 shows a temporal (hour) and seasonal (month) isolines chart for the UVER levels observed in Santiago, where symmetries were observed concerning the solar noon (13:17:08 LSNT, mean local solar noon time) and the winter solstice (June). The highest mean hourly values for UVER were 0.27 Wm^{-2} near the solar noon in January, meanwhile, the lowest observed values were near 0.00 Wm^{-2} at a low solar zenith angle from May to July. The variability of the hourly UVER levels near the solar noon was lower ($\text{CV}= 18.2\%$) during the summer months compared to late autumn and early spring (May to September), with a reported coefficient of variability, $\text{CV}= 44.1\%$. The atmospheric conditions including CC and aerosols have an attenuation effect on the incoming UVER received at ground-level. In the case of Santiago, this attenuation occurs between late autumn and early spring (May to September). However, during the period between October and March (half of the year), the hourly UVER levels near solar noon were consistently high ($> 0.15 \text{ Wm}^{-2}$), indicating a high potential to be harmful to human health according to the WHO (WHO et al. 2002). It is important to notice that the UVER levels reach the Santiago surface during January were as high as UVER levels reported in locations above 1000 m.a.s.l (Singh and Singh 2004; Utrillas et al. 2016; Palancar et al. 2017). The latter is relevant since most of the population of Santiago and central Chile is completely unaware of the harmful effects of prolonged exposure to direct sunlight throughout the year.

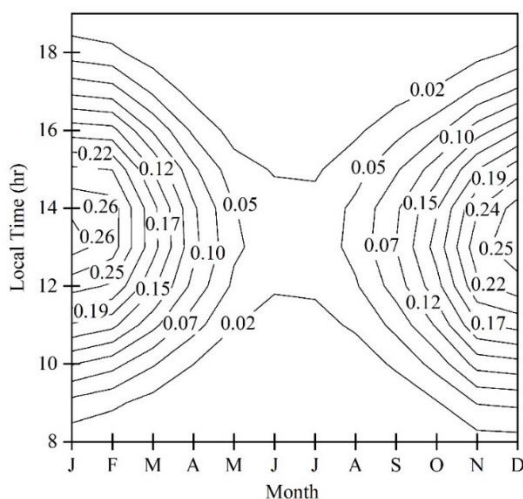


Fig 5. Evolution of the hourly mean UVER values (Wm^{-2}) from 8:00 to 19:00 LT in Santiago, Chile during the years 2015-2018.

3.3 Direct and indirect implication for public health

Two erythema indexes are used to assess potential detrimental effects on human health from direct sunlight exposure in Santiago. The UVI was calculated for risk assessment according to the WHO ultraviolet exposure scale. Also, the UVER cumulative doses and the MED were calculated from exposure between 8:00 and 19:00 LT, considering different Fitzpatrick's skin phototypes: I-IV ($\text{MED} = 200\text{--}450 \text{ Jm}^{-2}$). Last, we analyzed the relations between ground-based air pollution and UVER.

3.3.1 UV Index

Figure 6 shows the monthly average hourly values of the UVI during the years 2015-2018 as a function of daylight hours (8:00-18:00 LT). The UVI values between 12:00 to 15:00 LT from late October to early April are classified as risk levels between "very high" and "extreme". A UV Index reading of 11 or more means extreme risk of harm from unprotected sun exposure conforms with international guidelines. Take all precautions because unprotected skin and eyes can burn in minutes.

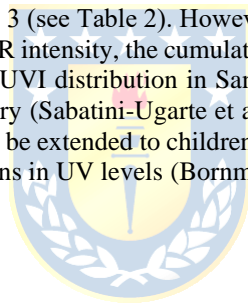
Observations during the period 2015–2018 indicate that in Santiago the highest UVI recorded was in January (summer) with a value of 14 (by WHO "extreme"). During summer, the UVI values were "high" or more (≥ 6) for at least 5 continuous hours during daylight. Under these conditions, sunburn may easily occur (McKenzie et al. 2009), even for skin phototypes more

resistant III and IV. According to Zemelman et al. (1990), they are the most frequent skin phototypes observed among the Chilean population.

In addition, for late autumn (May) and late winter (August) “high” UVI values were recorded near solar noon. Therefore, protection against skin and eye damage is needed. Outdoor activities such as snow sports in the snowy valleys of the mountain range must be carried out with the solar protection measures. Emphasizing that UV irradiance for cloudless sky show enhancements in irradiance levels of nearly 50% at 320 nm for a snow-covered surface, in comparison with snow-free surfaces (Lenoble, 1998).

The UVI was determined from the UVER measurements using the solar noon value as a criterion to classify "extreme", "very high" and "high" conditions. These conditions were observed in 17%, 21% and 12% of the days through the whole study period, respectively. "Low" and "moderate" UVI were found in 29% and 21% of the days, respectively. This suggests that the population of central Chile (Santiago) should avoid being exposed to direct sunlight or taken precautions to prevent sunburn and an increased risk for developing skin cancer (Rivas et al. 2017).

Sun protection is recommended when the UVI is ≥ 3 (see Table 2). However, a recent study (González-Rodríguez et al. 2021) showed that even though cloudy skies reduce UVER intensity, the cumulative doses exceed recommended levels for protecting human health. This information regarding hourly UVI distribution in Santiago is an important topic for reflection about the mitigation of the skin cancer problem in the country (Sabatini-Ugarte et al. 2018; Rivas et al. 2020). It is important to create warnings and awareness of possible health damage be extended to children and adolescents, especially because the studies that take into account climatic change point to alterations in UV levels (Bornman et al., 2019).



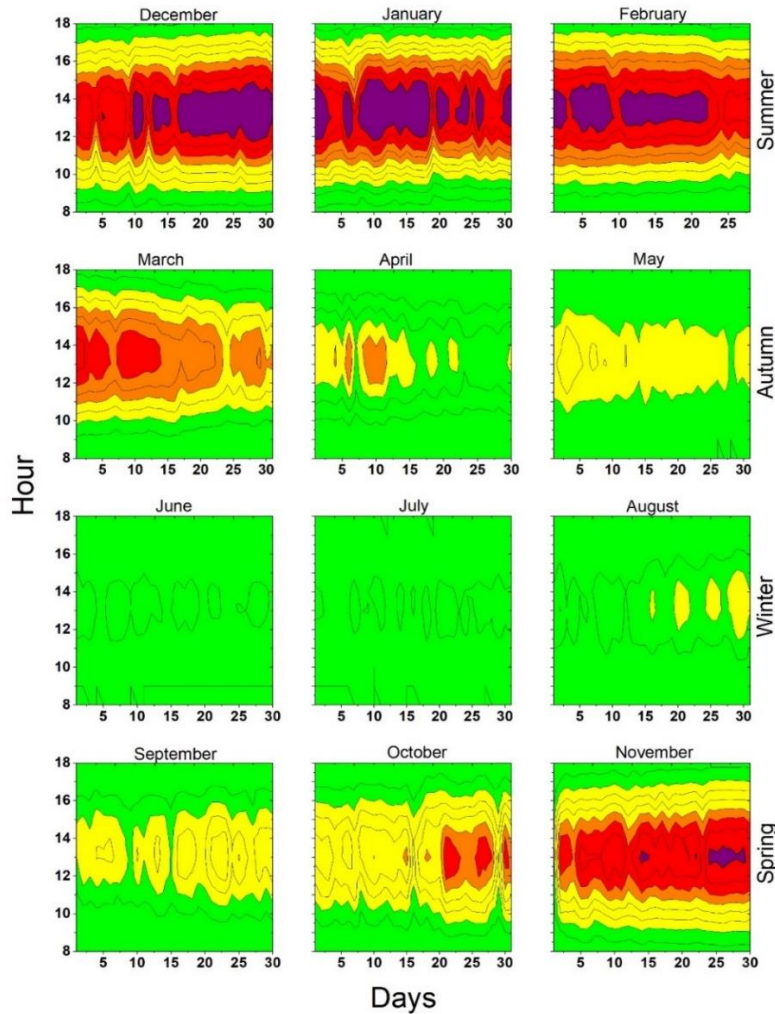


Fig. 6 Monthly mean ground-based UVI for Santiago de Chile during 2015-2018 years. Seasonal and hourly variability of UVI is emphasized by colours according to the WHO scale. The colour Violet ≥ 11 "risk extreme", 8 to 10 is red "risk very high"; 6 to 7 is orange "risk high"; 3 to 5 is yellow "risk moderate" and green < 2 "risk low".

3.3.2 Cumulative doses

The annual accumulated UVER for Santiago during the period 2015-2018 was $971 \pm 33 \text{ kJm}^{-2}$ (mean $\pm \sigma$) and Table 7 shows the accumulated erythemal irradiance per hour and month. The maximum accumulated daily UVER dose of 5.70 kJm^{-2} (January) in terms of minimal erythemic dose translates into a number of 28.35 (MED I), 22.68 (MED II), 16.20 (MED III) and 12.54 (MED IV), according to each type of skin phototype.

Table 7. Mean accumulated UVER per hour and month in Santiago, Chile years 2015–2018.

Hour/Month	Cumulative UVER (kJm^{-2})											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
8	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.05
9	0.18	0.12	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.09	0.23	0.25

10	0.53	0.42	0.24	0.11	0.03	0.01	0.02	0.05	0.13	0.30	0.61	0.65
11	1.14	0.96	0.62	0.31	0.13	0.06	0.08	0.15	0.33	0.66	1.21	1.29
12	1.95	1.73	1.16	0.63	0.28	0.16	0.18	0.31	0.63	1.15	1.97	2.12
13	2.91	2.64	1.80	1.01	0.47	0.29	0.31	0.51	0.98	1.70	2.81	3.06
14	3.85	3.56	2.44	1.37	0.65	0.41	0.42	0.71	1.31	2.22	3.59	3.97
15	4.65	4.34	2.95	1.65	0.77	0.49	0.50	0.85	1.56	2.61	4.19	4.71
16	5.22	4.89	3.29	1.80	0.83	0.52	0.52	0.92	1.70	2.84	4.59	5.23
17	5.56	5.19	3.46	1.85	0.83	0.53	0.50	0.95	1.76	2.93	4.78	5.51
18	5.67	5.29	3.49	1.86	0.84	0.52	0.53	0.94	1.76	2.96	4.83	5.61
19	5.70	5.31	3.49	1.86	0.84	0.52	0.53	0.94	1.76	2.96	4.84	5.63

Figure 7 shows the mean hourly accumulated UVER for each month, according to the number of MED received throughout the day for each skin phototype (I to IV). The annual mean accumulated dose in Santiago was 2 kJm^{-2} , which is half of the dose (4 kJm^{-2}) reported for Arica, Chile (18.48°S , 70.33°W , 2 m.a.s.l.) the northern-most city of Chile (Rivas et al., 2014b). The people with skin phototype I exposed to direct sunlight on a full day in Santiago summer, will receive an average of 28 times the minimum dose needed to cause sunburn, while a person with skin phototype IV would receive 13 times the dose to cause the same damage. Considering that MED for phototype III and IV are 350 and 450 Jm^{-2} , respectively; an individual in Santiago exposed to direct sunlight before 10:00 LT in the summer could receive approximately 2 and 1.5 times the minimum amount of radiation to develop erythema. Therefore, despite the skin phototype, people living in Santiago are most likely to have skin damage when exposed to direct sunlight without protection during the summer. Moreover, the dose received between 12:00 and 15:00 LT accounts for 80% of the daily accumulated erythemal dose. Under these conditions, avoiding exposure to direct sunlight between 11:00-16:00 LT during the summer is highly recommended. Also, it is highly recommended to use photoprotection including sunglasses with UV filters (SPF 50+), hats, umbrellas and sunscreen (see Table 2) to reduce risks of sunburn and skin cancer.

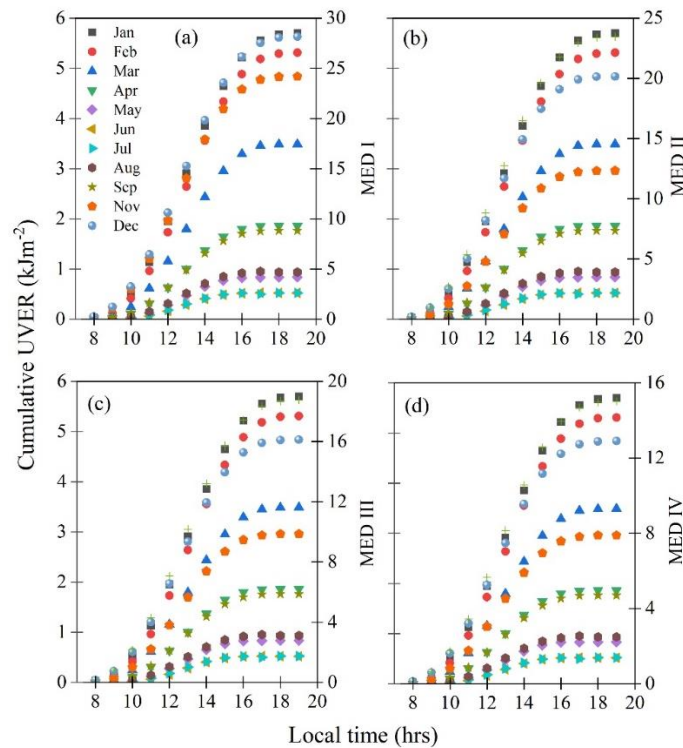


Fig. 7 Accumulated UVER per month and number of MED received between 8:00 to 19:00 LT in Santiago, Chile during the years 2015-2018.

3.3.3 Ground-based air pollution and UVER

Figure 8a shows the seasonal variation of the daily maximum tropospheric O₃ concentration and observed UVER values for selected days of the year 2015 and Figure 8b provide the hourly and seasonal variations of tropospheric O₃ during the years 2015-2018. Tropospheric O₃ concentrations were higher during the summer months, which exceeded values of 70 ppbv (see Figure 8b). This occurred on days with higher UVER levels and conditions with less presence of atmospheric aerosols PM₁₀, NO₂, cloud cover and TOC (Figures. 2b, c, d). Therefore, the atmosphere is more translucent to incoming UVER that provides the energy necessary for the photochemistry involved in producing tropospheric O₃ in the presence of precursors (NO_x and VOCs).

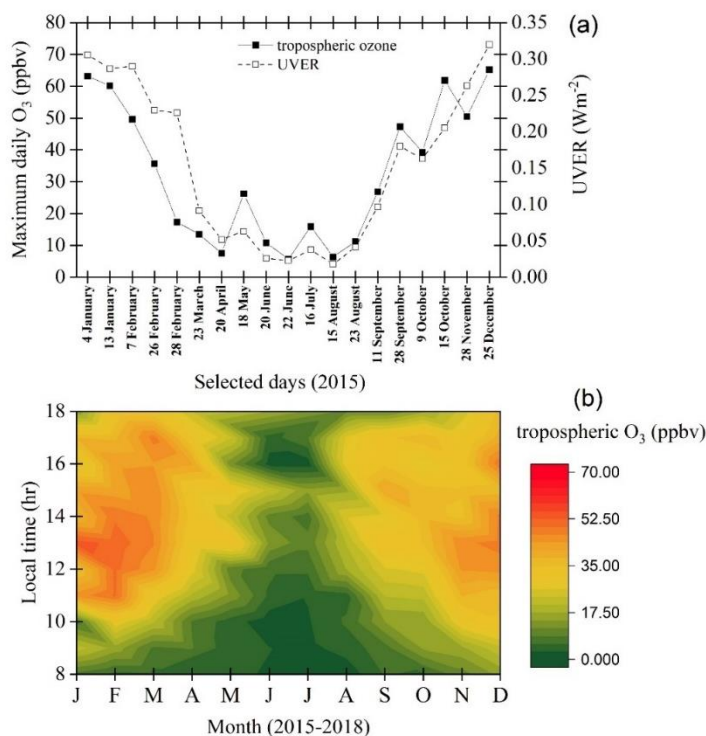


Fig. 8 (a) Maximum daily tropospheric O₃ and UVER for selected days during the year 2015 and (b) hourly variations of tropospheric O₃ in Santiago de Chile during 2015-2018 years.

Meteorological parameters including temperature, RH, wind speed and rain have an important role in the photochemistry involving the production of tropospheric O₃ (Coates et al. 2016; Li et al. 2017). High O₃ concentrations (≥ 70 ppbv) were observed during the afternoons of the warmest months (see Figure 8b and Figure S1 of the Supporting Information) when UVER and ambient temperature were higher. Not surprisingly, when lower UVER levels and temperatures occur in the winter months, the observed concentrations of tropospheric O₃ are low. Also, the rainfall during the winter may help to eliminate water-soluble pollutants and the water vapour (HO_x = HO+HO₂) present on the atmosphere has a high destructive action on tropospheric O₃ (Monks et al., 2015). In our observation, it is found that the mean maximum concentration of surface O₃ reaches its peak value at solar noon, 1 hour after the maximum intensity of solar radiation (see Figure S2 of the Supporting Information).

Our findings show that current tropospheric O₃ concentrations in Santiago are high and are consistent with other studies (Rappenglück et al. 2000; Rubio et al. 2004; Seguel et al. 2020). Currently, this air pollutant exceeds the Chilean National Air Quality Standard (MMA, 2017) for the analyzed period, it was found that 13 days exceeded the O₃ concentration limit of 61

ppbv for an 8 hour period. If the WHO (WHO, 2005) guideline of 50 ppbv for an 8-hour-period was to be considered, 147 days exceeded this proposed limit. Therefore, the current levels of tropospheric O₃ observed in Santiago during the warmer months are considered unsafe for sensitive groups and the environment.

On the other hand, a positive correlation ($p < 0.05$) with a Pearson coefficient, $r = 0.67$ was found between hourly mean values of UVER levels and tropospheric O₃ concentration. The correlation increases up to $r = 0.96$ when considering the monthly mean values (see Figure S3 of the Supporting Information), that is more representative for the annual behaviour of tropospheric O₃. The relationship between tropospheric O₃, NO₂ and UVER levels through each season is presented in Figure 9. The results showed that during consecutive days (two or three days) with similar NO₂ levels, the changes in tropospheric O₃ concentration were explained by variations in the amount of UVER received in the lower atmosphere. Tropospheric O₃ levels were higher during days with high UVER values, but similar NO₂ levels as shown in Figure 9. Seasonal NO₂ mean values were 8.3 ± 5.0 ppbv, 18.69 ± 11.3 ppbv, 31.9 ± 14.2 ppbv, and 14.8 ± 6.3 ppbv in summer, autumn, winter and spring, respectively. In spring, the minimum and maximum daily concentrations of NO₂ were found between 5.3 to 33.3 ppbv; in autumn NO₂ reached a maximum of 52.9 ppbv, while the highest concentrations of NO₂ were found in the winter (73.7 ppbv). Despite the high concentration of NO₂ in winter, tropospheric O₃ is at its lowest level, that is suggesting an additional mechanism for removal of O₃ through NO_x reaction during the winter (Parrish et al. 1999; Iny et al. 2015).

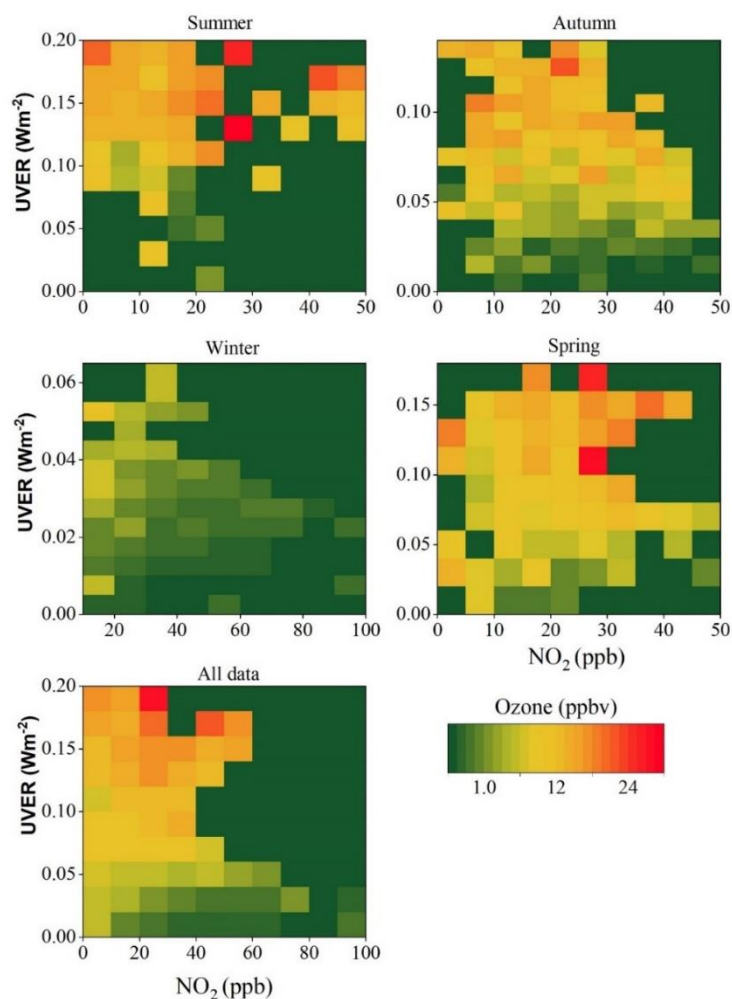


Fig. 9 Comparison of the UVER with tropospheric O₃ and NO₂ concentrations in summer; winter; autumn; spring and all data for the years 2015-2018.

Tropospheric O₃ concentration increased when UVER levels were above 0.10 Wm⁻² (UVI= 4). It is important to note that the levels of tropospheric O₃ during the summer was not directly correlated to NO₂ levels, suggesting that the photochemistry of this secondary pollutant is more related to the intensity of solar radiation. Santiago has the largest air quality monitoring network in the country, however, important variables such as Non-Methane Hydro Carbons (NMHC) and some Volatile Organic Compounds (VOCs) have been discontinued for decades. Therefore, it is relevant to continue monitoring biogenic and anthropogenic VOCs to improve the understanding of tropospheric O₃ formation in Santiago and apply strategies for air pollution control under Climate Change. Studies have predicted for the next decades higher temperature and drought in Central Chile (Garreaud et al., 2020), that may contribute in reducing the air quality of the region by enhancing photochemical pollutants, such as tropospheric O₃. Several studies describe that cities with high air pollution and cloud cover had suggested a decrease in UV radiation (Antón et al. 2008; Wang et al. 2020), however, this research suggests that in Santiago despite the scattering effect, incoming solar radiation (UVER) reaches the surface energetically enough to cause sunburn and increase the levels of tropospheric O₃ from late spring to early autumn.

4. Conclusions

This study is based on ground-based measurement of UVER for the urban area of Santiago, located in central Chile. The minimum UVER levels occurred in winter and the maximum in summer (January), with an absolute maximum equal to 0.33 Wm⁻² (equivalent UVI = 14). The UVI levels greatly exceeded the threshold indicated as "very high" and "extreme" risk of sunburn during late spring to early autumn. Extreme UVI values (≥ 11) were observed in 17% of the days, while, for 50% of the days, the UVI reached values between Extreme and High during 2015-2019 years. The maximum cumulative daily dose in the summer was 5.70 kJm⁻², that in terms of skin phototypes translate into a dose of 28.35 (MED I), 22.68 (MED II), 16.20 (MED III) and 12.54 (MED IV). These results can be used to provide public awareness about the health risks from unprotected direct exposure to sunlight in central Chile throughout most of the year.

A positive correlation was found between the UVER intensity and tropospheric O₃ concentrations, indicating that photochemistry involved in ozone production is strongly influenced by changes in UVER levels rather than NO₂ precursor. These findings may contribute to future research efforts to better understand the air pollution affecting Santiago as well as other regions with similar climate and atmospheric conditions. Future research may include modelling the atmospheric conditions of the Metropolitan Region of Santiago, including the interaction of photochemical pollutants and its precursors.

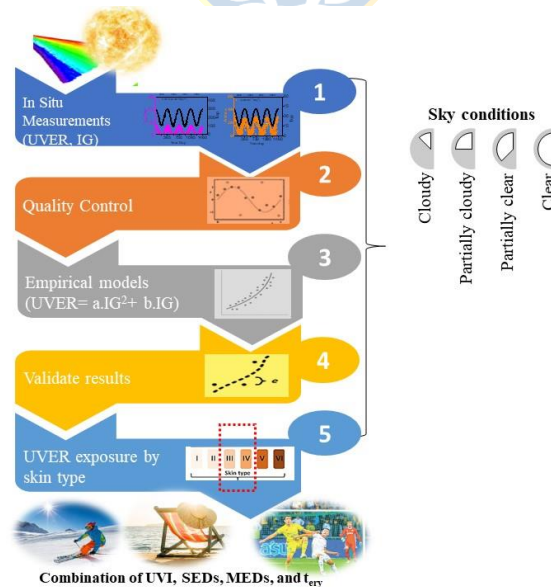
1-González-Rodríguez L, Rosas J, Pereira de Oliveira A, Rodríguez L, Contreras D and Baeza C. (2019). Modeling of hourly and daily values of erythemal ultraviolet radiation in Santiago de Chile City. In ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry. Santiago de Chile. <https://doi:10.18086/swc.2019.45.04 A>

2-González-Rodríguez, L.; de Oliveira, A.P.; Rodríguez-López, L.; Rosas, J.; Contreras, D.; Baeza, A. C. Study of UVER at Santiago, Chile, Based on Long-Term (Five Years) of In Situ Measurements and Empirical Modelling. *Energies* 2021, *14*, 368. <https://doi.org/10.3390/en14020368>.

4.2 A Study of UVER in Santiago, Chile Based on Long-Term In Situ Measurements (Five Years) and Empirical Modelling.

Abstract: Ultraviolet radiation is a highly energetic component of the solar spectrum that needs to be monitored because is harmful to life on Earth, especially in areas where the ozone layer has been depleted, like Chile. This work is the first to address the long-term (five-year) behaviour of ultraviolet erythemal radiation (UVER) in Santiago, Chile (33.5° S, 70.7° W, 500 m) using in situ measurements and empirical modelling. Observations indicate that to alert the people on the risks of UVER overexposure, it is necessary to use, in addition to the currently available UV index (UVI), three more erythema indices: standard erythemal doses (SEDs), minimum erythemal doses (MEDs), and sun exposure time (t_{ery}). The combination of UVI, SEDs, MEDs, and t_{ery} shows that in Santiago, individuals with skin types III and IV are exposed to harmfully high UVER doses for 46% of the time that UVI indicates is safe. Empirical models predicted hourly and daily values UVER in Santiago with great accuracy and can be applied to other Chilean urban areas with similar climate. This research inspires future advances in reconstructing large datasets to analyse the UVER in Central Chile, its trends, and its changes.

Keywords: UVER radiation; sky conditions; empirical models; Santiago de Chile



A Study of UVER in Santiago, Chile Based on Long-Term In Situ Measurements (Five Years) and Empirical Modelling

Lisdelys González-Rodríguez ^{1*}, Amauri Pereira de Oliveira ², Lien Rodríguez-López ³, Jorge Rosas ², David Contreras ⁴ and Ana Carolina Baeza ³

Citation: González-Rodríguez, L.; de Oliveira, A.P.; Rodríguez-López, L.; Rosas, J.; Contreras, D.; Baeza, A. C. Study of UVER at Santiago, Chile, Based on Long-Term (Five Years) of In Situ Measurements and Empirical Modelling. *Energies* **2021**, *14*, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Received: 3 November 2020
Accepted: 4 January 2021
Published: date

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

- ¹ Faculty of Engineering, University of Concepcion, Concepcion, 403000, Chile
- ² Department of Atmospheric Sciences, Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 05508-090, SP, Brazil; apdolive@usp.br (A.P.d.O.); jorge.rosas@usp.br (J.R.)
- ³ Faculty of Environmental Sciences & EULA Center, University of Concepcion, Concepcion, 403000, Chile; lrodriguez@udec.cl (L.R.-L.); anabaeza@udec.cl (A.C.B.)
- ⁴ Centre for Biotechnology, Department of Analytical and Inorganic Chemistry, Faculty of Chemical Sciences, University of Concepcion, Concepcion, 403000, Chile; dcontrer@udec.cl (D.C.)

Abstract: Ultraviolet radiation is a highly energetic component of the solar spectrum that needs to be monitored because is harmful to life on Earth, especially in areas where the ozone layer has been depleted, like Chile. This work is the first to address the long-term (five-year) behaviour of ultraviolet erythral radiation (UVER) in Santiago, Chile (33.5° S, 70.7° W, 500 m) using in situ measurements and empirical modelling. Observations indicate that to alert the people on the risks of UVER overexposure, it is necessary to use, in addition to the currently available UV index (UVI), three more erythema indices: standard erythral doses (SEDs), minimum erythral doses (MEDs), and sun exposure time (t_{ery}). The combination of UVI, SEDs, MEDs, and t_{ery} shows that in Santiago, individuals with skin types III and IV are exposed to harmfully high UVER doses for 46% of the time that UVI indicates is safe. Empirical models predicted hourly and daily values UVER in Santiago with great accuracy and can be applied to other Chilean urban areas with similar climate. This research inspires future advances in reconstructing large datasets to analyse the UVER in Central Chile, its trends, and its changes.

Keywords: UVER radiation; sky conditions; empirical models; Santiago de Chile

1. Introduction

Ultraviolet solar radiation (UV, 100–400 nm) plays an important role in the upper atmosphere's composition and material, terrestrial and aquatic ecosystems, and human health [1–8]. It is subdivided into three spectral bands: UV-C radiation (100–280 nm), UV-B radiation (280–315 nm), and UV-A radiation (315–400 nm). Their interaction with the biosphere involves different physical, chemical, and biological processes [1,5]. Some of them are harmful to humans, causing skin reddening (erythema) [9], reduction of vitamin D synthesis [10–12], cataracts [13], or

development of melanoma skin cancer [14,15]. As a consequence, human health risk assessment requires continuous monitoring of UV levels, mainly that of erythemal ultraviolet radiation (UVER). UVER is calculated by weighting the spectral curve of the incident UV-B solar radiation at the surface with the spectral action curve proposed by the International Commission on Illumination [16]. Moreover, UVER can be used to estimate other widely used variables, such as the UV index (UVI), standard erythemal doses (SEDs), minimum erythemal doses (MEDs), and sun exposure time (t_{ery}). The last two erythemal indices are related to the effect of exposure to ultraviolet radiation (tanning) and skin colour (white, brown, or black), and are influenced by the melanin present in the skin. Melanin plays a vital role in protecting the human body from UV radiation by filtering sunlight before it can damage skin cells [17,18]. Pale or white skin burns easily and tans slowly and poorly: It needs more protection against sun exposure. The Fitzpatrick classification identifies skin types based on the UV effect on the skin [19].

Despite the global recommendation [20], few studies of UVER are available in South America [21]. This is particularly burdensome in Chile, especially in Santiago, where there is a high prevalence of melanoma cancer caused by UV exposure and which comprises 40% of the country population [22]. Given the increase of problems related to the exposure to UV radiation in Chile [11,22–25], spectral measurements of the solar resource have been incorporated into the solar network. Currently, 29 stations measure the UVER and 22 of them measure the UV-B; recently, UV-B, UV-A, photosynthetically active radiation and infrared radiation estimates have been incorporated into the online tool “Solar explorer” [26]. The main institutions involved in UV monitoring are the Chilean Meteorological Office (DMC) [27], the National Cancer Corporation (CONAC), and the University of Santiago (USACH). The last two carry out UVI measurements in some localities of the country, which can be found at [28]. However, few studies are available about the doses received in periods of exposure by workers and individual susceptibilities [9,11,29]. As will be shown in this work, long-term measurements of UVER and its corresponding erythemal indices, such as UVI, SEDs, MEDs, and t_{ery} , can provide useful information for risk assessment of sun-induced skin damage. One simple alternative is using empirical expressions derived from the correlation between solar global irradiance (IG) and its UV component, both measured independently at the surface [30–32]. For instance, Ref. [33] developed empirical expressions for daily UV-B values, and Ref. [34,35] did so for hourly UV-B and UVER values, respectively. Recent work has proposed simple linear regression to estimate UVER in two locations at high altitudes in Argentina [36], and in a previous work, we developed a preliminary empirical model to estimate hourly and daily values of UVER in Santiago, Chile [37].

The hypothesis that will be tested in this research is whether the UVER observed at the surface in Santiago de Chile is sufficient to generate erythemal damage in skin phototypes that characteristic of the Chilean population when the UVI indicates that it is safe. To test this hypothesis, we are going to (1) estimate the seasonal variation of the daily and hourly UVER in Santiago de Chile under different sky conditions, (2) evaluate the negative effects of UVER using four indices of erythema (UVI, SEDs, MEDs, and t_{ery}), and (3) develop and validate empirical models to estimate hourly and daily values of UVER from IG radiation at the surface, considering explicitly the

seasonal variation of cloudiness and other climate features so they can be applied to assess UVER exposure of populations in other areas of Chile.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

This study was performed in the most populated area of central Chile, Santiago de Chile (33°30' S, 70°42' W), a city with just over 5.6 million inhabitants, accounting for 40% of the national population with a density of 393 inhabitants per km² [38]. Santiago is located in a relatively flat and wide valley at 500 m above sea level (asl) and about 100 km from the Pacific coast (Figure 1). It is surrounded by mountain ranges, with the Andes mountains on the east side, Cordillera de la Costa heading west, Chacabuco to the north, and Paine to the south. The mountain ranges (up to 4000 m high) and hills surrounding the city reduce ventilation and affect air pollutant dispersion, mainly in winter [39]. During the warm and dry summer months, the city is exposed to relatively high concentrations of secondary oxidants, while in winter, it is exposed to high concentrations of particulate matter and nitrogen oxides [39,40]. Santiago presents a semi-arid climate with an annual mean precipitation of 350 mm, which is concentrated in the winter months [41].

2.2. Instruments and Satellite Data

The radiometric site is in the urban area of Santiago (33.27° S, 70.41° W, 512 m asl), in the Estación Central district (Figure 1). Sensors were set up on the roof of a three-story building (Department of Physics) at the University of Santiago (USACH, Universidad de Santiago). At this site, solar radiation between 280 and 315 nm (UVER) was measured with a PMA-2101 detector that was calibrated at the factory (manufactured by Solar Light Company, Orlando, Florida, USA). Solar radiation between 350 and 1150 nm (IG) was measured with a sensor built at the USACH, consisting of a silicon detector coupled to an amplifier enclosed in an aluminium housing. The sensor was calibrated against a Kipp and Zonen pyranometer model CMP22. The primary dataset comprised hourly values of global solar radiation (IG, Wm⁻²) and ultraviolet erythemal radiation (UVER, μWcm⁻²) observed continuously for five years from 1 January 2015 to 31 December 2019.

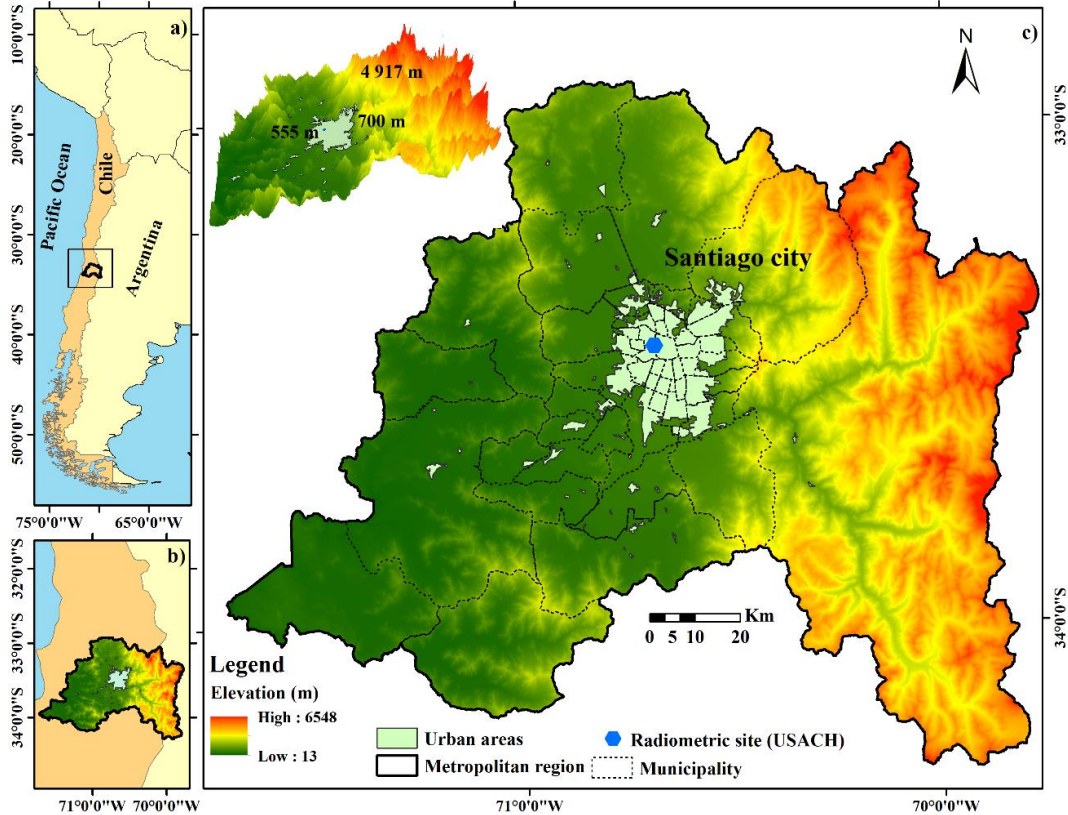


Figure 1. Geographic position of Chile in South-American (a) and topography of the city of Santiago de Chile (b). The elevation and distribution of municipalities in (b,c) were created using an ArcGIS analysis of a shapefile. The shapefiles of the metropolitan region and profile elevation were obtained from IDE [42].

Hourly values of cloud cover (CC, oktas) were obtained from the International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP-H series) for Santiago for the 21 years from 1985 to 2015. These data are available on the ISCCP website (<https://isccp.giss.nasa.gov/>). Daily values of the total column of ozone (TOC, DU) were estimated by the Earth Probe TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) for Santiago during the five years from 2015 to 2019. These data are available on the TOMS website (<http://toms.gsfc.nasa.gov>).

2.3. Quality Control

The quality control (QC) procedure consisted of removing the following from the primary dataset: (a) negative values of UVER and IG; (b) IG values higher than the maximum extra-terrestrial global irradiance values on the top of the atmosphere (1366 Wm^{-2}). After the QC, the resulting time series consisted of 13,011 hourly values and 1574 daily values of IG and UVER. They correspond to hourly and daily values measured simultaneously, a mandatory requirement for modelling applications, and are expressed in irradiance (Wm^{-2}) or irradiation (kJm^{-2} , MJm^{-2}) units, respectively. Table 1 presents the number of simultaneous hourly and daily measurements for each year.

Table 1. Dataset description.

Measurement	Year					Total
	2015	2016	2017	2018	2019	
Hourly	2593	3022	2631	2533	2461	13,011
Daily	333	346	339	328	228	1574
Freq. Obs. (%) [#]	91.2	94.5	92.9	89.9	62.5	86.2

[#] Daily distribution.

Given that most of the years are well covered by observations (Table 1), it is plausible to assume that the five years of UVER and IG measurements between 2015 and 2019 are representative climatological conditions and include most of the relevant atmospheric patterns of the Santiago climate.

2.4. Clearness Index

Clearness index (K_T) is defined as the ratio of global solar radiation at the surface (IG) to extra-terrestrial global irradiance on the top of the atmosphere (I_{TOA}) [43]. By analogy, the clearness index for UVER (K_{TUVER}) was defined as the ratio of UVER at the surface to UVER at the atmosphere top ($UVER_{TOA}$).

The hourly values of UVER and IG at TOA (I_{TOA}) were estimated using Equations (1)–(3). The solar zenith angle (SZA) in (1) was computed by the algorithm proposed by [44]. The astronomic distance (U) in (2) is based on [45]. The extra-terrestrial irradiance at an astronomical distance (I_{sc}) of 1 was set equal to 1366 Wm^{-2} for IG [45] and 9.89 Wm^{-2} for UVER [36]. The year-long variation of the relative sun–Earth position is indicated by Γ in (3) and was estimated in terms of the year–day (Jday), varying from 1 on 1 January to 365 (366) on 31 December (leap year).

$$I_{TOA} = I_{sc} U \cos \text{SZA} \quad (1)$$

$$U = 1.00011 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.00007 \sin 2\Gamma \quad (2)$$

$$\Gamma = 2\pi \cdot (\text{Jday} - 1)/365 \quad (3)$$

The clearness index is a good indicator for the absorption and scattering process of all atmospheric constituents [46], e.g., when the atmospheric attenuation increases, the clearness index decreases, mostly due to cloudiness.

2.5. Erythema Indexes

As mentioned before, UVER can be used to estimate other widely used erythema indexes, such as the UV index (UVI), standard erythemal doses (SEDs), minimum erythemal doses (MEDs), and sun exposure time (t_{ery}).

The UV index is defined as 40 times the erythemal-weighted UV irradiance [47]. The concept of UVI originated in Canada, and was designed to represent the erythemal potential in a simple form, $UVI = UVER (\text{Wm}^{-2}) \times 40$ [48]. As a result, this

index is usually divided into five risk categories: $UVI < 2$ (low); $2 \leq UVI < 5$ (medium); $5 \leq UVI < 7$ (high); $7 \leq UVI < 11$ (very high); and $UVI \geq 11$ (extreme) [20].

Standard erythemal dose (SED) is defined as a standardized unit of measure of erythemal radiation; 1 SED is estimated to be equivalent to an erythemal radiant exposure of 100 Jm^{-2} and is independent of skin type.

The minimum erythemal dose (MED) is defined as a measure of the variable nature of the skin's sensitivity to UV radiation exposure. The sensitivity of the skin to UV radiation exposure can be classified by the Fitzpatrick classification [19]. For the most sensitive skin types, 1 MED is equal to approximately 200 Jm^{-2} (weighted by the erythema action spectrum), while for resistant skins, a value of 4 is approximately 500 Jm^{-2} . For this analysis, the MED was calculated from the UVER accumulated between 8:00 and 17:00 local time (LT) considering two Fitzpatrick skin types: skin types III–IV ($MED = 350\text{--}450 \text{ Jm}^{-2}$). According to Ref. [49], they are the most frequently observed skin types in Chile.

Sun exposure time (t_{ery}) is defined as the time (in minutes) that it takes to cause erythema. It depends on UVER intensity and personal sensitivity value (phototype). It is estimated as $t_{ery} = SPF(MED/UVER)$, where SPF is the sun protection factor of skin, which is equal to 1 (without protection), and MED is the minimum UVER dosage that causes erythema after sun exposure between 8:00 and 18:00 LT (local time) for skin types III and IV in Santiago de Chile.

2.6. Modelling Strategy

To model UVER in terms of IG using linear regression analysis, the five-year-long dataset was divided into two parts. The data gathered between 2015 and 2018 (four years) were used exclusively to build the regression model. Measurements during 2019 (one year) were used only for validation (Table 1).

The regression analysis performed here consists of establishing relations between UVER and IG (hourly and daily values) for different sky conditions based on observations made between 2015 and 2018. First, a set of empirical models is developed for each season of the year and five K_{τ} categories are defined in Section 3. Each model corresponds to a polynomial curve fitted through dispersion diagrams of UVER versus IG using a simple least-squares regression method [50]. Finally, the validation of all regression models is carried out using the UVER and IG measured in 2019. The validation comprises a performance analysis based on the following statistical parameters: determination coefficient (R^2), Pearson correlation coefficient (r), mean bias error (MBE), root-mean-square error (RMSE), normalized root-mean-square error (NRMSE), mean absolute percentage error (MAPE), and index of agreement (IA), given respectively by:

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

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (5)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\frac{\sum O_i}{n}} \times 100 \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (8)$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (9)$$

where P_i represents the modelled values, O_i represents the measured ones, and n represents the number of observations. All regression models were built using MATLAB software.

3. Results and Discussion

In this work, the analyses of seasonal variation of UVER and related variables used to assess its impact on human health, as well as the modelling, were carried based on the K_T classification proposed by [30]. Here, the sky condition will be considered: (1) cloudy ($K_T \leq 0.35$), (2) partially cloudy ($0.35 < K_T \leq 0.55$), (3) partially clear ($0.55 < K_T \leq 0.65$), (4) clear sky ($K_T > 0.65$), and (5) all-sky condition ($0 \leq K_T \leq 1$). Daily and hourly values of irradiance (UVER, IG, IG_{TOA}) correspond to the total flux of energy received from the Sun per unit of area and per hour and day, respectively. Daily values are expressed in $MJ m^{-2}$ (IG, IG_{TOA}) and kJm^{-2} (UVER), while hourly values are indicated in Wm^{-2} .

3.1. Seasonal Variation of UVER

3.1.1. Daily Values

The observations carried out in Santiago City from 2015 to 2019 indicate that the monthly average daily values of UVER are equal to $2.84 \pm 0.21 kJm^{-2}$, ranging from a summer maximum of $5.59 \pm 0.09 kJm^{-2}$ (December) to a winter minimum of $0.52 \pm 0.02 kJm^{-2}$ (June) (Table 2). Similarly, the monthly average daily value of IG, on average, is $15.99 \pm 1.12 MJm^{-2}$, also varying from a summer maximum of $25.80 \pm 0.36 MJm^{-2}$ (December) to a winter minimum of $7 \pm 0.22 MJm^{-2}$ (June and July). The seasonal variation of both UVER and IG results from a combination of astronomical factors, cloud cover, and TOC patterns. For the latitude of Santiago ($\sim 33.5^\circ S$), the maximum day length (13.914 ± 0.004 hr) and IG_{TOA} ($42.89 \pm 0.02 MJ m^{-2}$) occur in December, and the respective minima (10.078 ± 0.003 hr; $42.89 \pm 0.02 MJ m^{-2}$) in June. The mean cloud

cover in Santiago is $65.9 \pm 3.3\%$, with a winter maximum of $78.4 \pm 1.2\%$ (June) and a summer minimum of $51.0 \pm 1.2\%$ (February).

The TOC displays a seasonal variation, with a maximum of 310.7 ± 1.8 DU in September, a minimum of 264.8 ± 1.5 DU in April, and a mean of 283.6 ± 4.8 DU. It is important to note that, on average, TOC levels remain below 320 DU, which is considered normal for Santiago [51].

The mean K_T is 0.514 ± 0.038 , ranging from a summer maximum of 0.628 ± 0.009 (January) to an autumn–winter minimum of 0.411 ± 0.014 (May and July). Similarly, the mean K_{TUVER} is 0.0127 ± 0.0001 , varying from a summer maximum of 0.0204 ± 0.0003 (January) to a winter minimum of 0.0049 ± 0.0002 (June and July). In general, CC increases in the winter months as a result of a decrease in K_{TUVER} and K_T , and vice versa during summer months. In addition, during winter, the higher frequency of fog and high aerosol loading events also contribute to reduce both clearness indexes in Santiago [52].

Table 2. Monthly average daily values (standard error) of ultraviolet erythral radiation (UVER) and related variables under all-sky conditions from 2015 to 2019 for Santiago.

Month	UVER (kJm^{-2})	K_{TUVER}	IG (MJm^{-2})	K_T	CC ^A (%)	TOC (DU)	Day Length (hr)	IG _{TOA} (MJ m^{-2})
J	5.56 ± 0.09	0.0204 ± 0.0003	25.30 ± 0.40	0.628 ± 0.009	52.4 ± 1.2	272.9 ± 0.8	13.724 ± 0.012	42.46 ± 0.05
F	5.07 ± 0.08	0.0201 ± 0.0003	23.93 ± 0.25	0.629 ± 0.006	51.0 ± 1.2	268.1 ± 0.9	13.055 ± 0.019	39.08 ± 0.11
M	3.48 ± 0.07	0.0162 ± 0.0003	19.69 ± 0.32	0.613 ± 0.009	52.6 ± 1.2	266.1 ± 1.1	12.159 ± 0.023	33.29 ± 0.11
A	1.86 ± 0.07	0.0114 ± 0.0004	12.95 ± 0.40	0.515 ± 0.016	62.4 ± 1.6	264.8 ± 1.5	11.220 ± 0.021	26.38 ± 0.16
M	0.82 ± 0.03	0.0065 ± 0.0002	7.88 ± 0.25	0.410 ± 0.014	73.0 ± 1.4	271.4 ± 1.8	10.455 ± 0.014	20.81 ± 0.10
J	0.52 ± 0.02	0.0049 ± 0.0002	7.05 ± 0.22	0.424 ± 0.014	78.4 ± 1.2	281.9 ± 2.1	10.078 ± 0.003	18.25 ± 0.02
J	0.56 ± 0.02	0.0049 ± 0.0002	7.02 ± 0.22	0.411 ± 0.014	77.5 ± 1.1	286.8 ± 2.1	10.240 ± 0.010	19.28 ± 0.07
A	0.96 ± 0.04	0.0065 ± 0.0002	9.34 ± 0.29	0.420 ± 0.014	77.3 ± 1.2	293.8 ± 1.9	10.877 ± 0.019	23.62 ± 0.13
S	1.90 ± 0.07	0.0099 ± 0.0003	12.79 ± 0.40	0.434 ± 0.016	77.2 ± 0.9	310.7 ± 1.8	11.756 ± 0.022	29.82 ± 0.15
O	2.98 ± 0.09	0.0130 ± 0.0004	16.18 ± 0.49	0.462 ± 0.016	73.4 ± 1.2	309.2 ± 1.5	12.695 ± 0.022	36.02 ± 0.13
N	4.90 ± 0.09	0.0184 ± 0.0003	24.00 ± 0.48	0.601 ± 0.014	65.1 ± 1.3	298.4 ± 1.6	13.503 ± 0.015	40.63 ± 0.08
D	5.59 ± 0.09	0.0202 ± 0.0003	25.80 ± 0.36	0.619 ± 0.010	57.7 ± 1.2	281.0 ± 1.1	13.914 ± 0.004	42.89 ± 0.02
mean	2.84 ± 0.21	0.0127 ± 0.0001	15.99 ± 1.12	0.514 ± 0.038	65.9 ± 3.3	283.6 ± 4.8	11.973 ± 0.405	31.04 ± 2.67

^A 1983–2015.

The frequency distribution of daily values of K_T indicates that clear skies occur in Santiago on 20.3% of the days; the skies are partially clear on 30.6% of the days, partially cloudy on 31.3%, and cloudy on 17.8%. The impact of sky conditions on the seasonal distribution of daily values of UVER is indicated in Figure 2. In Santiago, the maximum daily value of UVER ($6.27 \pm 0.04 \text{ kJm}^{-2}$) occurs in the summer (January) under clear sky conditions, and the minimum ($0.31 \pm 0.02 \text{ kJm}^{-2}$) occurs in the winter (June) under cloudy conditions. The difference between daily values of UVER under clear and cloudy skies is, on average, largest during summer ($4.34 \pm 0.47 \text{ kJm}^{-2}$) and smallest during winter ($0.34 \pm 0.06 \text{ kJm}^{-2}$). The difference between clear and partially clear or partially cloudy skies drops to $1.96 \pm 0.09 \text{ kJm}^{-2}$.

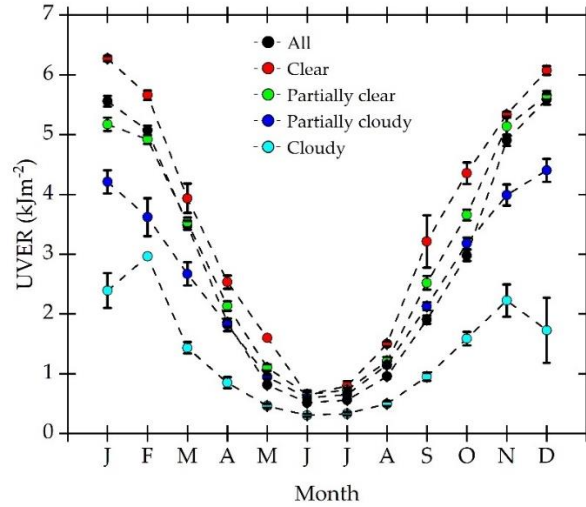


Figure 2. Seasonal distribution of monthly average daily values of UVER for all-sky, clear, partially clear, partially cloudy, and cloudy conditions observed during 2015–2019 in Santiago.

3.1.2. Hourly Values

With selected observations carried out from 8:00 to 19:00 LT, the seasonal variation of the daytime evolution of UVER as a function of sky condition is displayed by contour plots in Figure 3. Monthly average hourly values of UVER under all-sky conditions are found between 0.26 Wm^{-2} and 0.03 Wm^{-2} during the central hours period (Figure 3a). The highest differences occur between clear and cloudy skies, with hourly values of UVER exceeding 0.27 Wm^{-2} (Figure 3b) and 0.12 Wm^{-2} (Figure 3e), respectively. The maximum hourly values of UVER decrease progressively from 0.24 Wm^{-2} under partially clear to 0.18 Wm^{-2} under partially cloudy (Figure 3c,d).

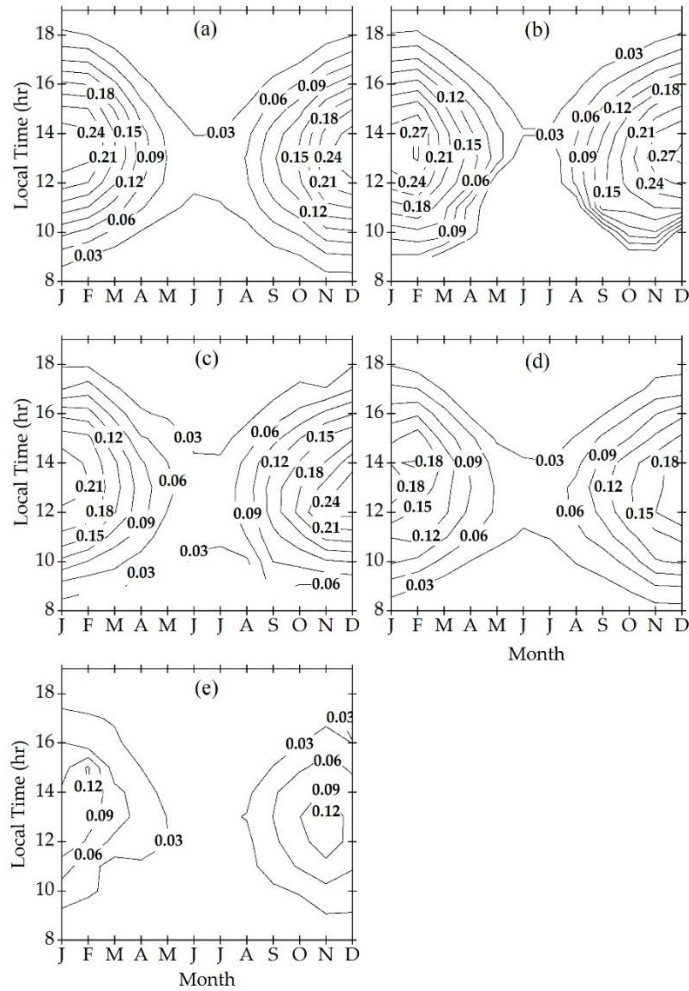


Figure 3. Contour plot of the monthly average hourly values of UVER for (a) all-sky, (b) clear, (c) partially clear, (d) partially cloudy, and (e) cloudy conditions observed during 2015–2019 in Santiago.

3.2. UVER Effects on Human Health

In this section, four erythema indices—UVI, t_{ery} , SEDs, and MEDs—are used to assess the potential risk of exposure to UV radiation in Santiago in terms of sky conditions (Figures 4 and 5). Previous studies have shown that due to the physical–geographical characteristics present in Santiago, satellite-based UVI estimates had significant errors [53,54]. Hence, it is of great importance to have long-term and in situ measurements of the UVER and its relation with the mentioned erythema indexes. There have been few studies in Chile in this direction; most of them are concentrated in the north of the country, e.g., Arica [9,15,25,55].

3.2.1. UVI and Sun Exposure Time

Observations during the period 2015–2019 indicate that in Santiago, extreme UV values ($UVI \geq 11$) occur on 26% of the days, while by including high and very high UVI values, the percentage rises to 54%. In summer months, under all-sky conditions, the UVI at solar noon reaches an average of 10 (Figure 4a), coinciding with the UVI measurement reported previously by [53]. Compared to all-sky conditions, the monthly average hourly UVI value increases (decrease) by 1 if the sky condition is clear (partially clear) (Figure 4b,c).

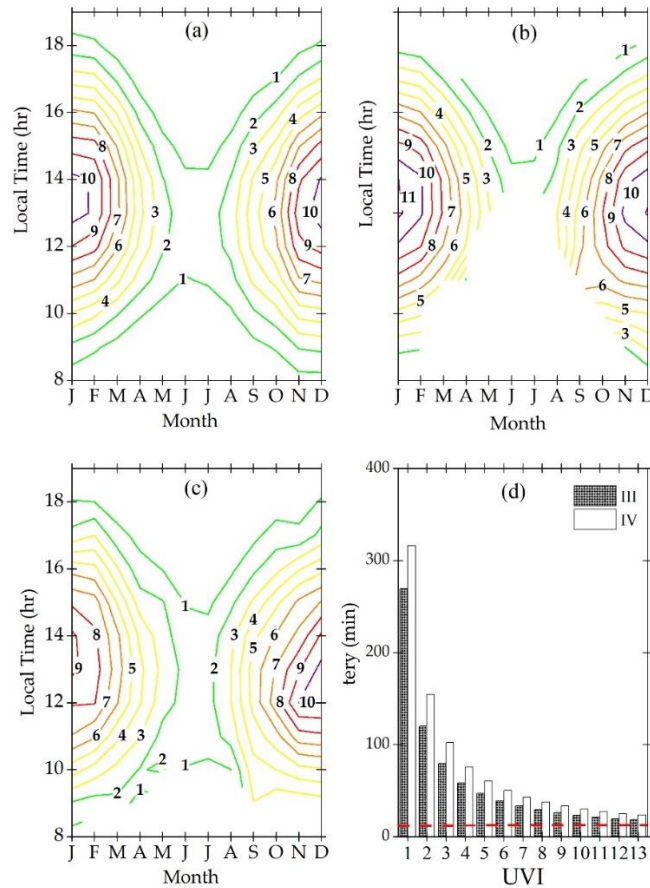


Figure 4. Contour plot of monthly average hourly values of the UV index (UVI) in Santiago for (a) all-sky, (b) clear, and (c) partially clear conditions, as well as (d) sunburn times in minutes for skin types III and IV, calculated during 2015–2019. The red dashed line in (d) represents $t_{ery} = 10$ min. The colour scales (Violet ≥ 10 ; $8 \leq \text{red} < 10$, $6 < \text{orange} \leq 7$; $3 < \text{yellow} \leq 5$; green ≤ 2) in (a)–(c) correspond to the World Health Organisation (WHO) colour pattern [20].

The analysis of monthly average hourly values indicates the presence of UVI equal to 13 at solar noon in January under clear sky conditions (not shown), which is considered as “extreme” according to the World Health Organisation (WHO) [20]. As indicated in Figure 4d (red line), under these extreme conditions, sunburn appears in 10 min for phototypes III and IV [56]. When UVI reaches values of $UVI \geq 10$, skin-type III and IV persons suffer sunburn between 18–23 and 24–30 min, respectively. Now,

when UVI values are between 3 and 4, a skin-type III person takes 60 min to suffer sunburn. Therefore, the population with skin types III and IV, which is predominant in Chile, is chronically exposed to high UV radiation levels without warnings of the consequences.

In the spring months, 26% of the UVI values are greater than 6. This fraction of UVI values increases to 54% when the lower threshold drops to 4. In autumn, 44% of the UVI values are less than 3 (medium), and the average value is 4. During the winter months, the UVI reaches values of 1 and 2, which are known as harmless for people. However, recent studies by [57,58] showed that even a UVI of less than 2 can cause damaging sunburns to fair skin with prolonged exposure time.

Considering these reasons, the UVI is a valuable tool for measuring health-safe sun exposure, but the exposure time is similarly important and must be considered. Ou-Yang and co-workers [59] showed that a beach umbrella alone does not provide sufficient protection for long UV exposure. Hence, this information could be used for alerting people when practising recreational outdoor activities, such as snowboarding, soccer, or beach events, as well as for outdoor workers [60].

3.2.2. Erythemal Doses (SED and MED)

As indicated in Figure 5a–d, the accumulated hourly values of UVER are related to the standard and minimal erythemal doses—SEDs and MEDs, respectively. A non-linear growth was always observed during the day.

Considering the period from 8:00 to 17:00 LT, it is observed that the accumulated UVER varies from 3.31 kJm^{-2} for clear skies to 2.75 kJm^{-2} for cloudy skies (Figure 5a), corresponding to SED variation from 33.14 and 28.04 (Figure 5b). Under partially clear and partially cloudy skies, the maximum accumulated values of UVER decrease to 0.15 and 0.32 kJm^{-2} , respectively. Consequently, SEDs maintain high values of up to 29.98, and therefore, the presence of clouds associated with partially clear and cloudy sky conditions does not provide an effective filter for protection against UV rays.

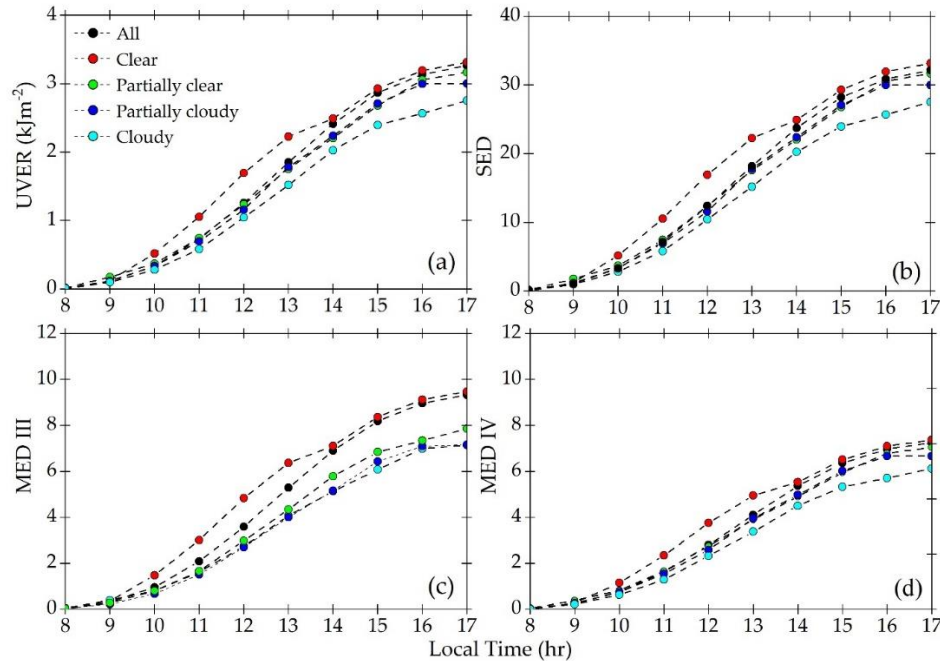


Figure 5. Accumulated hourly values of (a) UVER, (b) standard erythemal dose (SED), (c) minimum erythemal dose (MED) III, and (d) MED IV between 8:00 and 17:00 local time (LT) for all-sky, clear, partially clear, partially cloudy, and cloudy conditions observed in Santiago from 2015 to 2019.

In Santiago, when exposed to the direct sunlight between 8:00 to 17:00 LT, people with skin phototype III will receive an average of 9–10 times the minimum dose needed to cause sunburn, while a person with skin phototype IV receives seven times the dose to cause the same damage in clear conditions and six times when cloudy skies are present. The MED III and MED IV for partially clear and partially cloudy conditions were found between seven and six times, indicating that cloudy skies can minimize the UVER reaching the Earth’s surface. However, cumulative doses can exceed recommended levels even in individuals with resistant skin types or melanoprotection (III and IV).

Simply by exposing themselves to the sun from 11:00 to 13:00 LT under clear conditions in December, skin phototype III (IV) persons receive, on average, 11 (9) times more than the minimum amount of radiation to cause erythema. Even in July, they are exposed to the amount corresponding to 1 MED.

Under clear and partially clear sky conditions before 11:00 LT, accumulated daily doses of up to 1.28 kJm⁻² were observed in Santiago (Figure 5a). Considering the MEDs for skin phototypes III and IV, an individual exposed before 11:00 LT could receive approximately three or two times the minimum amount of radiation to develop erythema, respectively (Figure 5c,d). Therefore, because the safe amounts of erythemal UV doses are even exceeded during the safe hours (before 11:00 LT), it is recommended to implement sun protection as part of everyday life.

3.3. Development of Hourly and Daily Models

Observations have confirmed that UV and IG radiation are well correlated [30,61,62]. This property stems from the fact that the UV radiation component responds to atmospheric attenuation similarly to the entire solar radiation spectrum, allowing us to model the relationship between both variables by fitting simple polynomial functions through the cloud of points in a dispersion diagram of UVER versus IG. The polynomial degree (model type) depends on the shape of the experimental points' distribution in the UVER–IG dispersion diagram. For Santiago, dispersion diagrams based on hourly (Figure 6a,b) and daily (Figure 6c,d) values of UVER indicate that the best fits are given by a second-degree polynomial. Earlier studies provided similar results [35,63,64]. This occurs because UVER responds to the scattering processes differently when the intensity of solar radiation is small [34,64,65]. For instance, when zenith angles are large—mainly close to sunrise and sunset or during the winter months—the reduction in UVER is disproportionately larger than in IG due to the high optical depths produced by ozone absorption and Rayleigh scattering effects.

A visual inspection of Figure 6 indicates that the best fitting is yielded by the quadratic model $UVER = a IG^2 + b IG + c$. The coefficient c is set equal to zero to ensure that $UVER = 0$ since $IG = 0$. Table 3 shows the model coefficients (a , b) and the number of hourly and daily values of UVER. This modelling takes major features of local climate into consideration by explicitly considering the individual effects of seasons and sky conditions, as well as their combination (interactions).

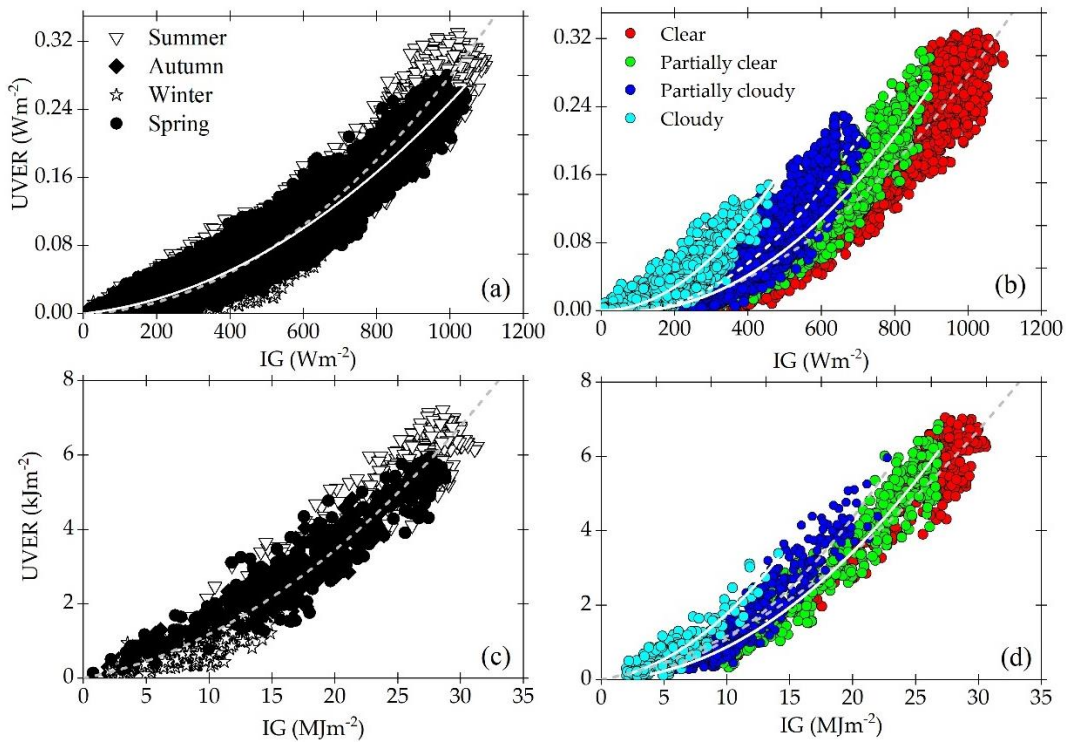


Figure 6. Dispersion diagrams of UVER versus global irradiance (IG) as a function of seasons and sky conditions for (a,b) hourly and (c,d) daily values observed in Santiago from 2015 to 2018. Second-degree polynomials obtained from least-squares fitting are indicated by dashed and continuous lines. The triangle denotes the summer, the diamond is autumn, the star represents winter, and the circle is the spring season.

Table 3. Model coefficients (a, b) for hourly and daily values of UVER for Santiago considering observations carried out from 2015 to 2018.

Models	Hourly			Daily		
	a (10 ⁻⁷) W ⁻¹ m ²	b (10 ⁻⁵)	Number of Hours	a (10 ⁻³) MJ ⁻¹ m ²	b (10 ⁻²)	Number of Days
Season						
Summer	2.8	2.1	3860	-1.0	24	344
Autumn	2.8	1.2	2307	5.5	6	338
Winter	1.9	2.9	1547	3.0	5	322
Spring	2.1	6.0	3065	2.5	13	342
Sky condition						
Cloudy	7.4	-0.7	2023	14.0	3.9	231
Partially cloudy	5.1	-6.3	2513	10.8	0.3	417
Partially clear	3.8	-4.8	1880	8.4	0.1	386
Clear	3.0	-2.3	4363	5.2	6.9	312
Interactions (Season + Sky condition)						
Summer + Cloudy	8.1	-2.8	473	-	-	-
Summer + Partially cloudy	5.0	-6.2	707	-1.4	25	37
Summer + Partially clear	3.7	-3.9	596	0.5	19	101
Summer + Clear	3.2	-1.2	2084	-2.5	28	200
Autumn + Cloudy	6.4	-0.9	382	7.1	8	60
Autumn + Partially cloudy	4.5	-4.1	503	6.3	6	93
Autumn + Partially clear	3.7	-4.1	444	8.8	-1.5	135
Autumn + Clear	3.1	-0.6	978	8.3	7	53
Winter + Cloudy	2.8	4.1	438	6.5	5.5	101
Winter + Partially cloudy	3.2	-0.5	536	9.0	0.1	165
Winter + Partially clear	3.2	-4.2	354	5.0	1.9	58
Winter + Clear	2.4	-3.7	219	-	-	-
Spring + Cloudy	8.1	-0.2	730	3.3	14	69
Spring + Partially cloudy	5.1	-6.2	767	7.4	7.4	114
Spring + Partially clear	2.9	0.5	486	9.4	-1.5	77
Spring + Clear	3.2	-3.7	1082	8.1	-0.8	83
General						
All sky conditions	2.5	-2.0	10,779	5.2	7	1346

3.4. Model Validation

The performance of the models developed in the previous section for Santiago is investigated in this section by using the measurements of UVER and IG carried out in 2019 as a validation dataset. The accuracy and precision of the models are assessed using MBE, RMSE, NRMSE, MAPE, and IA, as described in Section 2.6. The results are shown in Tables 4 and 5. When the statistical parameters MBE, RMSE, NRMSE, and MAPE are simultaneously small, they indicate a good agreement between model results and in situ measurements. Negative (Positive) MBE indicates that the model results underestimate (super-estimate) measurements. On the other hand, IA = 1 indicates a perfect model score.

3.4.1. Hourly Values

Among the hourly models (Table 4), the MBE, RMSE, NRMSE, IA, and MAPE values vary between -0.041 and 0.018 Wm^{-2} , 0.006 and 0.046 Wm^{-2} , 13.2% and 80.1% , 0.72 and 0.98 , and 12.82% and 59.58% .

The low MBE is displayed by the hourly model for autumn. The other minimal values of statistical indicators are: RMSE = 0.006 Wm^{-2} for the model Winter + Cloudy, NRMSE = 13.2% for the model Summer + Clear, and MAPE = 12.82% for the model Summer + Partially clear. Most of the models yield IA values above 0.90 , which indicates a good score for all hourly models, with exceptions of Winter + Partially clear (IA = 0.72), Winter + Partially cloudy (IA = 0.89), Winter + Cloudy (IA = 0.86), and the Spring + Clear daily model (IA = 0.83). This latter model exhibits the largest MBE (-0.041 Wm^{-2}), indicating that, for clear skies during spring, the modelled hourly values for UVER significantly underestimate the observations. In addition, the Spring + Clear and Autumn + Cloudy models show low performance according to the RMSE (0.046 Wm^{-2}) and NRMSE (80.1%) indicators, respectively. Based on the MAPE indicator, the worst results with significantly different values from their measured counterparts were presented by the Spring model.

3.4.2. Daily Values

In the case of the daily models (Table 5), the MBE, RMSE, NRMSE, IA, and MAPE values vary between -0.423 and 0.360 kJm^{-2} , 0.164 and 0.738 kJm^{-2} , 10.0% and 37.4% , 0.73 and 0.99 , and 8.48% and 26.21% , respectively.

Unlike hourly models, daily models underestimate observation during Autumn (MBE = -0.016 kJm^{-2}), Winter (MBE = -0.099 kJm^{-2}), and Spring (MBE = -0.423 kJm^{-2}), by far the largest discrepancy. The lowest MBE is displayed by the Cloudy model with -0.015 kJm^{-2} . The Summer + Partially clear model presented the lowest NRMSE and MAPE with an error below 10.0% , while the Winter + Cloudy model indicated the lowest RMSE (0.164 kJm^{-2}). The best agreement was presented by the Autumn model (IA = 0.99), followed by the General model (IA = 0.98). The worst IAs were presented by the Summer + Partially clear (IA = 0.73) and Winter + Partially cloudy (IA = 0.77) models. When the validation dataset size was smaller than 10 days, the model validation is not performed (Table 5).

Table 4. Statistical parameters of the models for hourly values of UVER in Santiago, Chile using observations carried out in 2019.

Models	MBE (Wm^{-2})	RMSE (Wm^{-2})	NRMSE (%)	IA	MAPE (%)	Number of Hours
Season						
Summer	0.001	0.024	15.8	0.98	14.07	622
Autumn	0.000	0.014	30.1	0.98	30.39	379
Winter	0.006	0.011	55.8	0.92	36.51	787
Spring	0.016	0.030	36.7	0.95	59.60	
Sky conditions						
Clear	0.001	0.025	14.1	0.96	13.67	457

Partially clear	0.008	0.021	17.6	0.97	13.48	443
Partially cloudy	0.002	0.019	34.6	0.95	24.83	631
Cloudy	0.002	0.010	74.6	0.94	41.86	
Interactions (Season + Sky conditions)						951
Summer + Clear	0.018	0.023	13.2	0.97	15.78	320
Summer + Partially clear	0.002	0.025	14.6	0.92	12.82	110
Summer + Partially cloudy	0.006	0.023	26.9	0.91	18.99	131
Summer + Cloudy	0.001	0.016	63.2	0.91	49.46	72
Autumn + Clear	0.016	0.022	21.5	0.93	34.83	71
Autumn + Partially clear	-0.001	0.013	17.4	0.98	14.46	85
Autumn + Partially cloudy	-0.002	0.014	37.2	0.95	26.91	79
Autumn + Cloudy	-0.001	0.008	80.1	0.90	42.61	144
Winter + Clear	-	-	-	-	-	-
Winter + Partially clear	-0.015	0.018	31.5	0.72	24.46	92
Winter + Partially cloudy	-0.007	0.012	35.6	0.89	25.51	228
Winter + Cloudy	-0.002	0.006	79.3	0.86	38.14	456
Spring + Clear	-0.041	0.046	25.7	0.83	22.90	118
Spring + Partially clear	-0.017	0.029	23.3	0.92	15.29	156
Spring + Partially cloudy	-0.010	0.022	35.0	0.94	26.20	152
Spring + Cloudy	-0.002	0.011	52.6	0.96	40.84	
General						259
All sky conditions	-0.021	0.032	42.9	0.95	41.18	2482

One can notice that some models with similar or slightly similar performances improve them when seasonal and sky conditions are simultaneously considered. For example, for daily values (Table 5), the Summer + Partially clear model displays MBE = -0.060 kJm⁻², MAPE = 8.48%, RMSE = 0.505 kJm⁻², and NRMSE = 10.0%, which is more accurate than the Summer (MBE = 0.360 kJm⁻², MAPE = 14.06%, RMSE = 0.651 kJm⁻², and NRMSE = 13.2%) or Partially clear (MBE = 0.095 kJm⁻², MAPE = 10.57%, RMSE = 0.586 kJm⁻², and NRMSE = 12.8%) models. The only indicator that is not improved is the IA, possibly due to the lack of data. Similar behaviour is presented by hourly values, mainly for the models: Summer + Partially clear (MBE = 0.002 kJm⁻², MAPE = 12.82%, RMSE = 0.025 Wm⁻², and NRMSE = 14.6%) and Autumn + Partially clear (MBE = -0.001 kJm⁻², MAPE = 14.46%, RMSE = 0.013 Wm⁻², and NRMSE = 17.4%), as displayed in Table 4. Although for these cases, the IA indicates an ideal model score, to confirm this improvement, a much longer time series must be considered in both cases (hourly and daily interaction models).

Table 5. Same as Table 4, but for daily values.

Conditions	MBE (kJm ⁻²)	RMSE (kJm ⁻²)	NRMSE (%)	IA	MAPE (%)	Number of Days
Season						
Summer	0.360	0.651	13.2	0.89	14.06	73
Autumn	-0.016	0.185	10.9	0.99	16.83	27
Winter	-0.099	0.210	17.2	0.92	21.72	65
Spring	-0.423	0.738	22.7	0.93	17.31	63

Sky condition						
Clear	0.097	1.024	17.7	0.20	13.15	8
Partially clear	0.095	0.586	12.8	0.94	10.57	95
Partially cloudy	-0.031	0.432	23.4	0.97	18.85	76
Cloudy	-0.015	0.334	37.4	0.92	23.21	49
Interactions (Season + Sky condition)						
Summer + Clear	-0.423	0.548	9.7	0.14	8.65	7
Summer + Partially clear	-0.060	0.505	10.0	0.73	8.48	57
Summer + Partially cloudy	-0.521	0.969	24.4	0.79	37.23	7
Summer + Cloudy	-	-	-	-	-	2
Autumn + Clear	-	-	-	-	-	-
Autumn + Partially clear	-0.100	0.272	8.6	0.96	7.44	10
Autumn + Partially cloudy	-0.146	0.209	19.6	0.93	18.56	9
Autumn + Cloudy	0.010	0.110	18.4	0.91	14.23	8
Winter + Clear	-	-	-	-	-	-
Winter + Partially clear	-	-	-	-	-	-
Winter + Partially cloudy	0.253	0.330	32.2	0.77	26.21	40
Winter + Cloudy	0.119	0.164	31.3	0.81	23.28	25
Spring + Clear	-	-	-	-	-	1
Spring + Partially clear	0.332	0.498	12.2	0.97	11.68	28
Spring + Partially cloudy	-0.041	0.465	14.9	0.94	15.46	20
Spring + Cloudy	0.282	0.439	28.2	0.88	22.42	14
General						
All sky conditions	-0.136	0.539	18.5	0.98	16.74	228

Figure 7 shows comparison examples between modelled and measured hourly (left) and daily (right) values of UVER. In most of the cases, point clusters are distributed around the diagonal line (red), and $R^2 \geq 0.91$ in all cases (Figure 7a–f). The exception is for daily values of UVER diagnosed by the Summer + Partially clear model (Figure 7d), with R^2 equal to 0.73. This values of R^2 are comparable to those reported in previous studies by [34,64,65].

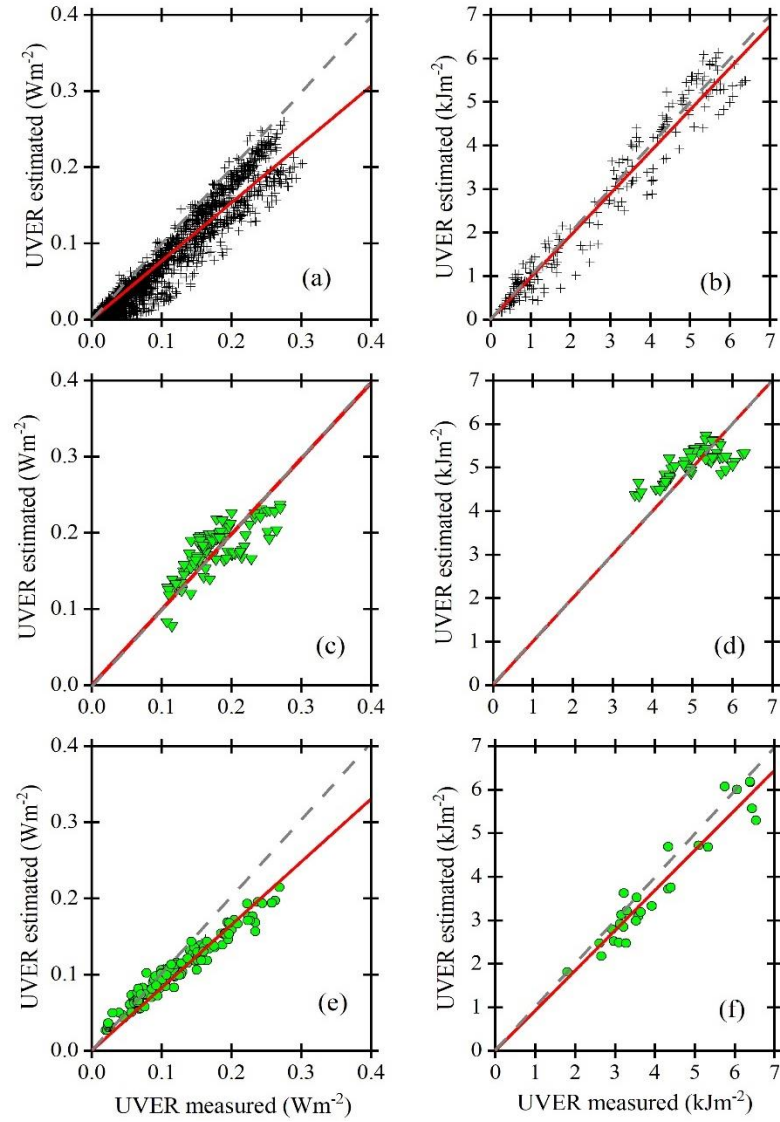


Figure 7. Comparison of the UVER estimated and measured for (left) hourly and (right) daily data in Santiago using the following models: General (a,b), Summer + Partially clear (c,d), and Spring + Partially clear (e,f). The dashed grey line indicates the 1:1 line. Red lines indicate the fitting using the least-squares regression method.

Table 6 shows the percentage (%) difference between the estimated and measured hourly and daily UVER values using the General models. The largest difference for hourly and daily models was found in Spring (−56.9–3.1%), while the lowest was found in Winter (−1.0–0.5%). The daily models showed a deviation of 15% in the Autumn and 57% in the Spring. This could be due to the combination of a low observation frequency (minimum in Autumn and Spring) and the difference between the behaviour of the atmosphere in these periods during the year used for the validation (2019) and those used for the construction of models (2015–2018). The relative difference between the estimated and measured UVER suggests that the general model for hourly values of UVER performs better than that for the daily

values. The main reason for this is that the models for hourly values were built and tested using a larger and more representative dataset compared to the model for daily values.

Table 6. Season average of the relative difference between observed (O_i) and modelled (P_i) values.

Season	$\left[\frac{1}{N} \sum_1^N \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right) \right] \times 100\%$	
	Hourly	Daily
Summer	-2.8	1.2
Autumn	-1.1	14.7
Winter	-1.0	0.5
Spring	-3.1	-56.8
Annual	-2.0	-13.6

N is the number of observed and modelled values in each season

3.5. Comparison with Other Sites

The General models developed for Santiago display a performance similar (Table 7) to that of models developed by [35] for Cyprus. The hourly and daily models presented slightly higher R^2 (0.97 and 0.98) than the Cyprus models (0.95 and 0.96). Even though the model coefficients (a, b) differ, this behaviour is an indication that climate and environmental features combined affect the behaviour of UVER similarly in both places. Indeed, the climates of Santiago and Cyprus are quite similar, with rainy winters and dry summers, as well as variations in the ozone whose effect on UV irradiance at the surface is most pronounced at high latitudes rather than at middle latitudes [66]. The empirical models can be applied to obtain and assess the UVER exposure of populations in other areas with climates similar to that of Santiago de Chile.

Table 7. Regression equation, coefficients, and R^2 for annual empirical models of hourly and daily values. Observations were carried out in Santiago during 2015–2018.

Site	Latitude, Longitude	Land Use	Altitude (m asl)	Model	Coefficients		R^2
					a	b	
Santiago, Chile	33°30' S, 70°42' W	urban	520	Hourly	2.5×10^{-7}	-2.0×10^{-5}	0.97
				Daily	5.2×10^{-3}	7.0×10^{-2}	0.98
Larnaca, Cyprus #	34°87' N, 33°63' E	rural	1	Hourly	1.0×10^{-7}	17.0×10^{-5}	0.96
				Daily	2.6×10^{-3}	5.9×10^{-2}	0.96
Athalasa, Cyprus #	35°15' N, 33°40' E	semi-rural	165	Hourly	0.1×10^{-7}	1.6×10^{-5}	0.95
				Daily	3.6×10^{-3}	8.3×10^{-2}	0.96

Ref. [32]; a (10^{-7}) in $W^{-1}m^2$; b (10^{-3}) in $MJ^{-1}m^2$.

4. Conclusions

This study is the first to address long-term in situ measurements of UVER in Santiago de Chile, Chile's most populated city, to assess the risk of the population to suffering skin damage by using four erythema indices: UVI, SED, MEDs, and t_{ery} .

Based on the analysis performed here, which takes into consideration the effect of climate features—mainly sky conditions—on the seasonal variation of UVER in an urban area, it was concluded that the population is exposed to a high risk of developing sunburn and/or other sun-related skin damage in 46% of days with UVI ≤ 5 . This occurs under cloudy conditions and before 11:00 LT during spring, summer, and fall, when the SEDs, MEDs, and t_{ery} indicate that UVER values are high enough to cause sunburn, even though the UVI indicates that it is safe.

When UVI levels are low, melano-protected individuals (skin types III and IV) can be exposed to the sun for a more prolonged exposure time (two or three hours, respectively). However, recent studies by [52,53] showed that even a UVI of less than 2 can cause damaging sunburns. Indeed, the present study indicates that cloudy skies minimize the UVER intensity at the surface, but cumulative doses exceed recommended levels. Therefore, as part of a broader and integrated strategy for sun protection in Santiago is commended to include, additionally to UVI, the erythema indexes t_{ery} , SED and MEDs, regardless sky condition and season of the year.

For urban areas not covered by the Chilean solar network, hourly and daily values of UVER can be estimated by empirical models. The empirical models developed in this work, which estimate hourly and daily values of UVER in terms of IG by taking sky conditions into consideration, display a very good performance for the climate conditions of Santiago de Chile. Thus, these models can be used as part of a strategy to extend the analysis carried out in Santiago for other sites or years depending on the availability of IG observations, as long as the climate is similar. In this sense, the expansion of hourly and daily UVER values to other sites would be beneficial for improving the understanding of solar climatology, photobiology, biophysical studies, and material degradation, as well as in other scientific fields, such as water treatment in solar disinfection, areas where Chile is most in need.

Author Contributions: Conceptualization, L.G.-R. and L.R.-L.; methodology, L.G.-R., L.R.-L., J.R. and A.P.d.O.; formal analysis, L.G.-R., L.R.-L., A.C.B., D.C. and A.P.d.O.; investigation, L.G.-R., A.C.B. and L.R.-L.; resources, L.G.-R.; data curation, L.G.-R. and J.R.; software, L.G.-R.; validation, L.G.-R., L.R.-L., J.R. and A.P.d.O.; writing—original draft preparation, L.G.-R., A.C.B., D.C.; writing—review and editing, L.G.-R., L.R.-L. and A.P.d.O.; supervision, A.P.d.O.; funding acquisition, L.G.-R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by "Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile"

(ANID) grant number [21170226] And the APC was funded by ANID.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Derived data supporting the findings of this study are available from the corresponding author on request.

Acknowledgments: The authors thank Ernesto Gramsch for the effort to keep the UV radiation monitoring site online. L. G.-R. wishes to thank the Chilean National Development and Innovation Agency (ANID), Chile for the Ph. D. Grants (21170226), the faculty and staff members of the University of Concepcion, Micrometeorology Laboratory of IAG-USP, and Yailen García and Jongel Durán, who helped with the development of this project. The second author acknowledges the scholarship provided by CNPq (Grant number 304786/2018-7).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Diffey, B.L. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Phys. Med. Biol.* **1991**, *36*, 299–328.
2. Andradý, A.; Hamid, S.; Hu, X.; Torikai, A. Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* **1998**, *46*, 96–103, doi:10.1016/s1011-1344(98)00188-2.
3. Caldwell, M.M.; Björn, L.; Bornman, J.F.; Flint, S.; Kulandaivelu, G.; Teramura, A.; Tevini, M. Effects of increased solar ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* **1998**, *46*, 40–52.
4. Ichihashi, M.; Ueda, M.; Budiayanto, A.; Bitó, T.; Oka, M.; Fukunaga, M.; Tsuru, K.; Horikawa, T. UV-induced skin damage. *Toxicology* **2003**, *189*, 21–39, doi:10.1016/s0300-483x(03)00150-1.
5. Lucas, R.; McMichael, T.; Smith, W.; Armstrong, B. *Solar Ultraviolet Radiation: Global Burden of Disease from Solar Ultraviolet Radiation*; Annette Prüss-Üstün, H.Z., Colin Mathers, M.R., Eds.; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2006; Volume 55; ISBN 924 159440 3.
6. Häder, D.-P.; Kumar, H.D.; Smith, R.C.; Worrest, R.C. Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochem. Photobiol. Sci.* **2007**, *6*, 267–285, doi:10.1039/b700020k.
7. Orient, J.M. Radiation and Human Health. *JAMA* **1982**, *248*, 1179–1180, doi:10.1001/jama.1982.03330100019015.
8. Häder, D.-P.; Williamson, C.E.; Wängberg, S.-Åke; Rautio, M.; Rose, K.C.; Gao, K.; Helbling, E.W.; Sinha, R.P.; Worrest, R. Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors. *Photochem. Photobiol. Sci.* **2014**, *14*, 108–126, doi:10.1039/c4pp90035a.
9. Rivas, M.; Rojas E.E.; Méndez C.J.; Contreras A.G. Dosis Eritémicas, Sobrexposición a la Radiación Solar Ultravioleta y Su Relación Con el Cáncer de Piel en Arica, Chile. *Interciencia* **2014**, *39*, 506–510.
10. Correa, M.D.P.; Godin-Beekmann, S.; Haeffelin, M.; Bekki, S.; Saiag, P.; Badosa, J.; Jégou, F.; Pazmiño, A.; Mahé, E. Projected changes in clear-sky erythemal and vitamin D effective UV doses for Europe over the period 2006 to 2100. *Photochem. Photobiol. Sci.* **2013**, *12*, 1053, doi:10.1039/c3pp50024a.
11. Rivas, M.; Rojas, E.; Araya, M.C.; Calaf, G.M. Ultraviolet light exposure, skin cancer risk and vitamin D production. *Oncol. Lett.* **2015**, *10*, 2259–2264, doi:10.3892/ol.2015.3519.
12. Correa, M.D.P.; Yamamoto, A.L.C.; Moraes, G.R.; Godin-Beekmann, S.; Mahé, E. Changes in the total ozone content over the period 2006 to 2100 and the effects on the erythemal and vitamin D effective UV doses for South America and Antarctica. *Photochem. Photobiol. Sci.* **2019**, *18*, 2931–2941, doi:10.1039/c9pp00276f.
13. Delcourt, C.; Boniol, M.; Carrière, I.; Delyfer, M.; Rougier, M.-B.; Le Goff, M.; Dartigues, J.-F.; Barberger-Gateau, P.; Korobelnik, J.-F.; Cougnard-Grégoire, A.; et al. Lifetime Exposure to Ambient Ultraviolet Radiation and the Risk for Cataract Extraction and Age-Related Macular Degeneration: The Alienor Study. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* **2014**, *55*, 7619–27, doi:10.1167/iovs.14-14471.
14. Narayanan, D.L.; Saladi, R.N.; Fox, J.L. Review: Ultraviolet radiation and skin cancer. *Int. J. Dermatol.* **2010**, *49*, 978–986, doi:10.1111/j.1365-4632.2010.04474.x.
15. Rivas, M.; Rojas, E.; Calaf, G.M. Skin cancer risk affected by ultraviolet solar irradiance in Arica, Chile. *Oncol. Lett.* **2014**, *7*, 483–486, doi:10.3892/ol.2013.1698.

16. McKinlay, A.F.; Diffey, B.L. A Reference Action Spectrum for Ultraviolet Induced Erythema in Human Skin. *CIE J.* **1987**, *6*, 17–22.
17. Solano, F. Photoprotection and Skin Pigmentation: Melanin-Related Molecules and Some Other New Agents Obtained from Natural Sources. *Molecules* **2020**, *25*, 1537, doi:10.3390/molecules25071537.
18. Brenner, M.; Hearing, V.J. The Protective Role of Melanin Against UV Damage in Human Skin. *Photochem. Photobiol.* **2007**, *84*, 539–549, doi:10.1111/j.1751-1097.2007.00226.x.
19. Fitzpatrick, T.B. The Validity and Practicality of Sun-Reactive Skin Types I Through VI. *Arch. Dermatol.* **1988**, *124*, 869–871, doi:10.1001/archderm.1988.01670060015008.
20. World Health Organization; World Meteorological Organization; United Nations Environment Programm; International Commission on Non-Ionizing Radiation Protectio. *Global Solar UV Index : A practical Guide*; 2002; Volume 32. Available online: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42459>, accessed on 1 March 2020.
21. Utrillas, M.; Marín, M.J.; Esteve, A.; Salazar, G.; Suarez, H.; Castillo, J.; Martínez-Lozano, J. UVER and UV index at high altitude in Northwestern Argentina. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* **2016**, *163*, 290–295, doi:10.1016/j.jphotobiol.2016.08.012.
22. Sabatini-Ugarte, N.; Molgó, M.; Vial, G. Melanoma en Chile ¿Cuál es nuestra realidad? *Rev. Med. Clin. Condes* **2018**, *29*, 468–476, doi:10.1016/j.rmcl.2018.06.006.
23. Calaf, G.M.; Rivas, M.; Araya, M.C.; Caba, F.; Rojas, E. Ultraviolet light exposure influences skin cancer in association with latitude. *Oncol. Rep.* **2011**, *25*, 1153–1159, doi:10.3892/or.2011.1164.
24. Rivas, M.; Rojas, E.; Calaf, G.M.; Barberán, M.; Liberman, C.; Correa, M.D.P. Association between non-melanoma and melanoma skin cancer rates, vitamin D and latitude. *Oncol. Lett.* **2017**, *13*, 3787–3792, doi:10.3892/ol.2017.5898.
25. Rivas, M.; Calaf, G.M.; Laroze, D.; Rojas, E.; Mendez, J.; Honeyman, J.; Araya, M.C. Solar ultraviolet A radiation and nonmelanoma skin cancer in Arica, Chile. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* **2020**, *212*, 112047, doi:10.1016/j.jphotobiol.2020.112047.
26. Ministerio de Energía "Solar explorer", Available at <http://solar.minenergia.cl/espectros>, accessed on 1 January 2020.
27. Dirección Meteorológica de Chile, DMC, Available at <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>, accessed on 1 January 2020.
28. Universidad de Santiago de Chile, USACH Available at <http://ambiente.usach.cl/uv/index.html>, accessed on 1 January 2020.
29. Zemelman, V.; Beck, V.; Petra, A.; Orlando, A.; Valenzuela, C.Y. Dimorfismo sexual en la pigmentación de la piel, color de ojos y pelo y presencia de pecas en adolescentes chilenos en dos estratos socioeconómicos. *Rev. Med. Chile* **2002**, *130*, 879–884.
30. Escobedo, J.F.; Gomes, E.N.; Oliveira, A.P.; Soares, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Appl. Energy* **2009**, *86*, 299–309, doi:10.1016/j.apenergy.2008.04.013.
31. Escobedo, J.F.; Gomes, E.N.; Oliveira, A.P.; Soares, J. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renew. Energy* **2011**, *36*, 169–178, doi:10.1016/j.renene.2010.06.018.
32. Terezhchuk, K.A.; Rochon, Y.J.; McLinden, C.A.; Vaillancourt, P.A. Optimizing UV Index determination from broadband irradiances. *Geosci. Model Dev.* **2018**, *11*, 1093–1113, doi:10.5194/gmd-11-1093-2018.
33. Robaa, S.M. On the estimation of UV-B radiation over Egypt. *Idojaras* **2008**, *112*, 45–60.
34. Kudish, A.; Evseev, E. Statistical relationships between solar UVB and UVA radiation and global radiation measurements at two sites in Israel. *Int. J. Clim.* **2000**, *20*, 759–770.
35. Kalogirou, S.; Pashiardis, S.; Pashiardi, A. Statistical analysis and inter-comparison of erythemal solar radiation for Athalassa and Larnaca, Cyprus. *Renew. Energy* **2017**, *111*, 580–597, doi:10.1016/j.renene.2017.04.043.

36. Utrillas, M.P.; Marín, M.J.; Esteve, A.R.; Salazar, G.A.; Suárez, H.; Gandía, S.; Lozano, J.A.M. Relationship between erythemal UV and broadband solar irradiation at high altitude in Northwestern Argentina. *Energy* **2018**, *162*, 136–147, doi:10.1016/j.energy.2018.08.021.
37. González-Rodríguez, L.; Rosas, J.; de Oliveira, A.P.; Rodríguez, L.; Contreras, D.; Baeza, C. Modeling of hourly and daily values of erythemal ultraviolet radiation in Santiago de Chile City. In Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019, Santiago, Chile, 2019; pp. 2213–2222. Conference date (4-7/november)
38. Instituto Nacional de Estadísticas, INE, Available at <http://www.ine.cl>, accessed on 15 January 2020.
39. Gramsch, E.; Reyes, F.; Vásquez, Y.; Oyola, P.; Rubio, M.A. Prevalence of Freshly Generated Particles during Pollution Episodes in Santiago de Chile. *Aerosol Air Qual. Res.* **2016**, *16*, 2172–2185, doi:10.4209/aaqr.2015.12.0691.
40. Rappenglück, B.; Oyola, P.; Olaeta, I.; Fabian, P. The Evolution of Photochemical Smog in the Metropolitan Area of Santiago de Chile. *J. Appl. Meteorol.* **2000**, *39*, 275–290, doi:10.1175/1520-0450(2000)0392.0.co;2.
41. Falvey, M.; Garreaud, R.D. Wintertime Precipitation Episodes in Central Chile: Associated Meteorological Conditions and Orographic Influences. *J. Hydrometeorol.* **2007**, *8*, 171–193, doi:10.1175/jhm562.1.
42. Ministerio de Bienes Nacionales IDE Chile, infraestructura de datos Geoespaciales, Available at <http://www.ide.cl/> accessed on 30 February 2020.
43. Liu, B.Y.; Jordan, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Sol. Energy* **1960**, *4*, 1–19, doi:10.1016/0038-092x(60)90062-1.
44. Reda, I.; Andreas, A. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Sol. Energy* **2004**, *76*, 577–589, doi:10.1016/j.solener.2003.12.003.
45. Iqbal, M. *An Introduction to Solar Radiation*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 1983.
46. Udo, S. Sky conditions at Ilorin as characterized by clearness index and relative sunshine. *Sol. Energy* **2000**, *69*, 45–53, doi:10.1016/s0038-092x(00)00008-6.
47. CIE; WMO. *Rationalizing Nomenclature for UV Doses and Effects on Humans*; Vienna, Austria, 2014. <http://cie.co.at/publications/rationalizing-nomenclature-uv-doses-and-effects-humans>, accessed on 2 March 2020.
48. Fioletov, V.E.; Kerr, J.B.; Fergusson, A. The UV Index: Definition, Distribution and Factors Affecting It. *Can. J. Public Health* **2010**, *101*, 15–19, doi:10.1007/bf03405303.
49. Zemelman, V.; Alvarado, C.; Valenzuela, V.B.P. Assessment of skin type, eye and hair color, freckles tendency in Chilean adolescents. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* **1990**, *12*, 321.
50. Furlan, C.; De Oliveira, A.P.; Soares, J.; Codato, G.; Escobedo, J.F. The role of clouds in improving the regression model for hourly values of diffuse solar radiation. *Appl. Energy* **2012**, *92*, 240–254, doi:10.1016/j.apenergy.2011.10.032.
51. Sharma, B.K. *Environmental Chemistry*; Publisher Krishna Prakashan Media; Delhi, India, 2014; ISBN 8182831199, accessed on 15 February 2020
52. Cordero, R.; Seckmeyer, G.; Damiani, A.; Jorquera, J.; Carrasco, J.F.; Muñoz, R.C.; Da Silva, L.; Labbé, F.; Laroze, D. Aerosol effects on the UV irradiance in Santiago de Chile. *Atmospheric Res.* **2014**, *149*, 282–291, doi:10.1016/j.atmosres.2014.07.002.
53. Silva, S.C.; Ipiña, A.; Damiani, A.; Cordero, R.R.; Piacentini, R.D. UV index values and trends in Santiago, Chile (33.5°S) based on ground and satellite data. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* **2012**, *115*, 73–84.
54. Damiani, A.; Cabrera, S.; Muñoz, R.C.; Cordero, R.; Labbé, F. Satellite-derived UV irradiance for a region with complex morphology and meteorology: Comparison against ground measurements in Santiago de Chile. *Int. J. Remote. Sens.* **2013**, *34*, 5812–5833, doi:10.1080/01431161.2013.796101.
55. Rivas, M., Rojas, E., Cortés, J., & Santander, E.. Efecto de la altura en la radiación solar ultravioleta en Arica norte de Chile. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá*, 2002, *10*, 59-62.

56. McKenzie, R.; Liley, B.; Björn, L.O. UV Radiation: Balancing Risks and Benefits. *Photochem. Photobiol.* **2009**, *85*, 88–98, doi:10.1111/j.1751-1097.2008.00400.x.
57. McKenzie, R.; Lucas, R.M. Reassessing Impacts of Extended Daily Exposure to Low Level Solar UV Radiation. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 1–5, doi:10.1038/s41598-018-32056-3.
58. Lehmann, M.; Pfahlberg, A.B.; Sandmann, H.; Uter, W.; Gefeller, O. Public Health Messages Associated with Low UV Index Values Need Reconsideration. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, *16*, 2067, doi:10.3390/ijerph16122067.
59. Ou-Yang, H.; Jiang, L.I.; Meyer, K.; Wang, S.Q.; Farberg, A.S.; Rigel, D.S. Sun Protection by Beach Umbrella vs Sunscreen With a High Sun Protection Factor: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Dermatol.* **2017**, *153*, 304–308, doi:10.1001/jamadermatol.2016.4922.
60. Vimercati, L.; De Maria, L.; Caputi, A.; Cannone, E.S.S.; Mansi, F.; Cavone, D.; Romita, P.; Argenziano, G.; Di Stefani, A.; Parodi, A.; et al. Non-Melanoma Skin Cancer in Outdoor Workers: A Study on Actinic Keratosis in Italian Navy Personnel. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 2321, doi:10.3390/ijerph17072321.
61. Cañada, J.; Pedros, G.; Bosca, J. Relationships between UV (0.290–0.385 μm) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy* **2003**, *28*, 199–217, doi:10.1016/s0360-5442(02)00111-1.
62. Gandia, S.; Utrillas, M.P.; Gómez-Amo, J.L.; Esteve, A.R.; Estellés, V.; Pedrós, R.; Nuñez, J.A.; Lozano, J.A.M. Relationship between UVB and broadband solar radiation in Spain. *Int. J. Clim.* **2014**, *35*, 1761–1771, doi:10.1002/joc.4088.
63. Adam, M.E.-N. Determination of daily total ultraviolet-B in a subtropical region (Upper Egypt): An empirical approach. *Atmos. Res.* **2015**, *153*, 1–9, doi:10.1016/j.atmosres.2014.07.025.
64. Jacovides, C.; Tymvios, F.; Asimakopoulos, D.; Kaltsounides, N.; Theoharatos, G.; Tsitouri, M. Solar global UVB (280–315nm) and UVA (315–380nm) radiant fluxes and their relationships with broadband global radiant flux at an eastern Mediterranean site. *Agric. For. Meteorol.* **2009**, *149*, 1188–1200, doi:10.1016/j.agrformet.2009.02.009.
65. Foyo-Moreno, I.; Alados, I.; Alados-Arboledas, L. Adaptation of an empirical model for erythemal ultraviolet irradiance. *Ann. Geophys.* **2007**, *25*, 1499–1508, doi:10.5194/angeo-25-1499-2007.
66. U.N.E.P. *Environmental Effects and Interactions of Stratospheric Ozone Depletion, UV Radiation, and Climate Change*; 2018. <https://ozone.unep.org/science/assessment/eeap>, accessed on 8 August 2020

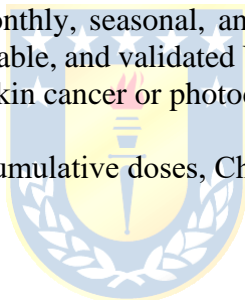
4.3 Aplicaciones

4.3.1 Simple method for spatio-temporal analysis of UVER exposure: A case study for Chile's Mediterranean region.

Abstract: Solar ultraviolet radiation (UVR) plays an important role in environmental and occupational health. Although the importance of UVR and its spectral bands is well established, the characterization of spatio-temporal distributions is far from complete. Here, we produced ultraviolet erythemal radiation (UVER) doses for the Mediterranean Region of Chile (MRCh) using a simple model based on global solar observations at 57 radiometric stations during the 2019 year. The modeled doses are validated using ground-based measurements in three sites. The spatio-temporal distributions of UVER exposure for MRCh on a monthly and annual scale map were analyzed. The evolution of standard erythemal dose/minimal erythemal dose SED/MED for skin phototypes I-IV through the mean year (2016-2019) in units of energy was calculated. The UVER doses obtained revealed that are similar for all MRCh received high doses over the year ($UVER \geq 2.6 \text{ kJm}^{-2}$). The UVER doses showed a good agreement, high correlation, low bias, and root-mean-square error. Annual standard cumulative doses over an average year range from 14,149 to 10,146 SED. The most common skin type in Chile receives an annual cumulative dose between 4,073 MED_{III} and 3,161 MED_{IV} in El Colorado to 2,926 MED_{III} and 2,276 MED_{IV} in the Valparaiso coast. This study provides for the first time monthly, seasonal, and annual maps of UVER exposure across MRCh. It introduces a simple, novel, available, and validated UVER climatology. The results can be used in further studies of the role of UVER in skin cancer or photochemical processes.

Keywords: UVER, UVER maps, annual cumulative doses, Chile's Mediterranean

Manuscrito enviado a: *ENERGY*



A simple method for spatio-temporal analysis of UVER exposure: Case study for Chile's Mediterranean region

Lisdelys González-Rodríguez^{1*}

¹Engineering Faculty, University of Concepcion, Chile.

Highlight

- The first monthly, seasonal, and annual maps of UVER exposure across Mediterranean Region of Chile.
- Estimation of the annual cumulative doses for the most common skin type in Mediterranean Region of Chile during an average year (2015-2019).
- The model-derived doses showed a good agreement, high correlation, low bias, and root-mean-square error.

Abstract

Solar ultraviolet radiation (UVR) plays an important role in environmental and occupational health. Although the importance of UVR and its spectral bands is well established, the characterization of spatio-temporal distributions is far from complete. Here, we produced ultraviolet erythematous radiation (UVER) doses for the Mediterranean Region of Chile (MRCh) using a simple model based on global solar observations at 57 radiometric stations during the 2019 year. The modeled doses are validated using ground-based measurements in three sites. The spatio-temporal distributions of UVER exposure for MRCh on a monthly and annual scale map were analyzed. The evolution of standard erythematous dose/minimal erythematous dose SED/MED for skin phototypes I-IV through the mean year (2015-2020) in units of energy was calculated. The UVER doses obtained revealed that are similar for all MRCh received high doses over the mean year ($UVER \geq 2.6 \text{ kJm}^{-2}$). The UVER estimated doses showed a good agreement, high correlation, low bias, and root-mean-square error. Annual standard cumulative doses over an average year range from 14,149 to 10,146 SED. The most common skin type in Chile receives an annual cumulative dose between 4,073 MED_{III} and 3,161 MED_{IV} in El Colorado to 2,926 MED_{III} and 2,276 MED_{IV} in the Valparaiso coast. This study provides for the first time monthly, seasonal, and annual maps of UVER exposure across MRCh. It introduces a simple, novel, available, and validated UVER climatology. The results can be used by decision-makers in skin cancer studies or photochemical processes.

Keywords: UVER, UVER maps, annual cumulative doses, Mediterranean Region of Chile

1. Introduction

One of the most recognized atmospheric changes during the last decades has been the thinning of the stratospheric ozone layer (Bernhard et al., 2020). The recent Scientific Assessment of Ozone Depletion showed that the ozone layer in parts of the stratosphere has recovered at a rate of 1-3% per decade since 2000 (WHO, 2018). This increase may result in a reduction of the adverse effects of UV radiation (UVR, 200-400 nm) overexposure in southern latitudes in spring and summer. However, after the unusually small

and short-lived ozone hole in 2019, - ~10 million km² - (Scambos and Stammerjohn, 2020) was registered a rather large one again in 2020. One of the largest and deepest holes since the ozone layer monitoring began 40 years ago (WHO, 2020) and UVR remains among the most dangerous levels in the last years (Parra et al., 2019). Further factors affecting UVR levels are Sun-Earth distance, clouds, total column ozone, albedo, aerosols, latitude, time of day, the season of the year, and altitude (Rivas et al., 2011) Singh and Singh, 2004; McKenzie et al., 2006; Jacovides et al., 2009; Cordero et al., 2014; Cordero et al., 2016; Utrillas et al., 2018).

UVR has positive effects including disinfection/sterilization (Sagripanti and Lytle, 2020) or the production of vitamin D by our bodies (McKenzie et al., 2009). This production is needed for the bones, muscles, and immune system. The negative effects of UVR including enhancement of photochemical pollutants such as tropospheric ozone (González-Rodríguez et al., 2021b), sunburn, photoaging, or skin cancer (Serrano et al., 2013), (Vimercati et al., 2020), (de Troya Martín et al., 2020). One study, in particular, found that UVR exposure is responsible for 80 percent of visible facial aging signs (Flament et al., 2013).

To assess the health risks from UVR exposure a weighted function related to the occurrence of skin erythema has been developed. This effectiveness function is known as the “action spectrum” for the photobiological effect (CIE and WMO., 2014). When an action spectrum is used as a weighting function applied to the spectral irradiance of a light source, the result is the ultraviolet erythema radiation (UVER) of that source for photobiological effect and is “spectrally weighted”. Therefore, UVER is used to determine safety limits for UVR exposure in occupational settings. The erythema ultraviolet radiation derived other erythema indexes such as UV index (UVI), minimal erythema doses (MED), and standard erythema doses (SED). Mainly, UVI reports the instantaneous sunburning of UVER but not supplies information about the risks of sun exposure. In this sense, the MED/SED supplement the sunburn exposure risk study.

In this way, the UVER is the most common occupational risk for outdoor workers (de Troya Martín et al., 2020; Modenese et al., 2018). Occupational and recreational risk related to UVER depends on skin phototype which is classified in types according to its sunburn susceptibility (Fitzpatrick, 1988). Ranging from Type I, characterized by persons (with fair skin, light eyes, and hair) who always suffer skin burns without sun protection and have a higher risk of developing skin cancer, to Type VI, represented by persons (with dark skin and hair) who never suffer skin burn. But, although those with darker skin are less likely to get sunburn or skin cancer, they are also exposed to cumulative negative effects of UVER on the eyes (Behar-Cohen et al., 2014) and the immune system (Riordan et al., 1990), (Modenese et al., 2018).

The World Health Organization (WHO) has estimated that excessive solar UVER exposure annually causes 60,000 premature deaths worldwide (Lucas et al., 2006). A study conducted during the 1997-2016 years by the Department of Health Statistics and Information, Chile (DEIS, <https://deis.minsal.cl/>) showed a slight upward trend in the death rate from a malignant melanoma of the skin at the national level (MMA, 2020). In northern Chile, the nonmelanoma skin cancer (NMSC) rate per 100,000 inhabitants is higher in the country. However, in the center of the country, 3 regions (Valparaíso, Santiago, and Maule) showed an increase in the mortality rate for malignant melanomas of the skin during the period 2000-2016 (MMA, 2020). Ñuble region has no records and therefore does not include results in the study.

There are three primary sources of UVER irradiance data, ground-based measurements, radiative transfer models, and remote sensing (Koepke et al., 1998, Palancar and Toselli, 2004), Jacovides et al., 2009, Janjai et al., 2010, Antón et al., 2012, Damiani et al., 2014, Palancar et al., 2017, Zhang et al., 2019). UVER models based on the numerical solution of the radiative transfer equations are difficult to use because they require details of the pressure, temperature, and density of the gases at different layers of the atmosphere. Remote sensing is trending towards use, but estimates for this spectral band contain significant errors

(Janjai et al., 2010, Damiani et al., 2014, Zhang et al., 2019). Ground-based UVER measurements provide the accurate determination of local UVER intensity; however, these measurements are spatially sparse. In Chile, only 28 stations have measured long-term UVER, which significantly restricts its generalization. Alternatively, the empirical model is a simple method for produce UVER datasets (Ogunjobi and Kim, 2004, Cañada et al., 2007, Adam and Ahmed, 2016, González-Rodríguez et al., 2021a). Recently, has been produced climatological maps of the surface UVR for all-sky conditions (Cordero et al., 2018), and the tool "Solar Explorer" (Chilean Ministry of Energy, 2021). However, these estimates are grouped towards the north of Chile. Leaving out most of the Chilean territory, including MRCh where the largest population is concentrated and receives high UVER values. Therefore, since the available data on UVER exposure is spatially and temporally limited in Chile, efforts should be made in this direction. In a previous publication (González-Rodríguez et al., 2021a), the authors developed quadratic correlations for hourly UVER radiation from global irradiance (IG) data. But previous validation doesn't employ data collected in other latitudes/altitudes differ of MRCh to give a universal character to the models. We notice that IG data is available as standard accuracy data at a large number of stations (683) across Chilean territory, particularly in MRCh (~199) (DGA, 2016). Therefore, if the empirical models developed in (González-Rodríguez et al., 2021a) provide accurate UVER radiation data, then we know the spatio-temporal sunburn risk maps for MRCh. In this way, this study is the second step to generate reliable information on typical distributions of UVER radiation, spatial-temporal exposure variability to a potential risk of sunburn in MRCh region population.

The aims of the study are, (i) analyze the daily UVER doses in MRCh during the mean year (2015-2020), (ii) estimate the annual standard/minimal accumulated doses (SED/MED) for different skin phototypes during the mean year, (iii) obtain and validate daily UVER doses for MRCh depending on the availability of IG observations for the 2019 year, and finally (iv) generate maps of UVER exposure for the 2019 year to demonstrating the spatial pattern of potential hazards for human's health. In this way, public health stakeholders or people concerned about sun exposure will be able to know the amount of UVER falling on each site each month, which is an important step in helping to reduce the risk of sunburn or skin cancer. These results can be used in the analysis of the role of UVER in skin cancer studies or the photochemical process.

2 Methods

2.1 Topographic and climate of the studied region.

The sites used in this study were selected because they cover latitudinal and altitudinal gradients of MRCh. The study area (Fig. 1, Table 1) covered from 32°32' to 37°03' S, occupies mainly the dryland sectors, from the river Petorca (32°S), bordering on the arid Mediterranean region, to the river Laja (37°S), bordering on the per humid region (DGA, 2016). According to the 2017 Census (<https://www.ine.cl/>), is home to a majority of the Chilean population. The relief of this region corresponds to three units from east to west: the Andes Mountains, the central valley and the Coastal Mountains (Fig. 1b). Including the regions of Valparaíso, Santiago metropolitano, Bernardo O'Higgins, Maule and Ñuble. Following Köppen-Geiger's classification of climate zones (Fig. 1c) the predominated one is the Mediterranean climate with warm summer (Csb), arid-semiarid, and clear skies. According to average data obtained from the Center for Climate and Resilience Research (CR2, <http://www.cr2.cl/>), the mean temperature ranged from 18.8°C in the warmest month (January) to 7°C in the coldest month (July), while the average annual temperature is 12.7°C. MRCh features a mean annual rainfall ranging from 100-500 mm in the central valley

concentrated in the austral winter (June–August), (Viale and Garreaud, 2015). With a prolonged dry season, of 7 to 8 months with high global solar radiation (González-Rodríguez et al., 2017), low relative humidity, and high temperatures from approximately September to April. The region is also characterized by many sunny days throughout the year. The shapefiles and topographic profiles were obtained from the Ministry of National Resources, Geospatial Data Infrastructure (IDE, <http://www.ide.cl/>).

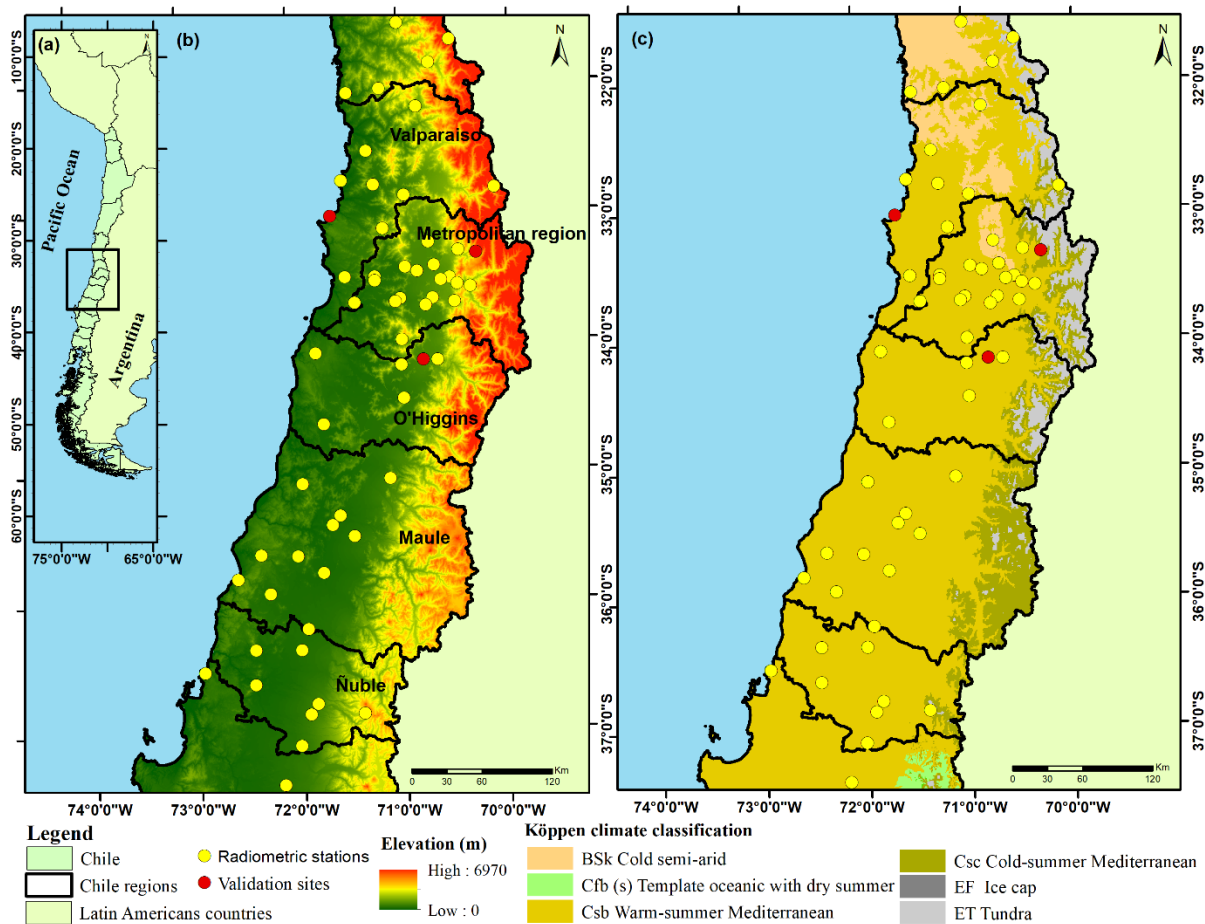


Figure 1. (a) Location of the study area in Chile, (b) spatial distribution of the radiometric stations in central Chile with their topographic profile, and (c) classification Köppen-Geiger climate zones for the study area.

2.3 Ground-based and satellite measurements.

We obtained UVER data (2015-2020) from the National Weather Service (DMC, <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>). Hourly series of global radiation (IG) during the 2019 year was obtained from the National Institute of Agricultural Research (INIA, <https://agrometeorologia.cl/>). To carry out a spatio-temporal analysis across MRCh the General model developed by (González-Rodríguez et al., 2021a) was used. Obtaining UVER doses in Santiago city from ground-based IG measurements during the 2019 year. The ground-based IG measurements were analyzed to develop a quality control analysis following criterion from the Baseline Surface Radiation Network (BSRN) (Heimo et al., 1993),

(Zo et al., 2017). Only radiometric stations with long-term series of 5 years (2015-2019) of IG data were considered. Under this criterion 57 stations were selected in MRCh, with 8 stations of Valparaiso, 19 of Metropolitan, 6 of O'Higgins, 10 of Maule, and 7 of Ñuble regions. Including additional radiometric stations in nearby regions, e.g., 5 for Coquimbo and 2 stations of Bio Bio region. The selected IG monitoring stations are shown in (Table S1).

The frequency of occurrence of clouds (OC) along the region is estimated by using geostationary satellite CLOUDSAT and CALYPSO. OC was estimated as the ratio of the number of cloudy bins to the total bins scanned by CLOUDSAT and CALYPSO (<http://www.cloudsat.cira.colostate.edu/>). The cloud mask of radar or lidar from the product was employed for the computations (Hagihara et al., 2010). The inclusion of both instruments improve the detection of clouds due to the radar does not observe well thin clouds whereas lidar can detect optically thin clouds. Daily averaged total ozone column (TOC) in Dobson units (DU) data gridded at 0.25 x 0.25 degrees were obtained from the OMI/OMPS Ozone Time Series Data website (<http://toms.gsfc.nasa.gov>). TOC and OC values are obtained to analyze their influence on the UVER.

2.4 Annual accumulated doses

As mentioned before, UVER can be used to estimate other widely used erythema indexes, such as the standard/minimum erythemal doses (SED/MED) (Utrillas et al., 2016, Bilbao and de Miguel, 2020). Different authors suggested how sun exposure damage depends on cumulative daily doses (SED/MED) and not only on UVI function (Marín et al., 2005), (González-Rodríguez et al., 2021a). A MED is defined as the effective dose of UVER that causes a perceptible reddening of human skin. Depend on the variable nature of the skin's sensitivity to UVER exposure. The sensitivity of the skin to UVER exposure was classified following Fitzpatrick classification (Fitzpatrick, 1988). For the most sensitive skin types (phototype I), 1 MED was approximately 200 Jm^{-2} (weighted by the erythema action spectrum (CIE and WMO., 2014), while for resistant skins, a value of 4 was approximately 450 Jm^{-2} . In the case of SED, that not a function of skin type, corresponds to 100 Jm^{-2} . To obtain the SED and MED in the validation sites (Table 1) the hourly series of solar irradiance (Wm^{-2}) were integrated on a daily scale (8:00-18:00 LT) during the mean year (2015-2020). For this analysis, the MED was calculated considering four Fitzpatrick skin types: skin types I-IV ($\text{MED}_{\text{I-IV}} = 200\text{-}450 \text{ Jm}^{-2}$). The most frequent skin types in Chile are III and IV (Zemelman et al., 1990). Table 1 shows the geographical coordinates and data available for each validation site.

Table 1. Geographical coordinates and number of UVER available data of validation sites.

Sites	Lat. (°S), Lon. (°W)	Geographic Zone (Region)	Altitude (m)	Hourly data	Daily data
COL	-33.35, -70.29	Andes mountains (Santiago metropolitan)	2750	11,295	1,027
GOB	-33.03, -71.62	Coast (Valparaiso)	28	21,858	1,995
RAN	-34.17, -70.79	Valley (Libertador Gral. Bernardo O'Higgins)	482	19,600	1,788

Hourly and daily datasets at Colorado (COL) over a mean year (2017-2020), Gobernación marítima (GOB), and Rancagua (RAN), over a mean year (2015-2020).

2.5 Model and validation

The model-derived UVER dose developed by (González-Rodríguez et al., 2021a) in Santiago city is validated in other sites inside the MRCh used the methodology proposed by (Kudish and Evseev, 2020). The model-derived UVER dose employed does not include parameters such as ozone, cloud cover, surface albedo, or aerosols. Two radiometric stations were selected with simultaneous UVER and IG ground-based measurements, such as El Colorado (COL), Rancagua (RAN), representative to Santiago metropolitan and O'Higgins regions respectively. Including one radiometric station with UVER measurement closed to the station with IG values amount them, Gobernación Marítima (GOB) closed to Quintero station (Table 1, and Table S1). The validation comprises a performance analysis based on five statistical parameters: Determination coefficient (R^2), Pearson correlation coefficient (r), Mean bias error (MBE), Root-Mean-Square Error (RMSE), and Index of Agreement (IA), (De Miguel et al., 1994), (Despotovic et al., 2015). For comparison with other studies the MBE, RMSE, and MAPE (Mean Absolute Percentage Error) indicators were calculated, as follows:

$$\text{MBE (\%)} = 100 * \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (1)$$

$$\text{RMSE (\%)} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{O}} \quad (2)$$

$$\text{MAPE (\%)} = 100 * \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (3)$$

where P_i represents the modeled values, O_i represents the measured ones, n represents the number of observations and \bar{O} is the average of measurements.

2.6 Developing of UVER maps

For building the monthly and annual maps first, were download two Spatial tools: Google Maps import and Import shapefile. The apps (Google Maps import) allowed fetching MRCh map images from a Web Map Service (WMS) server and place them as a background image in a graph. The shapefile of Valparaiso, Santiago metropolitan, O'Higgins, Maule and Ñuble regions were obtained from Ministerio de Bienes Nacionales, Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE, <http://www.ide.cl/>). The UVER exposure maps were created for the 2019 year. Given that the 2019 year is the most covered by observations. The characteristics of the import MRCh maps were the following: hybrid without labels, Mercator projection on, rescale margin on, and zoom level equal 8. By using OriginPro 2021 9.8.0.200 (Academic) software, maps were generated for UVER monthly and annual doses over MRCh.

3 Results and discussion

3.1 Daily values

The monthly averages daily values of UVER doses, IG, and TOC for selected sites are presented in Figures. 2a-c. In general, the MRCh receives high doses during most of the year ($\text{UVER} > 2.6 \text{ kJm}^{-2}$). The UVER ranging from a summer maximum of 7.18 kJm^{-2} in COL station to a winter minimum of 0.85 kJm^{-2} in RAN station. This maximum received in COL was slightly lower than those obtained for the high-altitude station of El Rosal, Argentina (24.39°S , 65.76°W , 3355 m) with values of 7.82 kJm^{-2} (Utrillas et al., 2016). Similarly, the monthly average daily value of IG, ranging from a summer maximum of 30.67 MJm^{-2} in COL station to a winter minimum of 7.89 MJm^{-2} in RAN station. The seasonal variation of both UVER and IG results from a combination of astronomical factors, OC, TOC, and environmental conditions particular to each site. During winter, the higher frequency of OC (Figure SI) and high aerosol

loading events contribute to reducing both radiative fluxes in MRCh. A similar result was obtained by (Cordero et al., 2014). For the summer months, monthly average daily values of UVER for GOB, and RAN were 4.81 kJ m^{-2} , and 5.31 kJ m^{-2} , respectively. The UVER doses for GOB and RAN are the lowest than COL (Fig. 2a). This is suggested because the GOB and RAN are stations located at sea level, particularly the GOB site has been characterized by a partial obstruction of radiance at the horizon (Cordero et al., 2013). The large presence of aerosols during fog events in GOB and RAN may affect also the spectral distribution of solar radiation (da Silva et al., 2012), (Lapere et al., 2021a). However, the hourly observations indicate that during eight months the UVER at solar noon is systematically larger than 0.20 W m^{-2} , indicating a "very high risk" of developing sunburn according to the World Health Organization (WHO, 2002b). It is important to note that the Chilean coast dawns cloudy, which reduces the UVER or UVI levels, but when its skies are clear, and the early morning hours are advanced, they are the same. A previous study by (da Silva et al., 2012) showed that in the Valparaiso coast during the summer months the hourly UVER value of 0.33 W m^{-2} was reported, equivalent to $\text{UVI} = 12$, which according to WHO is "Extreme risk", dangerous to human and ecosystem life (WHO, 2002b). Similarly in the metropolitan city of Santiago, it was shown that accumulated doses of UVER even on partly cloudy days and before 11 a.m. can be harmful to skin phototypes melano-protected (González-Rodríguez et al., 2021a). Therefore, the inhabitants that living in RMCh are most likely to have skin damage when exposed to direct UVER without protection.

The TOC displays a seasonal variation (Figure 2c), the minimum value was 259.31 DU in April for RAN, while the maximum value was 304.14 DU in October month for COL. For all sites, low values of ozone concentrations ($\text{TOC} \leq 270 \text{ DU}$) are observed during the summer-autumn months, which may provide less UV protection from incoming solar radiation. Therefore, the seasonal evolution of TOC in Santiago indicates that measures should be taken to avoid overexposure to radiation UVER in the warmer months. In Fig. 2d the annual cloud frequency for each site is low ranged between 4.87% to 5.27% in GOB and RAN respectively. Therefore, the latitudes under study are highly influenced by a minimum of low clouds, with a frequency of OC increase toward southern between $36\text{-}45^\circ \text{ S}$ and northward from latitude 30° S (Figure SI).

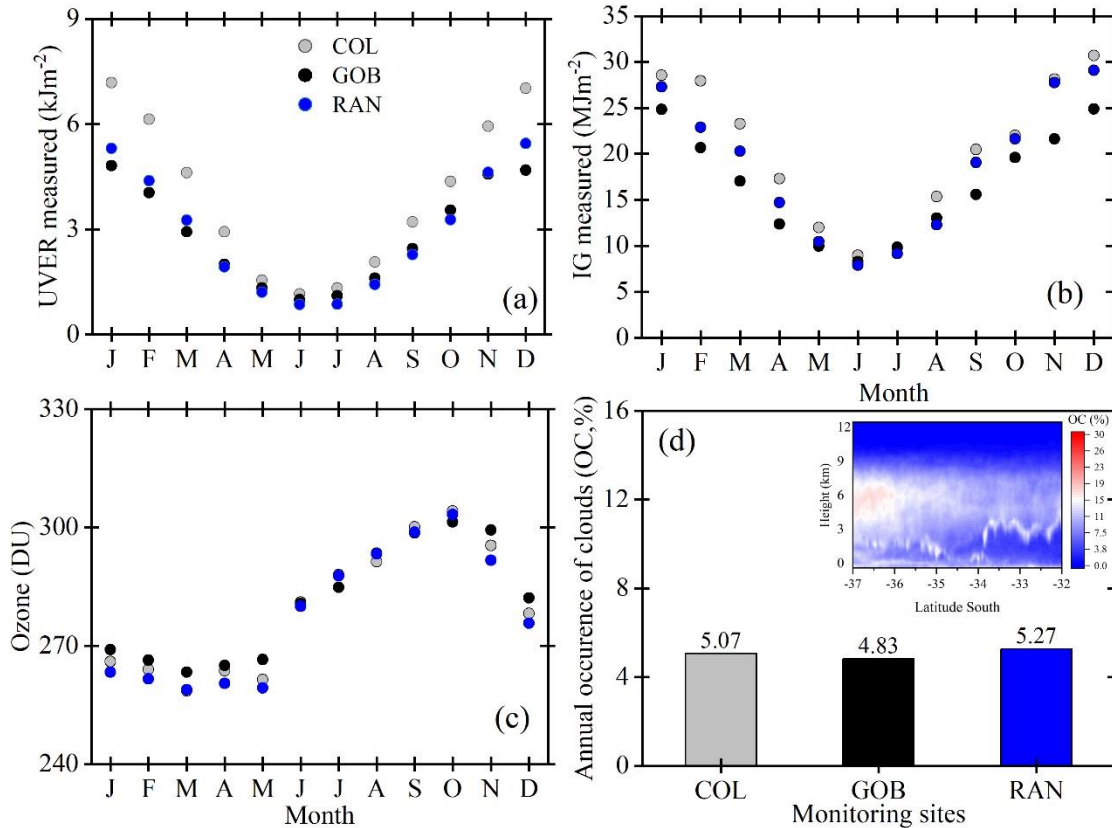


Figure 2. Mean daily values of (a) UVER, (b) Global radiation, (c) TOC for all-sky conditions during the mean year, and (d) annual cloud frequency along the MRCh, (inset the profiles of OC distribution along MRCh latitudes).

Figure 3 shows the profiles of OC at each season between -32°S to 37°S latitudes. The highest frequency of OC is found in the winter season (Figure 3c) and the lowest in the summer and autumn seasons (Figures 3a,b). During spring (Figure 3d) there is a significant occurrence reaching values between 16-23%. The influences of cold fronts passing over the region in the winter can increase the cloud frequency (between 37°S and 35°S of latitude), especially of low and middle clouds. Because of they are thick clouds, we expect an important effect on the radiation in this season.

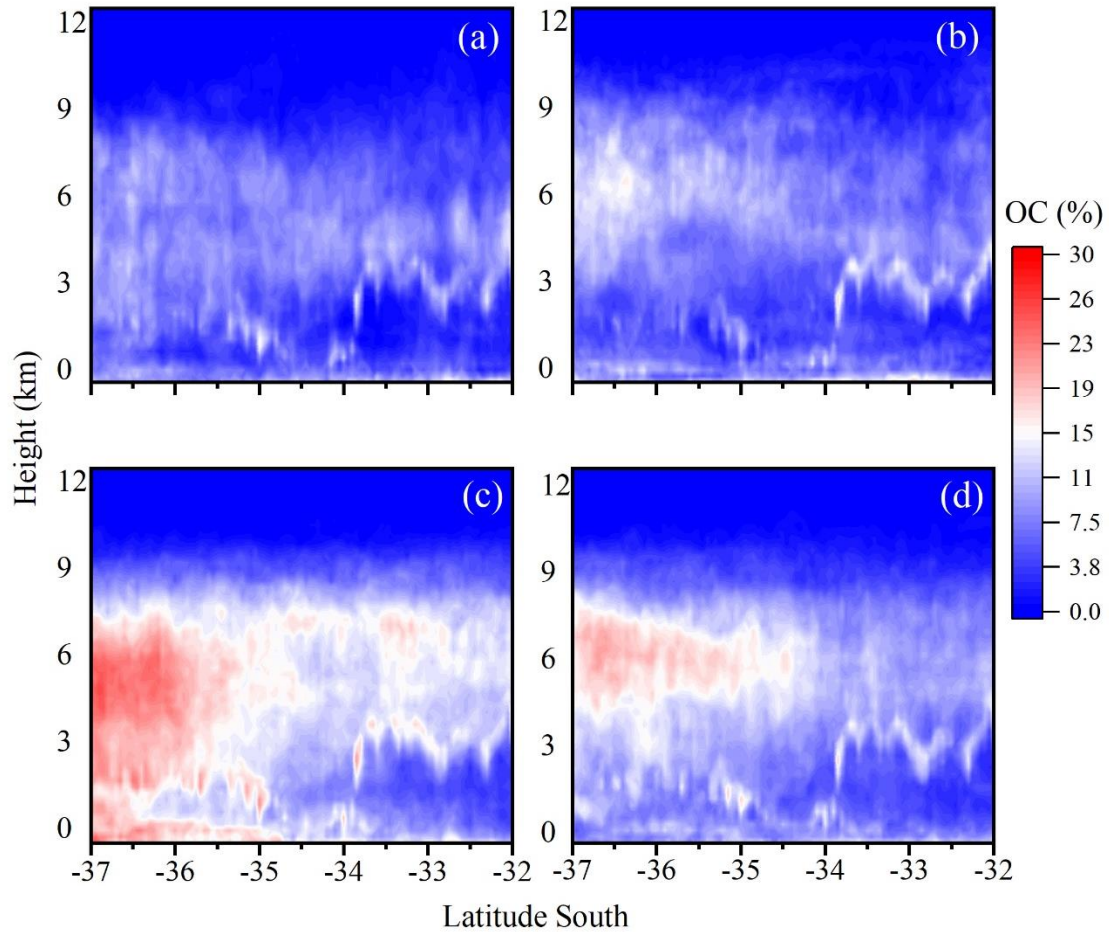


Figure 3. Seasonal variability of OC with vertical profile cross-section along the region, Clockwise from up, season: (a) summer, (b) autumn, (c) winter, and (d) spring.

3.2 Annual accumulated doses

The analysis of annual accumulated doses has a great interest since it is necessary to know the MED or SED in advance for informing people about the sunburn risks of UVER over-exposure. In plus to knowing the radiation that may accumulate during its lifetime. Note that the MED/SED values registered are usually higher than those found at similar latitudes and altitudes in Northern Hemisphere (Kalogirou et al., 2017) as can see in Table 2. The seasonally cumulative doses received were 43%, 18%, 9%, and 30% for summer, autumn, winter, and spring months, respectively. These differences are consequences of the motion of the Earth in its orbit and around the Sun, which allows the amount of incoming solar radiation on the ground to be higher in the summer months. Therefore, the UVER in MRCh is higher in summer and spring than autumn and winter months. The daily information presented regarding the doses received by individuals is important, due to the overexposure to high UVER values during most of the year. This is closely related to the rates/100,000 inhabitants of skin cancer in the region (Rivas et al., 2020), (MMA, 2020).

Table 2. Annual cumulative doses SED/MED_{I-IV} for this study and other literature research.

Site	Lat., Lon.	Alt. (m)	SED	MED _I	MED _{II}	MED _{III}	MED _{IV}	Ref.
COL	-33.35°S, -70.29°W	2,750	14,149	7,123	5,702	4,073	3,161	
GOB	-33.03°S, -71.62°W	28	10,146	5,121	4,097	2,926	2,276	This study
RAN	-34.17°S, -70.79°W	484	10,149	5,084	4,176	2,899	2,255	
Larnaca, Cypres	34.87°N, 33.63°E	1	9,087	4,543	3,635	2,596	2,019	(Kalogirou et al., 2017)
Athalassa, Cypres	35.15°N, 33.40°E	165	11,418	5,709	4,568	3,262	2,537	
Málaga, Spain	36.43°N, 4.29°W	61	9,661	4,830	3,864	2,760	2,146	(Utrillas et al., 2013)
Valladolid, Spain*	41.70°N, 4.70°W	702	8,921	-	3,559	-	-	(Bilbao and de Migue, 2020)
Valencia, Spain	39.29°N, 0.23°W	23	8,000	4,000	-	-	-	(Utrillas et al., 2012)

*UVER received for continuous and uninterrupted exposure to the sun.

3.3 Model validation

The empirical model was validated by comparing its surface UVER dose estimates with ground-based UVER dose measurements during the 2019 year. Measurements in sites with different characteristics (Table 1) were used. For all sites, modeled and measured values for erythema doses give a good agreement and the percentage of differences (PD) have the highest variability during the summer months. The PD between the modeled and measured daily UVER doses at COL, VAL, and RAN are presented as a function of the day of the year (Figure 4). The range in percent is founded between -4 and 3%. In all sites, the deviation in the summer months is significant so that erythema may occur without realizing its insensitive skin phototypes.

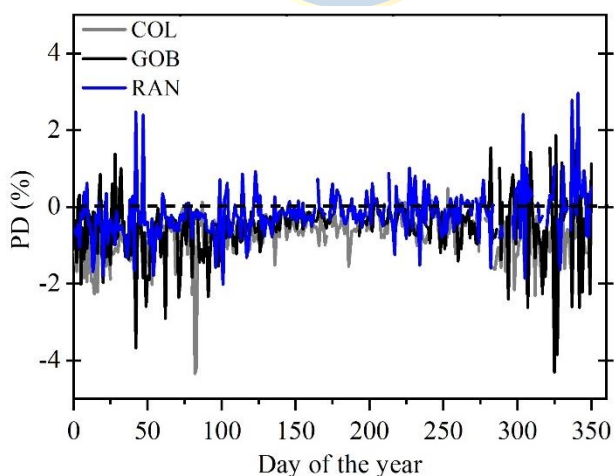


Figure 4. Percentage of difference (PD, %) between measured and modeled daily UVER doses at COL (Andean mountain zone), GOB (coast zone), and RAN, (valley zone) as a function of the day of the 2019 year.

Figure 5 shows the scatter plots between estimated and measured daily UVER doses for the selected radiometric stations. In general, the model evaluation is satisfactory for the three sites, the intercepts are negligible and the coefficients of determination are high ($R^2 \geq 0.94$). An inspection of Figures 5a-c reveals that the model underestimates the UVER irradiance at all sites with low RMSE, (Fig. 4). The lowest MBE and RMSE were found in RAN (MBE= -0.18 kJm^{-2} , RMSE= 0.66 kJm^{-2}), given that RAN has a similar climate to Santiago. The highest MBE and RMSE were found in COL suggested by the altitude effect. At higher altitudes, the optical path is reduced and there are fewer atmospheric components to absorb or scatter UV rays, indicating that UVER is less attenuated and therefore may increase. For clear skies, increases in ultraviolet irradiance of 6-18% per km have been found (Blumthaler et al., 1994), (Koepke et al., 1998). In northern Chile, (Rivas et al., 2008) has reported UVR increases of 10-12% per km. The deviation between estimated and measured values is not uniform across the range of UVER values. In the medium range of UVER values, the model produces larger variability, suggested by OC changes (Figs. 3a-d). Figures 3a, b shows that at COL and GOB, the red line has a higher slope than RAN. Therefore, the UVER values estimated for RAN have better accuracy than the ones estimated for COL or GOB. These results suggest the need for additional improvements to the simple model, including other parameters such as altitude, AOD, TOC, and OC.

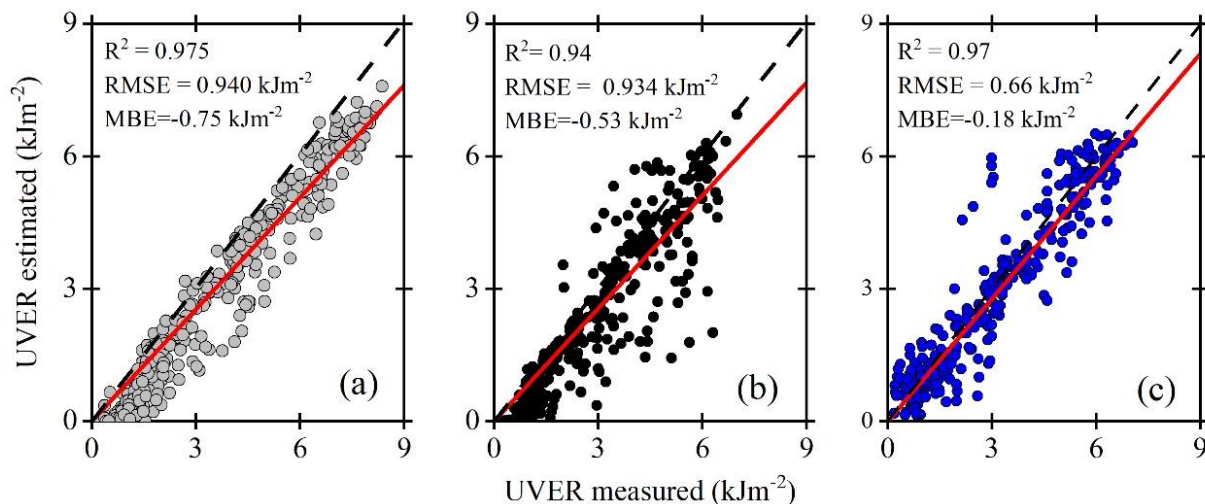


Figure 5. Comparison between estimated and measured daily UVER doses at (a) COL, Santiago (Andean mountain zone), (b) GOB, Valparaiso (coast zone), and (c) RAN, O’Higgins, (valley zone) during the 2019 year. The dashed black line indicates the 1:1 line. The red line indicates the fitting using the least-squares regression method.

The degree of agreement between calculated and measured daily UVER doses for all site's validation data set is somewhat unexpected. Since the empirical model employed was created for Santiago city and, VAL is located at the coastal zone, COL at 2000 m of altitude, while RAN is located in intermedia depression. The model estimates the UVER doses with good accuracy and low errors (Fig. 5). The overall performance of the empirical model in detail is presented in Tables 3-5.

Table 3. Statistical analysis of the agreement between the measured and estimated UVER values in COL, Santiago during the 2019 year.

Month	MBE (kJm ⁻²)	RMSE (kJm ⁻²)	R ²	IA	n	Freq. Obs. (%)
J	-1.32	1.40	0.986	0.83	29	94
F	-0.98	1.08	0.990	0.84	26	93
M	-0.91	1.39	0.914	0.72	29	94
A	-0.64	0.68	0.983	0.87	30	100
M	-0.53	0.59	0.922	0.75	31	100
J	-0.55	0.59	0.846	0.64	28	93
J	-0.48	0.60	0.840	0.62	30	97
A	-0.43	0.55	0.954	0.85	31	100
S	-0.41	0.55	0.983	0.97	29	97
O	-0.87	1.06	0.950	0.91	29	94
N	-0.98	1.13	0.985	0.87	29	97
D	-0.97	1.07	0.994	0.69	28	90
Summer	-1.09	1.20	0.989	0.82	83	92
Autumn	-0.69	0.95	0.935	0.89	90	98
Winter	-0.49	0.58	0.904	0.83	89	97
Spring	-0.75	0.95	0.976	0.94	87	96
Period	-0.75	0.94	0.975	0.96	349	96

Table 4. Statistical analysis of the agreement between the measured and calculated UVER values in GOB, Valparaiso during the 2019 year.

Month	MBE (kJm ⁻²)	RMSE (kJm ⁻²)	R ²	IA	n	Freq. Obs. (%)
J	-0.54	0.96	0.97	0.74	31	100
F	-0.89	1.25	0.93	0.72	28	100
M	-0.80	1.06	0.93	0.81	30	97
A	-0.71	0.84	0.93	0.81	30	100
M	-0.43	0.49	0.90	0.72	31	100
J	-0.30	0.33	0.94	0.77	24	80
J	-0.30	0.38	0.94	0.51	20	65
A	-0.34	0.44	0.96	0.85	31	100
S	-0.49	0.63	0.96	0.86	30	100
O	-0.11	0.77	0.95	0.83	26	84
N	-0.55	1.50	0.94	0.77	29	97
D	-0.77	1.43	0.95	0.58	27	87
Summer	-0.78	1.32	0.95	0.75	86	96
Autumn	-0.65	0.83	0.91	0.88	92	100
Winter	-0.32	0.39	0.95	0.87	75	82
Spring	-0.39	0.95	0.92	0.85	85	93
Period	-0.53	0.93	0.94	0.93	338	93

Table 5. Statistical analysis of the agreement between the measured and estimated UVER values in RAN, O'Higgins during the 2019 year.

Month	MBE (kJm ⁻²)	RMSE (kJm ⁻²)	R ²	IA	n	Freq. Obs. (%)
J	-0.60	0.93	0.98	0.68	31	100
F	-0.42	1.01	0.96	0.19	28	100
M	-0.29	0.40	0.99	0.86	30	97
A	-0.45	0.84	0.88	0.45	30	100
M	-0.17	0.38	0.90	0.68	31	100
J	-0.05	0.32	0.91	0.43	27	90
J	-0.12	0.30	0.89	0.53	29	94
A	-0.08	0.58	0.85	0.48	31	100
S	-0.03	0.56	0.96	0.91	29	97
O	-0.09	1.03	0.91	0.67	23	74
N	0.05	0.80	0.97	0.91	24	80
D	0.29	1.07	0.97	0.70	27	87
Summer	-0.37	1.21	0.96	0.67	86	96
Autumn	-0.30	0.57	0.96	0.93	92	100
Winter	-0.08	0.43	0.86	0.72	87	95
Spring	0.03	0.94	0.94	0.88	76	84
Period	-0.18	0.66	0.97	0.96	341	93

Comparison with validation studies previously reported in the literature is very difficult. The studies reported diverse periods, atmospheric conditions, and different sites around the world. However, in terms of statistical indicators R², MBE, RMSE, and MAPE, this study provides results similar to the validation presented in previous work. Table 6 shows the R², MBE, RMSE and MAPE values are found between 0.97-0.98, -2.2 to -9.2%, 20-30%, and 26-29% whereas the literature showed values between 0.91-0.98, -0.57 to -10%, 7-20%, and 7-13% respectively. Therefore, the simple model has a similar predictive ability to other simple or more complex previously reported. It should be noted that the model used to require a single parameter (IG) available at many meteorological stations in Chile. The OMI satellite data underestimates overpass UVER by ~4% (Zhang et al., 2019), while the RMSE in (Janjai et al., 2010) was ~12.3%. For Santiago city, (Damiani et al., 2014) showed that the satellite-derived UV irradiance had a significant error with ground-based measurements. The inter-comparison results are listed in Table 6.

Table 6. Comparison of the results of validation presented in this study with literature.

Location	Model	Parameters	MBE (%)	RMSE (%)	MAPE (%)	R ²	Ref.
Three sites, MRCh	quadratic	IG	-2.6 to -9.2	20-30	26-29	0.97-0.98	This study
Santiago, Chile	quadratic	IG	-	-	17	0.98	(González-Rodríguez et al., 2021a)

Two sites, Israel	quadratic	Clearness index	-0.57 to 0.95	18-20	-	0.91- 0.95	(Kudish and Evseev, 2020)
Novi Sad, Serbia		Global solar irradiation Clearness index Cloudiness air mass	-0.61	18	13	0.98	(Malinovic- Milicevic et al., 2018)
Two sites, Cyprus	quadratic	IG	-	-	-	0.96	(Kalogirou et al., 2017)
Valencia, España	potential	slant ozone column and clearness index	-0.57 to 7.22		7-11	0.96	(Moreno et al., 2013)
Three sites, España	power- low	UV transmissivity under k_T and slant ozone column	1.88- 5.79	-	7-8	0.95- 0.96	(Anton and A. Serrano, M. L. Cancillo, 2009)
Cities inside Spain	power	Clearness indices (k_T and k_{TUVER})	1 to 10	17	-	0.95- 0.97	(Foyo-Moreno et al., 2007)

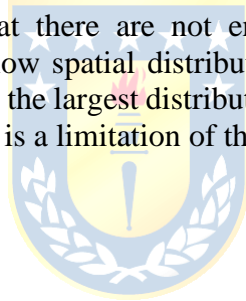
3.4 Spatial-temporal UVER distributions

Measured and estimated daily values of UVER doses (in kJ m^{-2}) with time profile: 8:00 to 18:00 LT have been used to draw monthly, seasonal and annual risk maps. Figs. 6-7 shows the UVER variation under all-sky conditions on a horizontal surface during the 2019 year.

From the monthly maps (Fig. 6), it is observed that there are both spatial and temporal variations of UVER daily dose month by month across MRCh. The seasonal change in the solar zenith angle (SZA) leads to relatively lower UV values from April to August; while in the summer months increase, reached UVER doses more than 5 kJm^{-2} . Although the Maule and Ñuble region (Fig. 1b) did not submit UVER data for validation, we decided to include it in the development of the monthly and annual maps. RAN has monthly erythema dose values between 5.59 kJ m^{-2} (DEC) and 0.69 kJ m^{-2} (June) in the summer and winter months respectively. Northward in GOB, with doses are less than 4.80 kJ m^{-2} (JAN) and less than 0.61 kJ m^{-2} (JUN), while for COL, the monthly averages ranged between 6.23 kJ m^{-2} (December) and 0.58 kJ m^{-2} (JUN). The increase of the UVER is seen as we approach higher altitude sites towards the mountain range and the north. Generally, at higher altitudes as the air is thinner, dryer, and cleaner and have less scattering and absorption of UVR (e.g., by TOC) resulting in higher UVER levels at the surface. As a consequence in high altitude locations (like El Colorado), the UVER doses can reach about 7.58 kJm^{-2} in summer (JAN). This is an effect that should be considered by recreational activities such as snowboard in the Andean mountain. For spatial distribution, the increase to the west is likely by higher elevation in the western half of Chile (Fig. 1b). Earlier studies reported similar findings (Rivas A et al., 2009; Cordero et al., 2018). The altitude effect is less obvious for the non-summer maps. Even the relative changes with altitude are smaller in winter than in summer because of the reduced aerosol loading in the boundary layer. For the winter, and spring maps a maximum difference was found fewer than 4.6 kJm^{-2} . The winter map shows about 4-5 times lower values for UVER than the summer map. However, it's important to wear sunscreen year-round to lower your chances of getting skin cancer and aging. Even in the winter and on cloudy days, it's important to protect our skin, the accumulated daily dose could be above the threshold of damage (Lehmann et al., 2019). Particularly two studies for mid-latitude showed the above (McKenzie and Lucas, 2018), (González-Rodríguez et al., 2021a). The spring map has UVER values around one point above the autumn map suggested by the difference in TOC (Figure 3b). In summer the altitude effect

strongly appears with differences up to 2.0 between the coast and the highest mountains. This shows the need of taking into account the altitude effect. Global UVR exposure tends to increase with altitude, due to less atmosphere being present between the sun and the receiver. High and harmful UVR levels may occur in the mountain regions, as shown by other studies (Singh and Singh, 2004), (McKenzie et al., 2006), (Utrillas et al., 2018b). Situations with large albedos, such as snow-covered surfaces are not considered here. But, these conditions are present in COL station and strong increases in UVR with elevation may occur if the higher altitude site has large albedo (e.g. fresh snow) relative to the lower altitude site. It is known that UVI in these situations is considerably enhanced by about 50% in comparison with snow-free surfaces (Cordero; et al., 2014).

The factors that determine the spatial-temporal distribution of solar radiation at the surface are TOC, OC, and topography, and the results presented here are influenced by these factors. Despite not considering these factors in the UVER estimates by the model, their relative surface distribution over all of MRCh can be considered reliable, since three stations that measure surface UVER were used to validate the estimates. However, it should not be forgotten that there are not enough IG and UVER stations measuring simultaneously in the ground. Also, the low spatial distribution of IG monitoring stations. As seen in Figures 1 and 7, Santiago metropolitan has the largest distribution of radiometric stations than Valparaiso, O'Higgins, Maule, and Ñuble region. This is a limitation of the study.



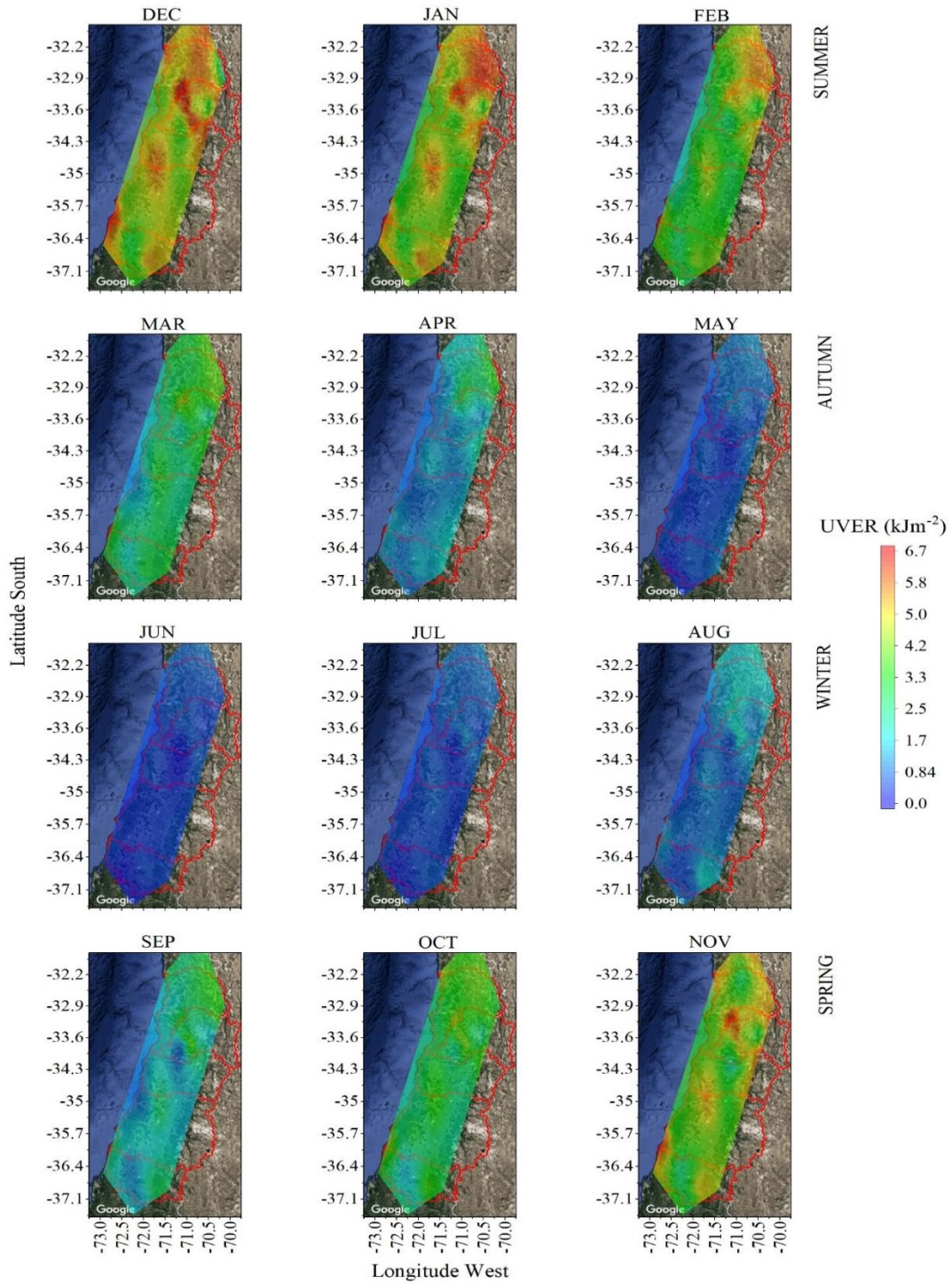


Figure 6. Monthly maps of UVER exposure across MRCh for all-sky conditions during the 2019 year.

As shown in Fig. 7, the annual UVER doses were found to range from about 2.43 kJm⁻² in coastal areas (GOB, Valparaíso), 2.84 kJm⁻² (RAN, Rancagua) in the valley to about 3.15 kJm⁻² (COL, Santiago metropolitan).

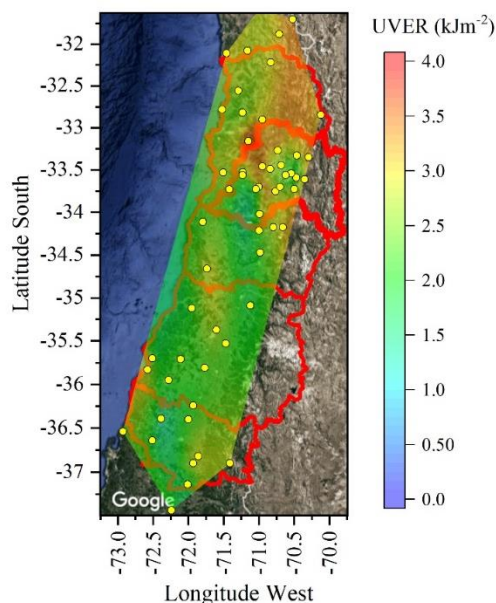


Figure 7. Annual map of UVER exposure across MRCh for all-sky conditions during the 2019 year.

In brief, a simple model was used to create a validated spatially and temporally varying exposure of UVR across MRCh. This is the first time we've had this MRCh map of UVER exposure. It is hoped that this information can be combined with other data sets to identify areas of concern based on both increased UVR exposure and other skin cancer risk factors, such as employment in occupations that require more time in the sun. That is why it is important to include it as an educational tool and to use the media as a clear and simple way to become familiar with the concept and thus put into practice the recommendations for adequate sun exposure, mainly in vulnerable population groups (e.g. children). In this way, it is possible to reduce the harmful effects on health and also to reduce the costs involved in the treatment of diseases that can be caused by prolonged exposure. To avoid the production of erythema and long-term consequences, it is necessary to use cover up with a long jacket, hat and, sunglasses with 100% UV protection, seek shade between 10:00-16:00 LT when the sun's UVR are strongest, avoiding exposure around noon, and use sunscreen and lip balm with SPF >30 (over 50 for children), are fundamental sun protection measures (WHO, 2002; EPA, 2020). A few simple steps can help protect you from sunburn or skin cancer.

3.5. Future perspectives

Several considerations have been taken into account in this study when modeling the UVER. Below, we list some issues where future research and local studies could be expanded.

-Include the surface albedo. When the ground was covered by frost or by snow, large model-measurement differences (more than 30%), (Cordero et al., 2014) that increased albedo caused an increase in UVR. A day on the ski slopes can make sunburn on your skin like a day at the beach. This study not considering the increase in the albedo. Therefore, analysis of the ground albedo values to be considered.

-Include the AOD effects (Higher Aerosol Load) that should be investigated. Analyses with different AOD values are needed to test the performance of UVER modeling by comparing with UVER measurements affected by a larger aerosol load.

-Include changes in OC, altitude, and more years of data for reconstructing the UVER irradiation over MRCh allowing know its trends and changes.

4. Conclusions

In this work, a simple method was carried out to obtain UVER daily doses and generate a monthly and annual scale map of the sunburn across MRCh. Demonstrating the spatial pattern of potential hazards for human health in the most populated region of Chile.

- The UVER daily doses measured from 2015 to 2020 at three sites located in MRCh has been analyzed. The MRCh receive high doses ($UVER \geq 2.6 \text{ kJm}^{-2}$) during the half-year.
- Annual standard cumulative doses over an average year range from 14,149 to 10,146 SEDs. The most common skin type in Chile, phototype III-IV receives an annual cumulative dose between 4,073 MED_{III} and 3,161 MED_{IV} in El Colorado to 2,926 MED_{III} and 2,276 MED_{IV} in Valparaiso coast.
- The empirical model-derived doses provide accurate UVER daily doses in the validation sites. Comparisons of estimated and measured UVER doses showed good agreement ($IA \geq 0.96$), with high correlation ($R^2 \geq 0.98$) and low bias ($MBE \leq -0.75 \text{ kJm}^{-2}$) and ($RMSE \leq 0.93 \text{ kJm}^{-2}$).
- The spatio-temporal variation of the UVER is directly related to the seasonally and topography of the region. More than 40% of the annual UVER doses are received in summer, about 29%-19% in spring and autumn, and less than 10% in winter, with increasing intensity towards mountain range high elevation and low latitudes areas at the north.
- These results will be used in the analysis of the role of UVER in skin cancer or photochemical process. By improving our capacity to analyze the UVER impact on the quality of human life, we will be better placed in a more climate-resilient society.

4.3.2 Characterization of solar-simulated ultraviolet radiation for water treatment applications.

Abstract: Solar radiation data at Earth's surface are essential for the study and design of systems that use solar energy. Here was solar-simulated ultraviolet radiation (UVR) from the UVSPEC/LibRadtran radiative transfer model for three cities located in central-north of Chile (-24°S to -37°S). The input data for the model include: altitude, latitude, cloud cover, ozone column and AOD parameters. The simulated UVR values were characterized and evaluated in irradiance (Wm^{-2}), and irradiation (kJm^{-2}) terms to compare whit the literature. The results indicate that the solar-simulated UVR irradiance (irradiation) terms were 30.22Wm^{-2} , (1299.95kJm^{-2}), 27.30Wm^{-2} (1175.06kJm^{-2}) and, 24.85Wm^{-2} (1104.64kJm^{-2}) for Antofagasta, Santiago and Concepcion. Antofagasta received the highest values associate with location and low TOC, CC aerosols. Based on the comparative analysis the solar photocatalysis experiments are possible for most of the cases reported in this study, for Antofagasta, Santiago and Concepcion. However, the experimental conditions found in the literature are very varied, so is difficult to make a homogeneous comparison in all cases. This is the first preliminary analysis showing the possibilities of exploiting the potential of solar UVR in Chilean cities to provide tools for the integration of water treatment technologies. This research motivates further studies on spectral radiation and emerging advanced oxidation technologies such as solar photocatalysis.

Keywords: solar-simulated ultraviolet radiation, radiative transfer model, water treatment applications

Manuscrito por enviar a *RENEWABLE ENERGY*



Characterization of solar-simulated ultraviolet radiation for water treatment applications.

Lisdelys González-Rodríguez^{1*}

¹Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Concepción, Bio Bio, Chile

Highlights

- A general method is proposed to know the UVR without measurements.
- Simulation of UVR from LibRadtran model and satellite data.
- UVR applicability in water solar treatment.

Abstract

Solar radiation data at Earth's surface are essential for the study and design of systems that use solar energy. Here was solar-simulated ultraviolet radiation (UVR) from the UVSPEC/LibRadtran radiative transfer model for three cities located in central-north of Chile (-24°S to -37°S). The input data for the model include: altitude, latitude, cloud cover, ozone column and AOD parameters. The simulated UVR values were characterized and evaluated in irradiance (Wm^{-2}), and irradiation (kJm^{-2}) terms to compare whit the literature. The results indicate that the solar-simulated UVR irradiance (irradiation) terms were 30.22Wm^{-2} , (1299.95kJm^{-2}), 27.30Wm^{-2} (1175.06kJm^{-2}) and, 24.85Wm^{-2} (1104.64kJm^{-2}) for Antofagasta, Santiago and Concepcion. Antofagasta received the highest values associate with location and low TOC, CC aerosols. Based on the comparative analysis the solar photocatalysis experiments are possible for most of the cases reported in this study, for Antofagasta, Santiago and Concepcion. However, the experimental conditions found in the literature are very varied, so is difficult to make a homogeneous comparison in all cases. This is the first preliminary analysis showing the possibilities of exploiting the potential of solar UVR in Chilean cities to provide tools for the integration of water treatment technologies. This research motivates further studies on spectral radiation and emerging advanced oxidation technologies and the development of prospects for water and wastewater treatment.

Introduction

Solar UV radiation (UVR) data at Earth's surface are essential for the study and design of systems that use solar energy. The UVR corresponds to electromagnetic waves with wavelengths (λ) of 100-400 nm. It is subdivided into three spectral bands: UV-C (100–280 nm), UV-B (280–315 nm), and UV-A (315–400 nm) radiations. At present, the knowledge of UVR is of great interest, so its potential harmful effects on human health (Rivas et al., 2020; González-Rodríguez et al., 2021), materials (Urrejola et al., 2016), as well as its beneficial application in vitamin D synthesis (McKenzie et al., 2009) and different photochemical processes, are being studied. From an energetic point of view, although UVR constitutes the smallest fraction (6%) of the solar spectrum (Escobedo et al., 2009), its photons are highly energetic. So many studies illustrated the influences of UVR on many photocatalytic solar systems (Ajona and Vidal, 2000), (Malato et al., 2002) (Malato et al., 2009). Mainly, using TiO_2 as a semiconductor material (Lu et al., 2017), (Lofrano et al., 2018) or iron salts in the case of the homogeneous photocatalytic process

(Malato et al., 2002), (Cabrera-reina et al., 2019), (Cabrera-Reina et al., 2021). The principles of this process are well known. Strongly oxidizing radicals, such as OH, are generated on the surface of the wideband-gap semiconductor upon excitation with <400 nm UV light and the formation of an electron-hole pair. These species are responsible for the non-selective oxidation of diverse organic compounds. But, an important limitation of heterogeneous photocatalysis is the need for UVR to excite the photocatalyst. For enhancement of the harvesting UVR other semiconductors have been reported among them, ZnO (Navarro et al., 2009, Antil-Martini et al., 2017), or Bismuth Oxyiodide (BiOI) (Mahmoodi et al., 2018; Ribeiro et al., 2019). The ability of UVR to photodegrade, under catalytic conditions, a wide range of pollutants has been extensively demonstrated in the literature, Bisphenol A (S. Malato et al., 2000), Oxamyl (Malato et al., 2002), Oxytetracycline (Pereira et al., 2011), Spiramycin (Lofrano et al., 2018). Showed a linear dependence of the degradation of pollutants increases with increasing UVR, with light intensity increase from 20 to 30 Wm^{-2} ($0.2\text{--}0.3$ mol photons $\text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ in the 300–400 nm) (Malato et al., 2009). Therefore, high UVR values may enhance photocatalytic performance. Although recently, (Cabrera-Reina et al., 2021) showed that in foto-fenton process under photosaturation conditions the extra energy available cannot be absorbed by the photocatalyst and does not improve the mineralization rate.

On the other hand, the UV photons reduction by different atmospheric conditions should impact the efficiency of the photocatalytic process. A humid atmosphere produces a greater scattering of solar rays, which translates into a lower flux of solar radiation received at the surface. (Cabrera Reina et al., 2020) found that the site location and their ambient conditions (temperature, solar UVR levels and availability) are determinant in the solar photo-Fenton treatment efficiency. In turn, (Hoque et al., 2014) founded better removal efficiencies were achieved for ibuprofen (78 vs. 92%), triclosan (43 vs. 97%), galaxolide (41 vs. 96%), and tonalide (72 vs. 83%) in summer ($15\text{--}27$ °C) than in winter ($0\text{--}5$ °C). When overcast conditions are frequently the availability of sufficient sunlight is scarce and therefore the photocatalytic process required more time for water treatment (Malato et al., 2000). During days of partial rainfall, cloudiest, or fog event, the SODIS (Solar disinfection) bottles have to be exposed for 2 consecutive days to disinfect the water and consumed (Wegelin et al. 1994). SODIS systems have demonstrated a 3-4 \log_{10} inactivation of *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*, *Salmonella*, *Shigella*, Rotavirus, and *Giardia*, after a 6-hour solar exposure at geographic locations between $35^{\circ}\text{N}\text{--}35^{\circ}\text{S}$ (Meierhofer, 2006). Indeed, in the presence of TiO_2 , disinfection treatment occurs faster (Malato et al., 2016). Bearing in mind the water pollution problems in Chile (Palma et al., 2004; Cooman et al., 2005; Pino et al., 2015; Rozas et al., 2016; Climenti et al., 2018) solar photocatalysis offers a good technology for water treatment by using a renewable source of energy, inexhaustible and pollution-free, like sunlight mainly in some areas as northern Chile receiving more than 4000 h of sunlight per year (Reina et al., 2019).

Worldwide scarcity of information on the distribution of UVR resources makes it necessary to find this information. Several authors propose relationships between UVR and IG based on regression analyses of observations (Ogunjobi and Kim, 2004; Jacovides et al., 2009; Escobedo et al., 2009; Kudish and Evseev, 2011; Escobedo et al., 2011; Gandía et al., 2015; Kudish and Evseev, 2020; Escobedo et al., 2009). It was also observed that the ratio UVR to IG increases with decreasing solar zenithal angle and increasing cloud cover, (Jacovides et al., 2009; Escobedo et al., 2011; Feng et al., 2015). Other alternative is the use of radiative transfer models such as TUV (Palancar and Toselli, 2004) or LibRadtran (Antón et al., 2012; Roman, 2014; Cordero et al., 2016). TUV model operates over a shorter wavelength range of 150-750 nm, whereas LibRadtran can calculate any wavelength from 120-100000 nm. Therefore, the LibRadtran program provides an impressive toolbox allowing scientists to model the light environment in situations

where measurements are not possible, or to be used as a predictive tool to model the UVR environment under future circumstances.

Here was simulate UVR values on the horizontal surface from the UVSPEC/LibRadtran modeling Chilean cities located in central-northern Chile (between 23° and 37°S). Analyze seasonally in terms of irradiance (Wm^{-2}) and irradiance (kJm^{-2}) the simulated UV values. Compare the irradiance, irradiation values reported in literature with the simulated UVR values for each site. This is the first preliminary analysis showing the possibilities of exploiting the potential of solar UVR in Chilean cities to provide tools for the integration of water treatment technologies.

2. Materials and Methods

2.1 Study Area

Chile is located between 17° 30' and 56° 30' South latitude that occupies a long coastal strip between the Andes mountains and the Pacific Ocean in the southwestern part of South America. Has an area of 756,102 km², were capital and largest city is Santiago de Chile whit more than 7 million inhabitants (DGA, 2016). Chile is a very privileged country for its solar energy potential, especially in the Northern regions, where there is one of the highest levels of radiation on the planet. Receives between 900 and 2200 kWhm⁻² of energy per year from the sun (González-Rodríguez et al., 2017). Three Chilean cities between the latitude of -24°S and -37°S were selected for this study. The selection was based on the fact that they include the largest number of inhabitants in the country, great economic and industrial activity, and following recommendation by (Wald, 2012), they are located in excellent areas for solar utilization. Table 1, shows the main features of the study location.

Table 1. Features of the study location.

Cities	Latitude ($\phi^{\circ}S$)	Longitude ($^{\circ}W$)	Altitude (m.a.s.l)	Climate type ¹	Region	Inhabitants ² (hab)
Antofagasta	-23.59	-70.39	150	Norte litoral	Antofagasta	607,534
Santiago	-33.49	-70.73	500	Central interior	Metropolitan	7, 112.808
Concepcion	-36.73	-72.46	121	Sur litoral	Biobío	2,037.414

¹Classification following NCh 1079.Of 77 (INN, 1977), ²hab Census 2017.

2.2 Instruments and Satellite Data

Clouds are one of the major modulators of RUV, especially in mid-latitude. Hourly values of cloud fraction (CF) were obtained from the International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP-H series) (Young et al., 2018b) for the 21 years from 1985 to 2015. These data are available on the ISCCP website (<https://isccp.giss.nasa.gov/>). Daily values of the total column of ozone (TOC, DU) were estimated by the Earth Probe TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) using estimates over the period 2015 to 2019. These data are available on the TOMS website (<http://toms.gsfc.nasa.gov>). Meteorological parameters, including ambient air temperature (T), precipitation (rain), and relative humidity (RH) were collected using official records from the Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA,

<https://agrometeorologia.cl/>). Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements (Giles et al., 2019) were available from <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>.

2.3 Solar-simulated UVR values.

The UVSPEC/LibRadtran radiative transfer model 1-D was used to create a lookup table of the ratio UVR(250-400)/IG(300-4000nm) [herein after the K factor] as a function of a variety of atmospheric parameters. Simulations were carried out for cloudy and clear-sky conditions under different atmospheric parameters taking into account the variability of AOD at 500 nm, height above the ground level, the total ozone, and the cosine of solar zenith angle (SZA). A total of (5389x2) simulations were performed and the lookup table was finally created. The UVSPEC model has been recognized as a powerful tool with excellent results when variations in the thermodynamic state of the atmosphere by (Antón et al., 2012; Roman, 2014; Cordero et al., 2016). Aerosol optical depth (AOD) or atmospheric turbidity is the product of particle density and the probability of interception of radiation, usually between 0.09 and 1 (Madronich Sasha, 1993). For Santiago and Concepcion, the AOD values were found in AERONET web site, while for Antofagasta was considered a fixed value of 0.2. For many surfaces, except for snow, for the UV spectrum the ground albedo lies between 0 and 0.2 (Chadyšiene and Girgždys, 2008). In our case was considered 0.16 for all cities. For the estimation of the final K factor at each measurement we take into account the cloud fraction (given by the ISCCP project) and the K factor for clear sky (Kclear) and for overcast conditions (Kcloudy), then the proposed equation (1) is as follows:

$$K = K_{clear}(1 - CF) + K_{cloudy}(CF) \quad (1)$$

Once K is determined for each observation, the UV is estimated as IG*K. For example, if the measurement were clear sky, then K would be the corresponding Kclear. If the measurement has 1 of CF, then the corresponding K is equal to Kcloudy. In equation (1) the CF would be between 0 and 1, 0 for clear sky and 1 for completely cloudy. If CF=0.5, it corresponds to 50% cloud cover. If CF=1, then it is completely cloudy 1-CF=0, so K=Kcloudy*1. A total of 5389 atmospheric situations (clear and cloudy skies) at cosine of SZA ranging from 0.1 up to 1 were simulated.

2.4 Comparative analysis solar-simulated/reported UVR for water treatment.

The solar-simulated UVR was integrated over the full spectrum for obtain daily and monthly values during mean year (8-years). Then, the mean monthly UVR values reported in the literature that allowed the destruction of several pollutants were analyzed. These values were compared with the solar-simulated UVR from UVSPEC/LibRadtran for the three Chilean cities. In this way and with a complete description of the main operating conditions and measurements in practical experiments, it can be concluded whether or not solar photocatalysis is possible for different latitudes in Chile. Solar radiation is normally expressed as "Irradiance" (incident power on a surface of a unit area, in Wm⁻²). However, although irradiance is the most common way of expressing solar radiation data, it is the least used in the description of practical experiments for the destruction of pollutants. Solar irradiance depends on several factors (latitude, altitude, time of day, duration of measurement, etc.), so a complete description of the measurement conditions is necessary for a direct comparison with literature results. Therefore, UVR values in the study areas were evaluated in terms of irradiance (Wm⁻²) or irradiation (kJm⁻²) (±standard deviation), to compare with the literature. The equation (2) was used for the description of practical experiments.

$$\text{Irradiation UV} = \int_{200}^{400} \text{spectral UV irradiance } d\lambda dt \quad (2)$$

3. Results and discussion

It is known that laboratory-scale experiments are conducted under constant irradiance conditions, a situation that differs from pilot-scale tests. According to measurements, this factor varies during the reaction time due to conditions such as cloudiness, rain, presence of particles in the atmosphere and time of day, which will limit the incidence of UV photons on the photocatalytic system. Therefore, the seasonal variation of some meteorological and atmospheric parameters characteristic of the study locations will be shown below.

3.1 Climate conditions in each study site.

Figure 1 shows the seasonal variability from 2015-2020 of several parameters including Temperature ($^{\circ}\text{C}$), Relative Humidity (RH, %), Rain (mm), Global irradiance (IG, Wm^{-2}) and total ozone column (O_3) and cloud fraction (CF) for each study site. The relative humidity is inversely related to the air temperature. If temperature increases, the relative humidity decreases, and vice versa. The minimum temperature was 9.7°C (Concepcion), in the winter to a maximum of 21.9°C (Santiago) in the summer. The maximum RH (82.3%) was observed in Concepcion in July month, while the minimum record (44.8%) was observed during the summer in Santiago (Figs. 1b, c). The accumulated precipitation maximum (rainfall) was founded in Concepcion with a value of 347.8 mm. The driest period was observed during the summer for Santiago and Antofagasta cities, which did not report rainfall (Fig. 2a). Similarly, the IG is inversely related to the CF. The maximum (725.20 Wm^{-2}) and minimum (246.64 Wm^{-2}) of IG were observed in Santiago (Fig. 1f). Comparatively, the minor conditions of CF predominate in Concepcion more than Antofagasta and Santiago cities. It is important to note that for Antofagasta the cloudy conditions increase ($\text{CF} \geq 0.59$) in the summer months. Suggested by the desert climate with predominant daily cycle of clouds, with greater presence during the night and at sunrise (Osses et al., 2017). The cloudiest period of the year begins in April and ends in October. The maximum daily O_3 value (318.41 DU) was observed in Concepcion during the September month and the minimum value (253.21 DU) was registered during the March month in Antofagasta. For all cities the months between January and May had an $\text{O}_3 \leq 270 \text{ DU}$, which may provide less UV protection from incoming solar radiation. The O_3 has a greater impact on the UVR than on global radiation (Esteve et al., 2009), which indicates higher UVR values may reach the Earth's surface during the summer and autumn in these cities.

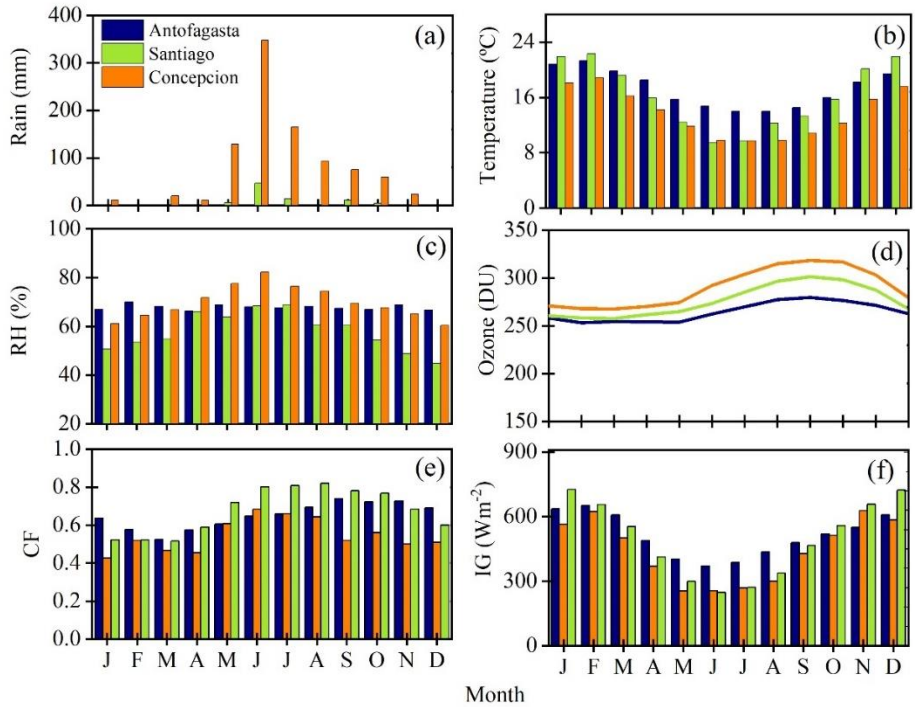


Figure 1. Monthly climatology of the meteorological and environmental parameters for each study site.

3.1 Spectral irradiance.

Figure 2 shows samples of spectra simulated at solar noon (14:00 LT) in Antofagasta. Total or global solar radiation measured on a surface is the sum of beam (direct), reflected and diffuse radiations. Direct radiation is the solar radiation received from the sun without having been scattered by the atmosphere. Therefore, the solar radiation received from the sun after its direction has been changed by scattering in the atmosphere is defined as the diffuse component of the total solar radiation. The main absorption lines corresponding to O₃, O₂ and H₂O atmospheric gases. The effect in the spectral distribution is shown in Fig. 2.

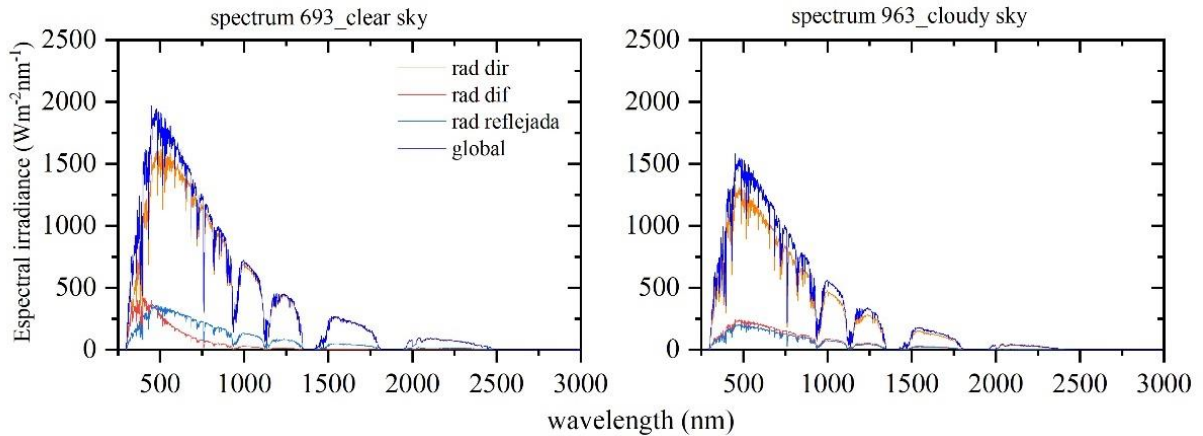


Figure 2. Solid lines correspond to spectra simulated by the UVSPEC/LibRadtran radiative transfer model for a clear and cloudy sky.

3.2 Solar-simulated UVR values in irradiance terms.

During the summer season (DJF), for all the cities studied, the UV irradiance increase until reaching values above 37.67 Wm^{-2} . As the latitude increases to the south, the monthly UVR decreases until reaching a minimum of 15.73 Wm^{-2} in June for the city of Concepcion. A maximum UVR monthly value was found between 44.80 Wm^{-2} (Santiago) and 41.25 Wm^{-2} (Antofagasta). Concepcion showed the maximum monthly value of 35.88 Wm^{-2} in February. The annual average of solar-simulated UVR for each city was 32.81 Wm^{-2} (Antofagasta), 30.07 Wm^{-2} (Santiago) and, 27.66 Wm^{-2} (Concepcion). This annual average is major if compare the annual average, for example, in Plataforma Solar de Almería (PSA, 37.09°N , -2.36°E and 500 m.a.s.l), or the North of Portugal (41°N , -9.14°W) were the first pre-industrial plant for leachates treatment from a sanitary landfill is located (Silva et al., 2016). The UVR annual values reported for these sites are 18.60 (Malato et al., 2003) and 17.00 Wm^{-2} (Silva et al., 2016) respectively. Therefore, despite the astronomical distance, climatic, and environmental conditions described in the before section the solar-simulated UVR indicate that during eight months the values of UVR are systematically larger than 20 Wm^{-2} for Santiago and Concepcion, while in Antofagasta every month this value is exceeded. Indicating that for most of the year can be possible the use of UVR for water treatment in the cities under study. We note that, since these are solar-simulated UV values from UVSPEC/LibRadtran model, it is important to have ground-based measurements for validation. This is a current limitation.

3.3 Solar-simulated UVR values in irradiation terms.

Figure 3 shows the annual evolution of the daily UVR values for the cities simulated from UVSPEC/LibRadtran. The seasonal variation of mean values of UVR and IG are due mainly to astronomical factors. However, the variation of UVR and IG of the median, minimum value, maximum value) maybe strongly affected by the seasonal variation of climate (cloud, RH, precipitation) and environmental (O_3 , PM_{10}) conditions (Fig. 1). The mean daily values of IG and UVR were $21.78 \pm \text{MJm}^{-2}$, $21.17 \pm \text{MJm}^{-2}$, $19.56 \pm \text{MJm}^{-2}$ and $1414.76 \pm 265.06 \text{ kJm}^{-2}$, $1297.60 \pm 237.69 \text{ kJm}^{-2}$, $1229.02 \pm 240.67 \text{ kJm}^{-2}$, for Antofagasta, Santiago, Concepcion respectively. Monthly average daily values of UVR vary from a minimum of $563.53 \pm 74.78 \text{ kJm}^{-2}$ in Concepcion (June) to $1925.45 \pm 236.83 \text{ kJm}^{-2}$ in Santiago (December). The maximum UVR values occurred during the austral summer (January) when ozone and CF are minimum (Figs. 1d, e). In contrast, the minimum values of UVER occurred during the austral winter months when cloud fraction is maximum and ozone increases towards spring maximum (Figs. 1 e, d). The average daily values of IG ranged from a minimum of 9.07 MJm^{-2} in Concepcion (June) to a maximum of 31.20 MJm^{-2} in Santiago (January). During winter the air pollution conditions deteriorate in Santiago and Concepcion and the MP_{10} concentration and other trace gases (nitrogen dioxide and sulfur dioxide) increase (Gallardo et al., 2002), attenuated the solar radiation beam and contributing to reducing UVER and IG at the surface.

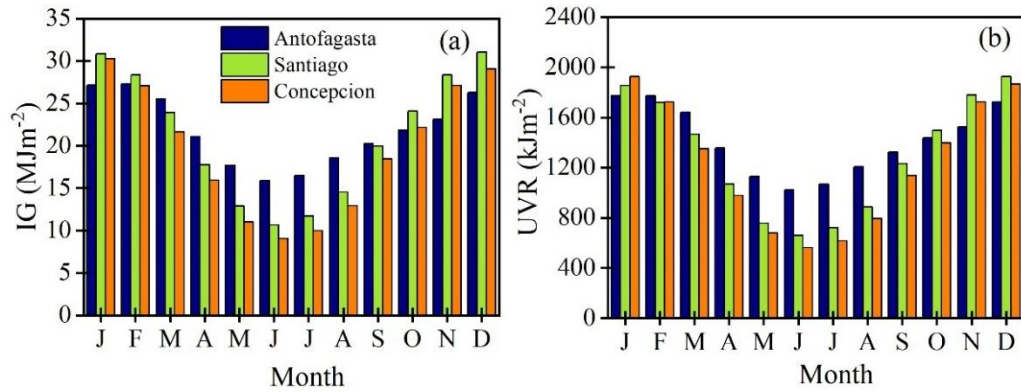


Figure 3. Seasonal variation of simulated daily values of (a) IG and (b) UVR in Antofagasta, Santiago y Concepcion.

Table 2 show the most representative statistical indices (mean, median, maximum, minimum, standard deviation, 1st and 3rd quartiles (Q1 and Q3), and 5th and 95th percentiles) of UVR (in kJm⁻²) for each month and the whole period (8-year).

Table 2. Statistical indices of solar-simulated UVR (kJm⁻²) in Antofagasta, Santiago y Concepcion for the 8-year period.

Month	Mean	Median	Max	Min	σ	Q1	Q3	P5	P95
Antofagasta									
J	1773.13	1848.72	2216.68	647.67	324.50	1720.31	2014.64	1562.02	2142.73
F	1772.90	1872.36	2157.18	452.69	282.88	1650.71	1864.95	1206.43	1958.69
M	1642.02	1714.09	1948.93	585.33	248.33	1394.40	1611.62	950.87	1748.25
A	1356.82	1427.25	1686.61	560.45	239.49	988.97	1224.95	648.51	1334.19
M	1129.58	1166.68	1376.82	544.88	161.13	663.26	880.58	481.46	965.14
J	1021.16	1074.16	1190.11	565.77	134.73	593.11	741.99	436.70	781.17
J	1067.06	1114.80	1325.11	435.86	165.70	631.56	817.52	472.46	888.78
A	1206.40	1260.91	1610.14	440.42	223.76	680.46	1080.88	508.66	1205.49
S	1324.49	1370.63	1876.50	360.79	327.84	1045.16	1463.50	681.47	1537.55
O	1436.42	1452.05	2097.53	594.82	362.20	1283.35	1788.22	690.65	1897.70
N	1524.53	1556.69	2196.72	620.01	382.70	1749.95	2030.69	797.26	2095.78
D	1722.60	1765.95	2235.05	657.24	327.45	1872.29	2072.39	1405.11	2158.29
Period	1414.76	1468.69	1826.45	538.83	265.06	1262.62	1607.99	905.11	1749.82
Santiago									
J	1856.62	1878.66	2206.78	343.19	226.33	1720.31	2014.64	1562.02	2142.73
F	1719.08	1783.63	2034.60	410.88	259.74	1650.71	1864.95	1206.43	1958.69
M	1467.52	1500.21	1848.11	378.72	241.16	1394.40	1611.62	950.87	1748.25
A	1070.80	1102.05	1413.95	416.15	212.15	988.97	1224.95	648.51	1334.19
M	756.98	760.01	1034.01	378.85	153.70	663.26	880.58	481.46	965.14
J	659.79	706.22	822.54	368.75	109.52	593.11	741.99	436.70	781.17
J	721.87	757.41	945.20	404.92	128.16	631.56	817.52	472.46	888.78

A	885.53	914.27	1280.47	387.38	228.04	680.46	1080.88	508.66	1205.49
S	1232.60	1326.99	1630.24	413.52	287.02	1045.16	1463.50	681.47	1537.55
O	1495.06	1613.92	2016.28	245.94	371.62	1283.35	1788.22	690.65	1897.70
N	1779.95	1931.21	2159.06	296.37	398.01	1749.95	2030.69	797.26	2095.78
D	1925.45	1989.19	2225.16	771.01	236.83	1872.29	2072.39	1405.11	2158.29
Period	1297.60	1355.31	1634.70	401.31	237.69	1189.46	1465.99	820.13	1559.48
Concepcion									
J	1924.43	2006.56	2198.52	478.34	273.92	1926.01	2054.77	1354.92	2121.05
F	1721.82	1800.13	2025.75	478.10	278.75	1699.09	1871.30	1151.64	1958.67
M	1349.73	1385.42	1737.41	418.08	256.45	1288.05	1529.73	776.53	1636.52
A	977.45	999.36	1311.00	423.07	183.93	883.62	1107.19	595.40	1242.20
M	679.51	681.38	959.91	360.95	113.42	604.88	760.92	487.47	846.91
J	563.53	573.79	709.54	357.91	74.78	522.30	618.99	430.94	668.79
J	616.93	615.89	870.29	382.97	91.87	555.06	684.68	458.60	760.29
A	793.94	796.76	1178.82	381.66	171.81	665.62	919.94	510.00	1061.22
S	1137.34	1207.26	1614.60	413.32	260.56	1012.74	1305.71	613.44	1502.81
O	1395.97	1509.85	1957.96	335.47	373.19	1129.02	1700.69	688.96	1828.57
N	1722.00	1904.51	2134.47	337.13	400.29	1584.49	1979.54	809.82	2065.24
D	1865.63	2040.45	2244.83	355.24	409.10	1756.97	2116.08	935.07	2171.89
Period	1229.02	1293.45	1578.59	393.52	240.67	1135.65	1387.46	734.40	1488.68

3.4 Comparative analysis between solar-simulated/reported UVR.

The integration of solar energy in the photocatalytic process is a solar active strategy aligned with the current international sustainability. Solar energy is one of the most sustainable, safe, abundant renewable energy sources and avoids potential mercury contamination associated with lamps in the disinfection process (Mbonimpa et al., 2018). To the best of our knowledge, PSA is the institution where most of the practical pilot-scale experiments have been carried out <http://www.psa.es/>. Therefore, most of the examples in Table 3 are concentrated in PSA pilot plants. Similarly, occurred with materials, the TiO₂ was the system more reported in pilot plants (Malato et al., 2000). Since the discovery of its photocatalytic activity, TiO₂ became one of the most used semiconductors with wide range of applications. It occurs in nature in three forms: anatase, rutile and brookite. Anatase usually exhibits the highest photocatalytic activity. TiO₂ possesses several unique properties: it has a strong oxidizing power under UV irradiation, it is photostable and chemically stable, biologically inert, inexpensive, nontoxic. Although other experimental studies at different latitudes using solar-reported UVR for the degradation of various microorganisms and organic pollutants have been reported and will also be included in the comparative analysis. To visualize the analysis, the solar-reported UVR values in the literature were converted into irradiance terms.

Table 3. Solar- reported UVR values in literature for pollutants degradation. The irradiation values calculated for a given reaction time are also provided.

Site (Latitude, Longitude)	Pollutants	Syste m	Experimentals Conditions	UVR (Wm ⁻²)	Tim e (h)	Irradiatio n (kJm ⁻²)	Ref.
----------------------------------	------------	------------	-----------------------------	----------------------------	--------------	--------------------------------------	------

Zamudio, Spain (43°N, 51°W)	Escherichia coli	TiO ₂	February and May from 10:30-16:30, CPC system	25	30	45	(Vidal and Di, 2000)
Jaen, España	Escherichia coli	-	06/06/2019 (36°C), 19/06/2019 (37°C), and 27/06/2019 (42°C)	50	3	540	(Vivar et al., 2020)
Murcia, Spain (37°59'N, 1°08'W)	8 pesticides	ZnO	CPC, Temp. 25 ± 2 °C	24	2	173	(Navarro et al., 2009)
Almería, Spain (37°N, 2.4°W)	Oxamyl	TiO ₂	CPC (Cloudy conditions) (pH=3),	12.5	3.5	157	(Malato et al., 2003)
			CPC (Sunny conditions) (pH=7.5),	23.4	3.4	286	
	ACTM, TBZ and IMZ	SphF	100 µg/L, pH 2.8, 20 mg/L Fe	30	1	108	(Carra et al., 2014)
Almería, Spain (37°N, 2.4°W)	Paracetamol	SphF	Paracetamol = 157.5 mg L ⁻¹ , H ₂ O ₂ = 200 mg L ⁻¹ and Fe ²⁺ = 20 mg L ⁻¹ .	33	0.4	48	(Jordá et al., 2011)
	CBM, FMQ, IBP, OFX, SFM	SphF like processes	RPRs at circumneutral pH by using the Fe ³⁺ : EDDS complex, pharmaceuticals (100 µg/L)	34	0.8	102	(Obra et al., 2017)
Mashhad, Iran (36.3°N, 59.6°E)	RB19	BiOI and graphene	10:00-14:00 (sunny conditions), Temp. (30-32°C), 0.05g (BiOI), 100 mL of RB19 solution (20 mg L ⁻¹)	13.5	2	97.2	(Mahmoodi et al., 2018)
Gainsville, FL, USA	BTEX	TiO ₂	BTEX (10ppb)	28	3	302	(Alfano et al., 2000)
Barranquilla, Colombia (11°N, 74°W)	CBZ and DCF	Wetland-SphF		27.2		293.8	(Casierramartinez et al., 2020)
			10:00 to 13:00	29.2	3	315.4	
				33.3		359.7	
Porto Alegre, Brazil, (30°S, 51°W)	RhB	BiOI	50 mg (BiOI), 50 mL of RhB	11.5	1.5	62	(Ribeiro et al., 2019)
Ciudad Real Spain (39°N,)	synthetic apple juice wastewater contaminated with BTEX	SphF/Ferrioxalate	sunny days between 12:00 to 14:00, BTEX = 2 mg/L, CPC Pilot Plant	34.7*	1.1	140	(Durán et al., 2012)
Petaling Jaya, Malaysia	Wastewater from a sewage system	TiO ₂	FPC and CPC collectors of 1000-600 l/m ²	40 30	-	-	(Jubran et al., 2000)

(3.6°N, 101.60° E)							
Arica, Chile (18.27°S, 70.31°W)				11*		19.8	
Concepción, Chile (36.83°S, 73.03°W).	2,5-DHBA	ZnO	pH 5.4 and 1.33 g L ⁻¹ (ZnO).		0.5		(Antil- Martini et al., 2017)
				7*		12.6	

Oxytetracycline (OTC) BTEX (mix pf pollutants: Benzene, Toluene, Ethylbenzene y Xylene), dye (RB19), 2,5-dihydroxybenzoic acid (2,5-DHBA), Ibuprofen (IBP), peroxydisulphate (Na₂S₂O₈), bisphenol A (BPA), Carbamazepine (CBZ), diclofenac (DCF), dichloroacetic acid (DCA), 4-chlorophenol (4CP), 8 pesticides: azoxytrobin, kresoxim-methyl, hexaconazole, tebuconazole, triadimenol, and pyrimethanil (fungicides), primicarb (insecticide), and propyzamide (herbicide), SphF – solar photo-Fenton, FPC – flat plate collector, RPR Raceway pond reactor. *Measured UVA with UVX digital radiometer at 360 nm

For the comparative analysis, the solar-simulated UVR values were integrated into monthly average UVR values. These values ranged from a minimum value of 563.53±23.94 kJm⁻² (Concepcion) in June to a maximum value of 1925.45±236.83kJm⁻² (Santiago) in December. Annual UV irradiation values were 1414.76±265.06kJm⁻², 1297.60±237.69kJm⁻² and 1229.04±240.67kJm⁻² were obtained for Antofagasta, Santiago and Concepcion, respectively. Figure 4 also displays the comparative analysis between the solar-simulated UVR from LibRadtran and the values reported in literature. It clearly shows that with the UVR values obtained for Antofagasta, Santiago and Concepcion and replicating the experimental conditions of each author, most of the pollutants (Table 3) could be degraded in any month of the year. Among the cities studied, Antofagasta has the highest solar UVR potential, even in months where the received UVR was minimum (JJA) exceeds ~30% the solar-simulated UVR values for Santiago and Concepcion, respectively.

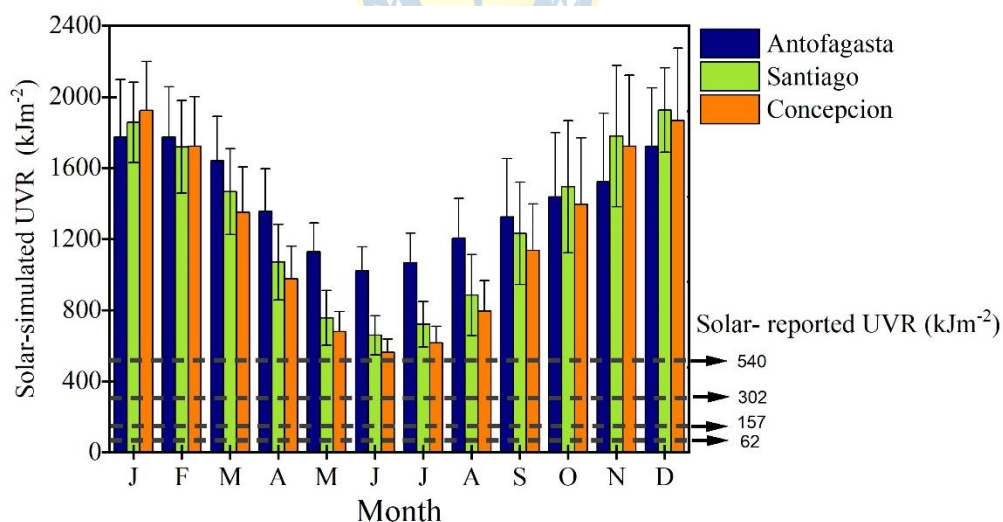


Figure 4. Solar-simulated UVR values for Antofagasta, Santiago and Concepción and reported for degradation of pollutants around the world.

In view of the overhead results, it can be concluded that solar photocatalysis of pollutants is possible, for the vast majority of cases described in the literature, with the UVR recorded in the three cities of Chile.

Having a better performance in the city of Antofagasta. This is due to the fact that the location towards the equator favors higher UVR values, associated to the relatively low values of total column ozone, the low presence of clouds and atmospheric aerosols. Also, the high temperature values and scarce precipitations. However, the experimental conditions found in the literature are diverse, so it is difficult to make a homogeneous comparison in all cases. Moreover, radiation alone does not contribute to the best performance of solar technologies, since other operating parameters, e.g., catalyst mass, pollutant concentration, pH, temperature, etc., must be taken into account. Also, some authors make reference to this magnitude, but without specifying the wavelength range that integrates the measurement, the time range of the measurement or the radiometric equipment used. Other research reported the IG data, because their catalyst apparent only absorb VIS radiation. This band is the most abundance of IG (Escobedo et al., 2009). This is probably the most promising step for the actual and future research. Hence, this work is a preliminary study to evaluate the spectral irradiance effects on the outdoor experiments (photocatalysis and solar disinfection) performance in the Chilean territory.

Conclusions

1. The present contribution can be considered as the basis for future studies related to temporal and spatial variations of solar UVR in central Chile.
2. Based on the comparative analysis it can be concluded that solar photocatalysis is possible for most of the cases reported in this study, with the UVR recorded between latitudes (-24°S until -37°S). However, the experimental conditions found in the literature are very varied, so is difficult to make a homogeneous comparison in all cases.
3. The UVSPEC/LibRadtran radiative transfer model was applied in three Chilean cities with different climatic zones, for obtain solar-simulated UVR. The input data for the model include: altitude, latitude, TOC, CF and AOD parameters. To improve K ratio, we need site characteristics, land use, more accurate aerosol values and CF with better resolution (100km). The performance of the LibRadtran model will be validate in further investigation with UVR ground based measurements.
4. This research motivates further studies on spectral radiation and emerging advanced oxidation technologies and the development of prospects for water and wastewater treatment.

Data Availability: solar-simulated UVR data that has been used in this study for all sites are available on request to Lisdelys González-Rodríguez.

Acknowledgments: The authors thank ANID (21170226) for Ph.D. Grand and AERONET for making the AOD data available for public use.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN GENERAL

En las últimas décadas, se ha prestado mucha atención a la intensidad de radiación solar espectral ultravioleta (RUV) que llega a la superficie terrestre debido a la disminución y cambios en la columna de ozono (O_3) estratosférica (Bornman et al., 2019). Esto ha provocado que se reciban altos valores de RUV en el hemisferio sur desde la primavera hasta otoño (Rivas et al., 2015, 2014b, 2014^a); (Cordero et al., 2016). Esta radiación tiene un impacto perjudicial en la salud humana por la exposición directa a la luz solar (Lucas et al., 2006), (Bernhard et al., 2020), (Rivas et al., 2020), además, de un impacto indirecto como catalizador de reacciones químicas en ambientes contaminados al potenciar los contaminantes fotoquímicos como el O_3 troposférico (González-Rodríguez et al., 2021b). Ambos efectos negativos se han reflejado en el aumento de enfermedades en la piel en Chile (MMA, 2020), (IARC, 2021). Por otro lado, la RUV también incluye aspectos beneficiosos como, síntesis de la vitamina D (Rivas et al., 2015), y su uso como fuente de energía en procesos de desinfección (Sagripanti and Lytle, 2020) y fotocátalisis solar homogénea y heterogénea (Malato et al., 2016). Debido a estos efectos biológicos, fotoquímicos y al rápido avance del tratamiento de aguas residuales mediado por diversos materiales y el espectro solar, su análisis y cuantificación de la RUV es de gran interés. Sin embargo, existen pocos estudios sobre las dosis recibidas en los períodos de exposición de los trabajadores y sus susceptibilidades individuales; así como escasas mediciones y series de tiempo extensas de RUV. Esto particularmente preocupante en Chile, y especialmente en el centro, donde se concentra la mayor población del país. Este es el motivo por el cual en esta tesis se propuso; cuantificar la radiación solar espectral ultravioleta (UVER o RUV) que llega a la superficie terrestre en Chile Central y proponer herramientas que estimen valores de radiación solar espectral ultravioleta para su uso en cualquier estudio futuro que requiera datos sobre UVER o RUV (variación espacio-temporal, valores promedios horarios o diarios, así como en potenciales aplicaciones) en sitios de Chile.

En esta tesis doctoral se trabajó con datos de radiación solar espectral UV-B (280-315nm), mediante la información que brinda el UVER (280-315nm) (Capítulo 4, Resultados 4.1, 4.2 y 4.3.1) y se simularon valores de RUV (200-400nm) (Capítulo 4, Resultados 4.3.2). Se comenzó la investigación con la serie de tiempo 2015-2018 y a medida que terminaba el año se adicionaba al datasets primario horario, terminando esta tesis con mediciones UVER horarias y diarias de largo plazo durante el período de 2015-2020 (6 años). Los valores de RUV se simularon para un período de 8 años. Se incluyó en el estudio las ciudades de, Antofagasta, Valparaíso, Santiago, Rancagua y Concepción. Por sus características climáticas, demográficas y geográficas se dedicaron dos trabajos a la zona más poblada del centro de Chile, Santiago de Chile, (Capítulo 4, Resultados 4.1, 4.2).

Atendiendo a la posibilidad de evaluar el impacto directo e indirecto que tiene el UVER en la salud de las personas, se determinó los niveles de UVER (horario y diario) y se calculó dos índices de eritema (ver sección 2.4), el índice (UVI) y las dosis mínimas eritemática (MED) para cuatro fototipos de piel (I-IV) bajo todas las condiciones de cielo durante el período 2015-2018. Además, el impacto indirecto se analizó (Fitzpatrick, 1988) la relación que tiene el UVER y algunos contaminantes fotoquímicos que afectan a la región metropolitana, dióxido de nitrógeno (NO_2) y O_3 troposférico. Es importante aclarar que este trabajo (Resultado 4.1) se enfocó en evaluar los altos valores UVER que alcanzan la superficie de Santiago para todas las condiciones de cielo, además de reconocer las condiciones medioambientales, topográficas y meteorológicas de esta urbe. Se identificó las condiciones meteorológicas y atmosféricas características

de la ciudad de Santiago a través de mediciones in situ. Se incluyó la lluvia, temperatura, velocidad del viento, nubosidad (CC), NO₂ y O₃ troposférico y estratosférico (TOC). Se encontró que los niveles de la columna total de O₃ (TOC) continúan bajos desde finales de la primavera (≤ 300 DU) y se extiende hasta mayo (Resultado 4.1, Figura 2d). Resultando evidente la relación inversa que existe entre el UVER y la concentración de O₃ atmosférico (Resultado 4.1, Figura 3). Por lo que era de esperarse valores elevados de UVER en los meses de verano, alcanzando un valor máximo de 5,67 kJm⁻² coincidente cuando el TOC, CC y aerosoles eran bajos (Resultado 4.1, Figura 4 y Figuras 2d, c, b). El valor mínimo de 0.52 kJm⁻² se identificó en el mes de junio. El valor medio anual del UVER fue de 2,95 kJm⁻², con un máximo absoluto de 7,22 kJm⁻² medido en el mes de enero (Tabla 9). Es importante revelar que, los niveles de UVER que llegan a la superficie de Santiago durante los meses más cálidos fueron tan altos como valores de UVER reportados en lugares por encima de los 1000 m.s.n.m. en, Salta, Argentina (24.79°S, 65.41°W, 1190 m.s.n.m) (Utrillas et al., 2016), Leh, India (34.09°N, 77.34°E, 3441 m.s.n.m) (Singh and Singh, 2004), o Total Grande, Argentina (24.59°S, 67.40°W, 3560 m.s.n.m) (Suárez et al., 2018). Valores máximo y mínimo de UVER se compararon con su cuartil correspondiente para verificar si son representativos de las observaciones agrupadas. Al comparar los valores medios mensuales del UVER la diferencia entre el cuartil Q1 y el valor mínimo era del 95%, mientras que la diferencia entre el cuartil Q3 y el valor máximo era del 31%. Esto indica que los niveles mínimos de UVER son valores inusuales, mientras que los niveles máximos observados pueden considerarse como un valor de UVER más representativo del mes. Además, el coeficiente de variación muestra valores más bajos para los meses de verano (14.43% en febrero), lo que significa que estos meses tenían menos variabilidad los valores de UVER medidos. Los meses de septiembre a noviembre mostraron altos valores de desviación estándar que pueden explicarse por cambios en los factores de atenuación atmosférica, como los aerosoles atmosféricos y el CC (Resultado 4.1, Figura 2b, c). Una descripción estadística de lo discutido puede verse en la siguiente Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros estadísticos para los valores diarios de UVER medido en Santiago de Chile (2015-2018).

Mes	UVER acumulado (kJm ⁻²)											
	Mean	Median	Max	Min	σ	SE	CV	Q1	Q3	P5	P95	N
J	5.67	6.18	7.22	1.68	0.70	0.11	20.82	5.12	6.41	3.40	6.95	120
F	5.29	5.36	6.62	2.86	0.76	0.08	14.43	4.89	5.81	3.78	6.40	102
M	3.48	3.66	4.99	0.93	0.87	0.08	25.05	2.93	4.07	1.78	4.77	113
A	1.87	1.92	3.64	0.19	0.75	0.07	39.96	1.33	2.52	0.58	2.88	107
M	0.84	0.85	1.86	0.04	0.36	0.03	43.38	0.57	1.10	0.25	1.43	113
J	0.52	0.51	0.90	0.08	0.21	0.02	40.16	0.37	0.73	0.19	0.81	97
J	0.53	0.55	1.01	0.04	0.23	0.02	43.51	0.36	0.69	0.14	0.87	93
A	0.94	0.91	2.10	0.22	0.45	0.04	47.73	0.55	1.20	0.30	1.76	106
S	1.90	1.92	3.64	0.13	0.89	0.08	45.24	1.28	2.53	0.43	3.24	115
O	2.96	3.14	5.01	0.58	1.05	0.10	35.26	2.27	3.77	0.94	4.42	114
N	4.84	5.20	5.93	1.04	1.04	0.10	21.06	4.52	5.49	2.69	5.75	114
D	5.61	5.81	7.16	0.46	0.80	0.10	18.87	5.20	6.29	3.78	6.88	122
Período	2.95	2.61	7.22	0.04	2.13	0.06	72.11	0.88	5.00	0.33	6.36	1316

Desviación estándar (σ), error estándar (SE), coeficiente de variación (CV), primer y tercer cuartil (Q1 y Q3), percentil 25 (P25) percentil 95 (P95), número de observaciones (N).

Antes de realizar el cálculo y análisis de los índices de eritema se cuantificó los valores horarios de irradiancia mensuales mediante un gráfico de isolíneas (Resultado 4.1, Figura 5). Los valores medios horarios más elevados de UVER fueron de $0,26 \text{ Wm}^{-2}$ cerca del mediodía solar en enero, mientras que los valores más bajos fueron de $0,00 \text{ Wm}^{-2}$ de mayo a julio. Donde se encontró que en el verano al mediodía solar la variabilidad del UVER era baja ($\text{CV} = 18,2\%$) comparado con los meses de mayo a septiembre con presentaron una variabilidad de $44,1\%$. Durante el periodo entre octubre y marzo (la mitad del año), los niveles de UVER cerca del mediodía solar fueron siempre elevados ($> 0,15 \text{ Wm}^{-2}$), valore equivalente a $\text{UVI} = 6$ que en la clasificación de riesgo por EPA (EPA, 2020) (ver sección 2.4) corresponde a "Riesgo Alto" lo que indica un alto potencial de ser perjudicial para la salud humana según la OMS/WHO (WHO, 2002^a). El análisis de este índice eritemático UVI indicó que, en Santiago, los niveles más altos de UVI se registran en enero con un valor de 14 validado como "Riesgo Extremo". En el verano, durante 5 horas continuas en el día los valores del UVI fueron ≥ 6 clasificado como "Riesgo Alto" (Resultado 4.1, Figura 6). En estas condiciones, las quemaduras solares ocurren fácilmente (McKenzie et al., 2009) incluso en fototipos de piel más resistentes III y IV, característicos de la población chilena (Zemelman et al., 1990). Asimismo, a finales de otoño (mayo) e invierno (agosto) se registraron valores de $\text{UVI} \geq 5$ cerca del mediodía solar (Resultado 4.1, Figura 6).

En la Figura 16 se muestra la acumulación media de cada mes independientemente de la condición del cielo. A su vez también se tiene en cuenta el número de dosis mínima eritemática (MED) recibidas a lo largo del día para una persona del fototipo I y IV ($\text{MED}_{\text{I-IV}} = 150$ y 450 Jm^{-2}). En ella se muestra que la máxima acumulación diaria ocurre en el mes de enero, con $5,70 \text{ kJm}^{-2}$ correspondiente a $28,35 \text{ MED}_{\text{I}}$ y $15,54 \text{ MED}_{\text{IV}}$. Para conocer las dosis acumuladas en los fototipos intermedios (II y III) revisar (Resultado 4.1, Figura 7b, c). El máximo acumulado en una hora fue $0,95 \text{ kJm}^{-2}$, también se da en enero entre las 12:00 y las 13:00 LT (Resultado 4.1, Tabla 5). En las horas centrales es cuando más aumenta la irradiación acumulada. Las mínimas ocurren en invierno con valores de $0,53 \text{ kJm}^{-2}$ ($2,61 \text{ MED}_{\text{I}}$ y $1,16 \text{ MED}_{\text{IV}}$). Estas dosis UVER ($\text{MED}_{\text{I-IV}}$) exceden largamente el valor límite umbral recomendado por la WHO, ($\sim 100 \text{ Jm}^{-2}$) para una exposición de 8h sin riesgo para la salud, por lo que los diferentes fototipos cutáneos (I-IV) están expuestos al daño eritemático la mayor parte del año. Por lo tanto, es necesario evitar la exposición entre las 12:00 y las 15:00 LT dado que representa el 80% de la dosis eritemática diaria acumulada o usar siempre protección solar para reducir el riesgo de daño en la piel y los ojos. Sobre todo, si se practican actividades al aire libre en un período de tiempo prologado, como, el fútbol, deportes de nieve en la montaña, actividades en la playa así como para los trabajadores al aire libre (Modenese et al., 2018; de Troya Martín et al., 2020).

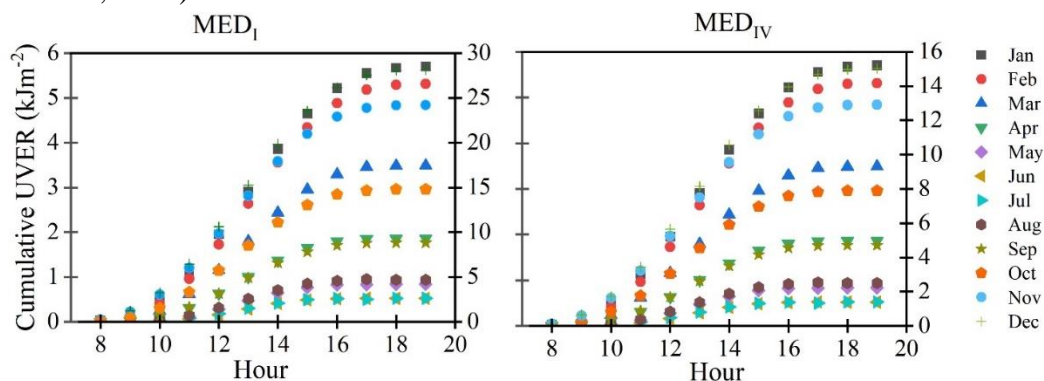


Figura 16. Media UVER acumulada y dosis MED I y IV, según la hora y para cada mes del año; Santiago

de Chile.

Por otro lado, fueron analizadas las mediciones de concentraciones horarias de O_3 troposférico durante el período 2015-2018. Se encontró que las concentraciones de O_3 troposférico son muy altas en los meses de verano, superando valores de 70 ppbv. Donde la concentración media máxima de O_3 en superficie alcanza su valor máximo al mediodía solar, 1 hora después de la intensidad máxima de la radiación solar. Esto ocurrió en los días con altos valores de UVER y condiciones con menor presencia de aerosoles atmosféricos PM_{10} , NO_2 , nubosidad y TOC como muestra la Figura 17. Lo que indica que una atmósfera translúcida favorece que el UVER entrante sea menos dispersado u absorbido y llegue a la superficie terrestre con la energía necesaria para desarrollar la fotoquímica implicada en la producción de O_3 troposférico en presencia de precursores (NO_x y COV).

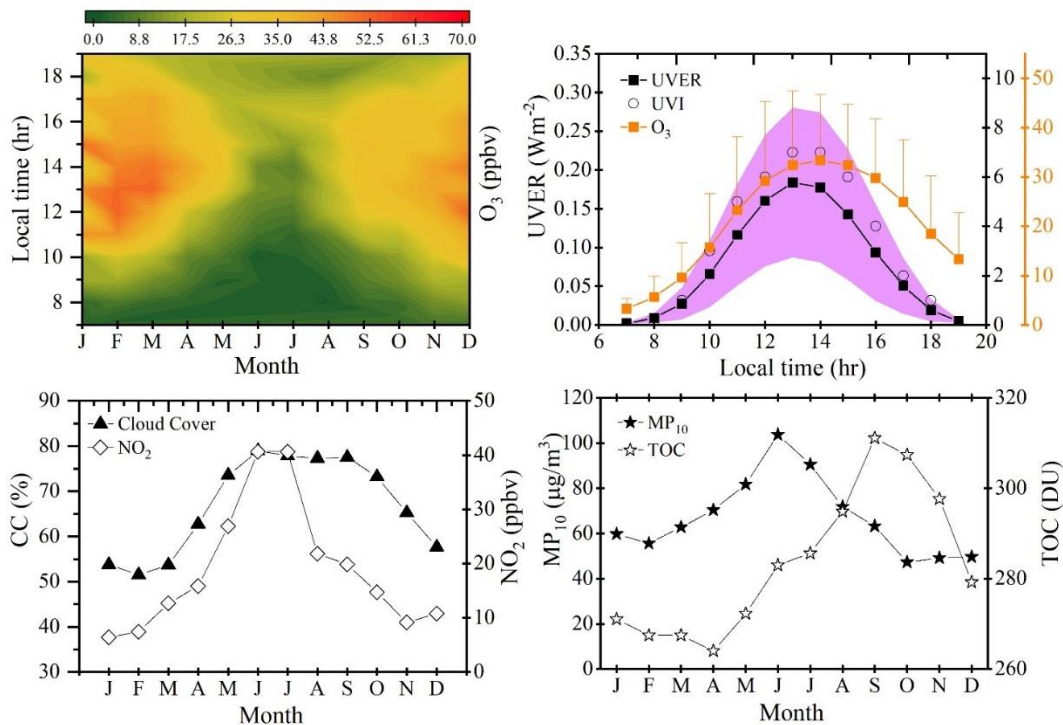


Figura 17. Variación horaria mensual de O_3 troposférico, promedio horario de UVER, UVI y O_3 troposférico, variabilidad anual de condiciones meteorológicas y medioambientales en Santiago, Chile durante 2015-2018.

Los valores máximos fueron coincidentes con otros estudios realizados en la capital chilena (Rappenglück et al., 2000; Rubio et al., 2004; Seguel et al., 2020). Para el periodo analizado se comprobó que 13 días superaban el límite de concentración de O_3 de 61 ppbv para 8 hrs. Si se cumple la directriz de la OMS/WHO (WHO, 2005) de 50 ppbv para 8 hrs., 147 días superaron este límite propuesto. Por lo tanto, los niveles actuales de O_3 troposférico observados en Santiago durante los meses más cálidos se consideran inseguros para los grupos sensibles y el medio ambiente. Se realizó correlación de Pearson para evaluar el impacto indirecto que tiene el UVER sobre la formación de O_3 troposférico en la superficie de Santiago. Encontrándose una correlación positiva ($p < 0.05$, $r = 0.67$), que indica que la fotoquímica vinculada a la producción de O_3 está fuertemente influenciada por los cambios en los niveles de UVER más que por el precursor NO_2 . Lo anterior se demostró con una comparación entre los valores horarios de UVER, O_3

troposférico y su precursor NO₂ (Resultado 4.1, Figura 9). El resultado mostró que los niveles de O₃ troposférico fueron mayores durante los días con valores altos de UVER, cuando los niveles de NO₂ fueron similares (ver Resultado 4.1, Fig. 8a), así la concentración de O₃ troposférico se incrementa siempre cuando los niveles de UVER superan los 0,10 Wm⁻² (UVI=4) como se muestra en la Figura 18 Para observar esta comparación de forma estacional ver (Resultado 4.1, Figura 9).

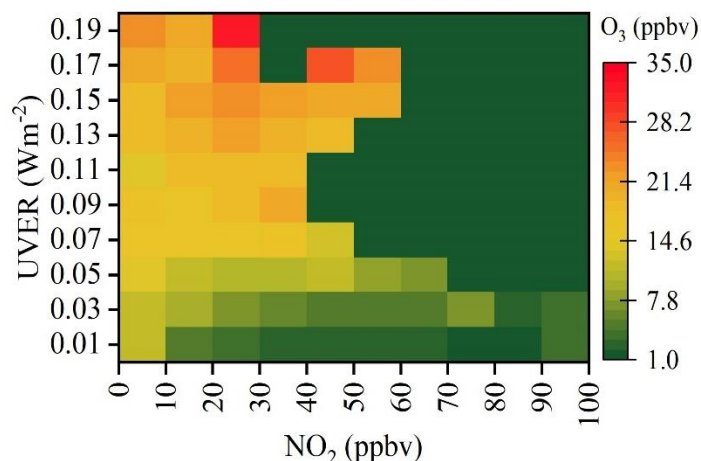


Figura 18. Comparación del UVER con las concentraciones troposféricas de O₃ y NO₂ empleando valores horarios del período 2015-2018.

La ciudad de Santiago tiene la mayor red de vigilancia de la calidad del aire del país; sin embargo, variables importantes como los hidrocarburos no metánicos (NMHC) y algunos compuestos orgánicos volátiles (COV) se han dejado de utilizar desde hace décadas. Por lo tanto, es pertinente seguir vigilando biogénicos y antropogénicos para mejorar la comprensión de la formación de O₃ troposférico en Santiago y aplicar estrategias de control de la contaminación atmosférica bajo el cambio climático. Varios estudios han sugerido que las ciudades con alta contaminación atmosférica y nubosidad hay una disminución de la RUV (Antón et al., 2008b; Wang et al., 2014b); sin embargo, el Resultado 4.1 mostró que en Santiago, a pesar del efecto de dispersión/absorción que puede afectar los valores de RUV en su paso por la atmósfera (Jacovides et al., 2009), la radiación solar espectral ultravioleta (UVER) que alcanza la superficie es energéticamente suficiente para causar quemaduras solares y aumentar los niveles de O₃ troposférico desde finales de la primavera hasta principios del otoño.

En el Resultado 4.2 se cuantificó los valores de UVER (diario y horario) en Santiago de Chile (2015-2019), esta vez abordando por primera vez las mediciones bajo diferentes condiciones de cielo empleando el índice de claridad o K_T (ver sección 2.6.1). También se evaluó el riesgo de la población a sufrir daños en la piel mediante con el uso del UVI y MED, pero se adicionaron otros índices de eritema: dosis eritemática estándar (SED) y tiempo de exposición (t_{ery}) (ver sección 2.4). En este trabajo cuando se evaluó la MED solo se consideraron los fototipos de piel característicos de Chile (III y IV) (Zemelman et al., 1990). Por último, se desarrolló un set de modelos horarios y diarios nuevos para cuantificar el UVER desde medidas de radiación global (IG) (ver sección 2.7), ya que estas mediciones se encuentran con mayor frecuencia y distribución en el territorio.

La distribución de frecuencias de los valores diarios de K_T indica que en Santiago hay cielos despejados el 20,3% de los días; los cielos están parcialmente despejados el 30,6% de los días, parcialmente nublados el 31,3% y nublados el 17,8%. En Santiago, el valor promedio bajo todas las condiciones de cielo fue

similar al encontrado en el Resultado 4.1 ya que solo se adicionó un año en el análisis (2019). Para ver en detalle los valores medios diarios de UVER y variables relacionadas bajo todas las condiciones de cielo ver Resultado 4.2, Tabla 2. El impacto de las condiciones del cielo en la distribución estacional de los valores diarios de UVER se indica en la Figura 19. El valor máximo diario de UVER ($6,27 \pm 0,04 \text{ kJm}^{-2}$) se produce en verano (enero) bajo condiciones de cielo despejado, y el mínimo ($0,31 \pm 0,02 \text{ kJm}^{-2}$) se produce en invierno (junio) en condiciones de nubosidad. La diferencia entre los valores diarios de UVER en condiciones de cielo despejado y nublado es, por término medio, mayor durante el verano ($4,34 \pm 0,47 \text{ kJm}^{-2}$) y menor durante el invierno ($0,34 \pm 0,06 \text{ kJm}^{-2}$). La diferencia entre cielos despejados y parcialmente despejados o parcialmente nublados desciende a $1,96 \pm 0,09 \text{ kJm}^{-2}$.

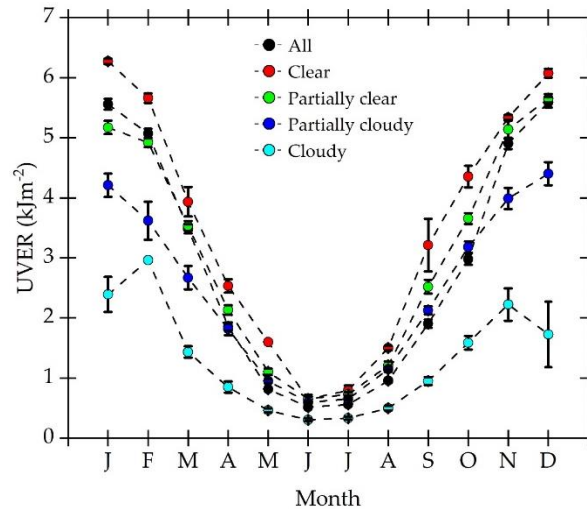


Figura 19. Distribución estacional de los valores medios diarios mensuales de UVER para todas las condiciones cielo, despejado, parcialmente despejado, parcialmente nublado y nublado observados durante 2015-2019 en Santiago.

Las observaciones realizadas de 8:00 a 19:00 LT, muestran la variación estacional de la evolución diurna del UVER en función del estado del cielo. Los valores medios horarios mensuales del UVER en condiciones de todo el cielo se encuentran entre $0,26 \text{ Wm}^{-2}$ y $0,03 \text{ Wm}^{-2}$ durante el periodo de horas centrales (Figura 20a). Similarmente a los valores diarios, las mayores diferencias se dan entre los cielos despejados y los nublados, con valores horarios de UVER superiores a $0,27 \text{ Wm}^{-2}$ (Figura 20b) y $0,12 \text{ Wm}^{-2}$ (Figura 20e), respectivamente. Los valores máximos hora de UVER disminuyen progresivamente desde $0,23 \text{ Wm}^{-2}$ en cielos parcialmente despejados hasta $0,19 \text{ Wm}^{-2}$ en condiciones de nubosidad parcial (Figura 20c,d). Como el UVI es la multiplicación de la irradiancia UVER (Wm^{-2}) por $40 \text{ m}^2\text{W}^{-1}$ (sección 2.4) con estos gráficos de isóneas es posible observar el UVI bajo diferentes condiciones de cielo. Se encontró que en los meses de verano, para todas condiciones de cielo, el UVI al mediodía solar alcanza una media de 10 (Resultados 4.2, Figura 4a), coincidiendo con el valor medio del UVI comunicado anteriormente por (Cabrera et al., 2012). En comparación con las condiciones de todo el cielo, el valor medio mensual del UVI por hora aumenta (disminuye) en 1 si el cielo está despejado (parcialmente despejado) (Resultados 4.2, Figura 4b, c).

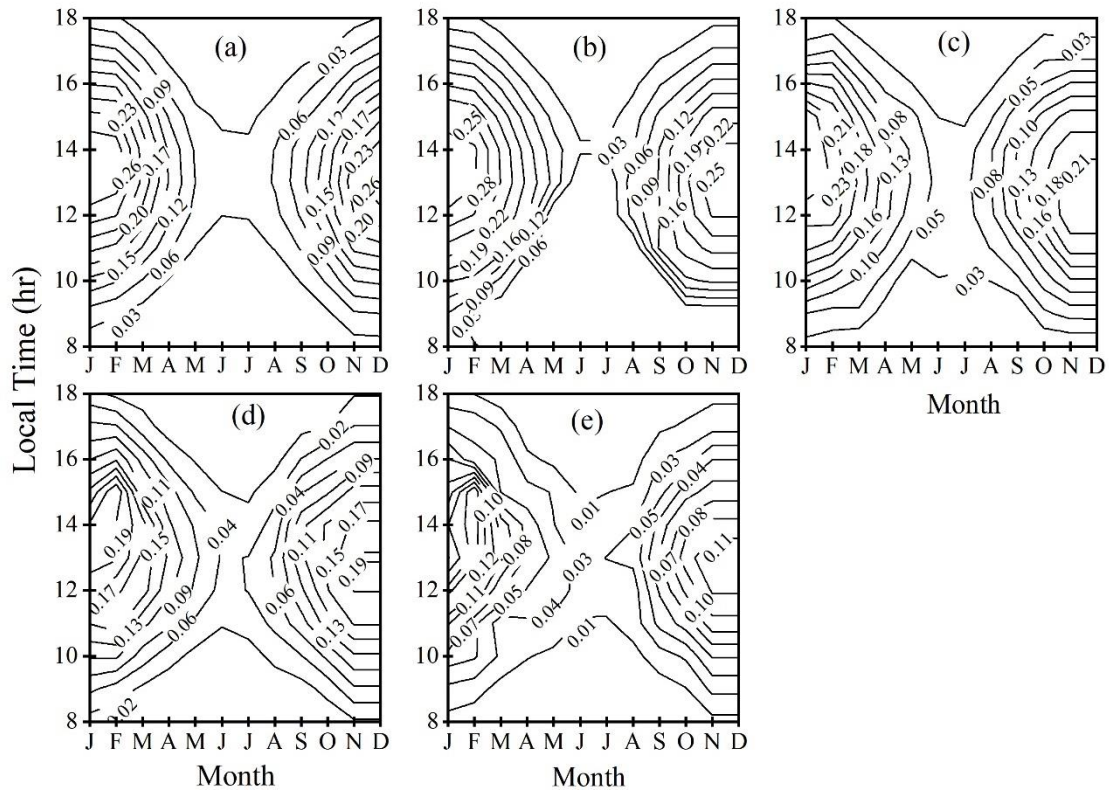


Figura 20. Gráfico de contorno de los valores medios horarios mensuales de UVER para (a) todas las condiciones de cielo, (b) despejado, (c) parcialmente despejado, (d) parcialmente nublado y (e) nublados observados durante 2015-2019 en Santiago.

En este trabajo al analizar los valores de $UVI \geq 6$ se llegó a resultados similares a lo discutido en el Resultado 4.1. El UVI máximo medido en Santiago correspondió a 13 que clasifica como “Riesgo Extremo”, bajo estas condiciones extremas los fototipos III y IV pueden sufrir quemadura solar en 10 min (Resultados 4.2, Figura 4 d). Ahora bien, cuando los valores de UVI están entre 3 y 4, una persona de tipo de piel III tarda 60 min en sufrir una quemadura solar, lo que estaría ocasionando una exposición crónica a la RUV sin advertir las consecuencias. Esto se demostró analizando los valores UVI bajos, cuando los individuos melano-competente (tipos de piel III y IV) pueden exponerse al sol durante un t_{ery} prolongado (2 o 3 hrs. respectivamente) (Resultados 4.2, Figura 4 d). Considerando el periodo comprendido entre las 8:00 y las 17:00 LT, se observa que el UVER acumulado varía de $3,31 \text{ kJm}^{-2}$ para cielos despejados a $2,75 \text{ kJm}^{-2}$ para cielos nublados (Resultados 4.2, Figura 5a), correspondiendo a la variación del SED de 33,14 y 28,04 (Resultados 4.2, Figura 5b). Bajo cielos parcialmente despejados y parcialmente nublados, los valores máximos acumulados de UVER disminuyen a 0,15 y $0,32 \text{ kJm}^{-2}$, respectivamente. En consecuencia, los SED mantienen valores elevados de hasta 29,98, y, por tanto, la presencia de nubes asociadas a condiciones de cielo parcialmente despejado y nublado no proporciona un filtro eficaz para la protección contra los rayos UV.

Simplemente una exposición desde las 11:00-13:00 LT bajo condiciones de cielo claro los fototipos III(IV) recibieron entre 6(5) veces la dosis mínima para causar eritema (Resultado 4.2, Figura 5c, d). Incluso en julio, se recibió la cantidad correspondiente a 1MED. En condiciones de cielo despejado y parcialmente despejado antes de las 11:00 LT, se observaron dosis diarias acumuladas de hasta $1,28 \text{ kJm}^{-2}$ en la ciudad

más poblada del país (Resultado 4.2, Figura 5a). Considerando las dosis MED_{III-IV} para ambos fototipos, dicha exposición es equivalente a 3 o 2 veces la cantidad mínima de radiación para desarrollar eritema (Resultado 4.2, Figura 5c, d). Por tanto, se recomienda aplicar protección solar como parte de la vida cotidiana debido a que las cantidades seguras de dosis se superan durante “horas seguras” (antes de las 11:00 LT).

Así el presente estudio reveló que los cielos nublados minimizan la intensidad del UVER, pero las dosis acumuladas superan los niveles recomendados por OMS/WHO (WHO, 2002b) incluso en individuos melano-competente (III y IV). Demostrándose que la población chilena está expuesta a un alto riesgo de desarrollar quemaduras solares y/o otros daños en la piel relacionados con el sol en el 46% de los días con $UVI \leq 5$. Resultado interesante, pues envía el mensaje que una exposición a niveles bajos de UVI (2) parece engañosa y la información reportada por la OMS/WHO de no proteger la piel en estas condiciones necesita reconsiderarse. Esto ocurre bajo condiciones de nubosidad y antes de las 11:00 LT durante la primavera, el verano y el otoño, cuando los índices de eritema (SED MED, y t_{ery}) indican que los valores de UVER son lo suficientemente altos como para causar quemaduras solares, aunque el UVI indica que es seguro. Por lo tanto, como parte de una estrategia más amplia e integrada de protección solar en Chile Central se recomienda incluir, además del UVI, los índices de eritema, SED, MED, y t_{ery} , las condiciones de cielo y la estación del año.

Reconsiderar la clasificación de riesgo actual del UVI por OMS/WHO (WHO, 2002b) sería un paso importante. El mensaje de recomendar la protección solar sólo a niveles de UVI de 3 y superiores, no está del todo correcto y debe ser discutida durante un proceso de actualización de los mensajes de salud pública a la población chilena. Algunos países son cautelosos con los mensajes de protección solar para la categoría de baja exposición. En Alemania, la recomendación oficial de la Comisión de Protección Radiológica (<https://www.ssk.de/>), fue que sólo los valores de UVI de 0 y 1 formaban la categoría “riesgo bajo”, no siendo necesaria la protección solar (SSK, 2004). Estados Unidos ha recomendado cubrirse y utilizar protección solar con UVI bajo si la persona se quema con facilidad (EPA, 2020). Un análisis reciente con 10 años de mediciones en Alemania confirma que una exposición solar a bajos niveles UVI puede causar daño en fototipos de piel sensibles (Lehmann et al., 2019). Por tanto, mensajes relacionados a la exposición solar a bajos niveles de UVI deben tratarse con cautela. Estos países conscientes, de la topográfica y la complejidad de la variabilidad climática tratan de sugerir que bajo niveles UVI (1 o 2) existe un “riesgo bajo” en lugar de “ningún riesgo” como informa la OMS/WHO y OMM, el PNUMA y la ICNIRP. Lo que se ajusta mejor y se ve respaldado por los resultados obtenidos en esta tesis, que indica que el peligro de la RUV en períodos prolongados de exposición, temprano en la mañana o bajo condiciones nubosas, aunque tenga un nivel bajo ($UVI=2$) ya que no es tan inofensivo como se supone.

Otra punto de interés pero esta vez analizando valores UVI de nivel “Riesgo Alto” y “Riesgo extremo” es la propuesta de modificación de la escala UVI realizada por (Zaratti et al., 2014). Los autores demuestran que la escala actual de UVI por OMS/WHO no es posible aplicarla tal como está a la situación de los habitantes del altiplano andino que va desde Chile hasta Colombia ya que sobrellevan una actividad solar que supera el límite de 11+ de la escala de la OMS/WHO en más del 50% de los días del año. Sugiriendo que cada país debe tener libertad de determinar el valor de extremo y adaptar la escala de colores y/o el tiempo máximo de exposición a la radiación solar, de acuerdo a los rangos de valores del UVI que se registran en su territorio y al fenotipo prevaleciente en su población.

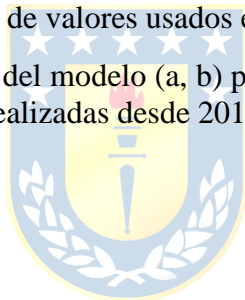
Con estos resultados, los funcionarios de salud pública o las personas preocupadas por la exposición al sol podrán conocer la cantidad de UVER, junto a las dosis estándar y mínima según la susceptibilidad

individual que se recibe en las ciudades estudiadas. Además de conocer el comportamiento del UVER considerando la variación estacional de la nubosidad, la topografía y otras características climáticas. Paso importante para ayudar a reducir el riesgo de quemaduras solares o cáncer de piel en ciudades pobladas del país. Se espera que esta información pueda combinarse con otros conjuntos de datos para identificar áreas de preocupación basadas tanto en una mayor exposición a la RUV como en otros factores de riesgo de cáncer de piel, así como el empleo en ocupaciones que requieren más tiempo al sol.

Dado el papel fundamental de la RUV y la falta de mediciones a largo plazo, nos enfrentamos a dos alternativas para su determinación: (1) el uso de modelos empíricos (ver sección 2.7.1), que estiman la RUV a partir de los parámetros que suelen medirse en la mayoría de las estaciones radiométricas y (2) modelos de transferencia radiativa que estiman la RUV considerando los procesos de dispersión y absorción que tienen lugar en el recorrido de la radiación a través de la atmósfera (ver sección 2.7.2). Ambos enfoques con el objetivo de obtener valores horarios y diarios de radiación solar espectral UVER (280-315nm) y RUV (200-400nm).

Se desarrolló y validó una serie de modelos horarios y diarios que permitieron predecir los valores de irradiancia e irradiación solar espectral (UVER) bajo diversos escenarios (Resultado 4.2). Los modelos empíricos horarios y diarios consideraron la variación estacional de la nubosidad y otras características climáticas. El mejor ajuste lo proporcionó el modelo cuadrático $UVER = aIG^2 + bIG + c$. El coeficiente c se fija en cero para asegurar que $UVER = 0$ cuando $IG = 0$ (Resultado 4.2, Figura 6). La Tabla 10 muestra los 50 modelos desarrollados y la cantidad de valores usados en su construcción.

Tabla 10. Presentación de los coeficientes del modelo (a, b) para los valores horarios y diarios de UVER en Santiago considerando observaciones realizadas desde 2015 hasta 2018.



Models	Hourly			Daily		
	a (10 ⁻⁷) W ⁻¹ m ²	b (10 ⁻⁵)	Number of Hours	a (10 ⁻³) MJ ⁻¹ m ²	b (10 ⁻²)	Number of Days
Season						
Summer	2.8	2.1	3860	-1.0	24	344
Autumn	2.8	1.2	2307	5.5	6	338
Winter	1.9	2.9	1547	3.0	5	322
Spring	2.1	6.0	3065	2.5	13	342
Sky condition						
Cloudy	7.4	-0.7	2023	14.0	3.9	231
Partially cloudy	5.1	-6.3	2513	10.8	0.3	417
Partially clear	3.8	-4.8	1880	8.4	0.1	386
Clear	3.0	-2.3	4363	5.2	6.9	312
Interactions (Season + Sky condition)						
Summer + Cloudy	8.1	-2.8	473	-	-	-
Summer + Partially cloudy	5.0	-6.2	707	-1.4	25	37
Summer + Partially clear	3.7	-3.9	596	0.5	19	101
Summer + Clear	3.2	-1.2	2084	-2.5	28	200
Autumn + Cloudy	6.4	-0.9	382	7.1	8	60
Autumn + Partially cloudy	4.5	-4.1	503	6.3	6	93
Autumn + Partially clear	3.7	-4.1	444	8.8	-1.5	135
Autumn + Clear	3.1	-0.6	978	8.3	7	53
Winter + Cloudy	2.8	4.1	438	6.5	5.5	101
Winter + Partially cloudy	3.2	-0.5	536	9.0	0.1	165
Winter + Partially clear	3.2	-4.2	354	5.0	1.9	58
Winter + Clear	2.4	-3.7	219	-	-	-
Spring + Cloudy	8.1	-0.2	730	3.3	14	69
Spring + Partially cloudy	5.1	-6.2	767	7.4	7.4	114
Spring + Partially clear	2.9	0.5	486	9.4	-1.5	77
Spring + Clear	3.2	-3.7	1082	8.1	-0.8	83
General						
All sky conditions	2.5	-2.0	10,779	5.2	7	1346

El desempeño de los modelos desarrollados para Santiago se investiga utilizando las mediciones de UVER e IG realizadas en 2019 como un conjunto de datos de validación. En la Tabla 11 se puede ver el desempeño de los modelos horarios. Los resultados de validación para los modelos diarios se pueden revisar en (Resultado 4.2, Tabla 5) La exactitud y precisión de los modelos se evaluaron con los estadísticos descritos previamente en la sección 3.6.

El MBE más bajo lo muestra el modelo horario de otoño. Los otros valores mínimos de los indicadores estadísticos son: RMSE = 0,006 Wm⁻² para el modelo Invierno + Nublado, NRMSE = 13,2% para el modelo Verano + Despejado, y MAPE = 12,82% para el modelo Verano + Parcialmente despejado. La

mayoría de los modelos arrojan valores de IA superiores a 0,90, lo que indica una buena puntuación para todos los modelos horarios, con las excepciones de Invierno + Parcialmente despejado (IA = 0,72), Invierno + Parcialmente nublado (IA = 0,89), Invierno + Nublado (IA = 0,86), y el modelo diario Primavera + Despejado (IA = 0,83). Este último modelo presenta el mayor MBE (-0,041 Wm⁻²), lo que indica que, para cielos despejados durante la primavera, los valores horarios modelizados para el UVER subestiman significativamente las observaciones. Además, los modelos de primavera + despejado y otoño + nublado muestran un bajo rendimiento según los indicadores RMSE (0,046 Wm⁻²) y NRMSE (80,1%), respectivamente. Según el indicador MAPE, los peores resultados, con valores estimados significativamente diferentes de los medidos, los presenta el modelo de primavera. En relación a los modelos diarios el MBE más bajo lo presenta el modelo Nublado con -0,015 kJm⁻². El modelo Verano + Parcialmente despejado presentó el menor NRMSE y MAPE con un error inferior al 10,0%, mientras que el modelo Invierno + Nublado indicó el menor RMSE (0,164 kJm⁻²). La mejor concordancia la presentó el modelo de otoño (IA = 0,99), seguido del modelo general (IA=0,98). Los peores IAs los presentaron los modelos Verano + Parcialmente despejado (IA = 0,73) e Invierno + Parcialmente nublado (IA = 0,77). Cuando el tamaño del conjunto de datos de validación era inferior a 10 días, no se realizó la validación del modelo (Resultado 4.2, Tabla 5).

Tabla 11. Parámetros estadísticos de los modelos para los valores horarios de UVER en Santiago de Chile utilizando observaciones realizadas en 2019.

Models	MBE (Wm ⁻²)	RMSE (Wm ⁻²)	NRMSE (%)	IA	MAPE (%)	Number of Hours
Season						
Verano	0.001	0.024	15.8	0.98	14.07	622
Otoño	0.000	0.014	30.1	0.98	30.39	379
Invierno	0.006	0.011	55.8	0.92	36.51	787
Primavera	0.016	0.030	36.7	0.95	59.60	694
Sky conditions						
Clear	0.001	0.025	14.1	0.96	13.67	457
Partially clear	0.008	0.021	17.6	0.97	13.48	443
Partially cloudy	0.002	0.019	34.6	0.95	24.83	631
Cloudy	0.002	0.010	74.6	0.94	41.86	
Interactions (Season + Sky conditions)						951
Verano + Clear	0.018	0.023	13.2	0.97	15.78	320
Verano + Partially clear	0.002	0.025	14.6	0.92	12.82	110
Verano + Partially cloudy	0.006	0.023	26.9	0.91	18.99	131
Verano + Cloudy	0.001	0.016	63.2	0.91	49.46	72
Otoño + Clear	0.016	0.022	21.5	0.93	34.83	71
Otoño + Partially clear	-0.001	0.013	17.4	0.98	14.46	85
Otoño + Partially cloudy	-0.002	0.014	37.2	0.95	26.91	79
Otoño + Cloudy	-0.001	0.008	80.1	0.90	42.61	144
Invierno + Clear	-	-	-	-	-	-
Invierno + Partially clear	-0.015	0.018	31.5	0.72	24.46	92
Invierno + Partially cloudy	-0.007	0.012	35.6	0.89	25.51	228
Invierno + Cloudy	-0.002	0.006	79.3	0.86	38.14	456
Primavera + Clear	-0.041	0.046	25.7	0.83	22.90	118

Primavera + Partially clear	-0.017	0.029	23.3	0.92	15.29	156
Primavera + Partially cloudy	-0.010	0.022	35.0	0.94	26.20	152
Primavera + Cloudy	-0.002	0.011	52.6	0.96	40.84	
General						259
All sky conditions	-0.021	0.032	42.9	0.95	41.18	2482

Se encontró que el porcentaje de diferencia relativa (PD, %) entre el UVER estimado y medido fue menor cuando se usó el modelo general en los valores horarios de UVER (Resultado 4.2, Tabla 6). La razón principal es que el modelo general para los valores horarios se construyó y probó utilizando un conjunto de datos más amplio y representativo comparado con el modelo general para valores diarios. Por tanto, se consideró como el mejor modelo y puede emplearse para conocer el UVER horario y diario en zonas urbanas no cubiertas por la red solar chilena con condiciones climáticas similares a las de Santiago de Chile, teniendo en cuenta los errores de estimación asociados.

De modo que el modelo General horario se utilizó para obtener un set de mapas que permitió conocer la distribución espacio-temporal del UVER en la región mediterránea chilena (RMCh) durante el 2019; primera aplicación de esta tesis (Resultado 4.3.1). Las dosis diarias de UVER se estimaron para la RMCh, dependiendo de la disponibilidad de mediciones de IG. Se seleccionó una serie de estaciones radiométricas distribuidas espacialmente en la RMCh con medidas de IG y se identificó 3 sitios con medidas de UVER para la validación (ver sección 3.3, Tablas 7, 8). Los sitios seleccionados fueron (GOB en la costa de Valparaíso, COL en la cordillera de Santiago y RAN en O'Higgins). Los cuales proporcionaron un datasets de mediciones para analizar las dosis diarias UVER y calcular las SED/MED anuales recibidas durante el período 2015-2020.

En general, el MRCh recibe dosis elevadas durante la mayor parte del año ($UVER > 2,6 \text{ kJm}^{-2}$). Los valores más altos se reportaron en el verano correspondiente a 7.18 kJm^{-2} , 5.31 kJm^{-2} , y 4.81 kJ m^{-2} en COL (2700 msnm), seguido por RAN (482 msnm), y GOB (28 msnm) (Resultado 4.3.1). La diferencia es sugerida porque GOB y RAN son estaciones ubicadas a nivel del mar, además el sitio GOB se ha caracterizado por una obstrucción parcial de la radiancia en el horizonte (Cordero et al., 2013). La gran presencia de aerosoles durante los eventos de niebla en GOB y RAN puede afectar también la distribución espectral de la RUV (da Silva et al., 2012), (Lapere et al., 2021^a). No obstante, las observaciones horarias indican que para 8 meses del año el UVER al mediodía solar es sistemáticamente superior a $0,20 \text{ Wm}^{-2}$ en estos sitios. Equivalente a un UVI = 8 que indica "Riesgo muy alto". Tener en cuenta además que la costa chilena amanece nublada, lo que reduce los niveles de RUV, pero cuando avanza la mañana sus cielos comienzan a ser despejados, y los niveles aumentan. Un estudio previo realizado por (da Silva et al., 2012) mostró que en la costa de Valparaíso durante el verano se reportó un valor horario de UVER de $0,33 \text{ Wm}^{-2}$, (UVI = 12), según la OMS/WHO es de "Riesgo extremo", peligroso para la vida humana y los ecosistemas. Asimismo, se demostró en la ciudad metropolitana de Santiago que las dosis acumuladas de UVER incluso en días parcialmente nublados y antes de las 11 de la mañana pueden ser perjudiciales para los fototipos de piel melano-competente (González-Rodríguez et al., 2021a). Durante los meses de verano-otoño en todos los sitios (COL, GOB, and RAN) se observó valores de concentraciones de ozono bajos ($\text{TOC} \leq 270 \text{ DU}$) (Resultado 4.3.1, Figura 2c). Por lo tanto, la evolución estacional del TOC indica que deben tomarse medidas para evitar la sobreexposición a la radiación UVER en los meses más cálidos. Además, las latitudes en estudio están muy influenciadas por un mínimo de nubes bajas la frecuencia anual de nubes para cada sitio se encuentra entre 4,83-5,27% (Resultado 4.3.1, Figura 2d), con una frecuencia de

incremento hacia el Sur (Anexo 5). Por lo tanto, los habitantes que viven en la RMCh son muy propensos a tener daños en la piel cuando se exponen al UVER sin protección.

Las dosis anuales estándar/mínimas acumuladas (SED/MED) para diferentes fototipos de piel (I-IV) durante el año promedio (2015-2020) oscilaron entre 10146 SED en el sitio costero (GOB) hasta 14149 SED en el sitio de mayor altitud (COL). Asimismo, las mayores dosis por fototipos se recibieron en el COL. Los fototipos de piel más comunes en Chile recibieron 4073 MED_{III} y 3161 MED_{IV} en la cordillera metropolitana (COL), 2926 MED_{III} y 2276 MED_{VI} en Valparaíso, 2899 MED_{III} y 2255 MED_{IV}. Estas dosis anuales SED o MED son mayores a las reportadas por otros autores de similar latitud y altitud (Kalogirou et al., 2017) (Resultado 4.3.1, Tabla 2). Lo que pudiese estar relacionado con la evolución de tasa de mortalidad/100.000 habitantes por cáncer de piel en la región (MMA, 2020).

En este trabajo (Resultado 4.3.1) se demostró que los factores que determinan la distribución espacio-temporal del UVER en la RMCh son el TOC, la nubosidad y la topografía, y los resultados presentados para esta aplicación están influidos por estos factores. A pesar de no considerar estos factores en las estimaciones del UVER por el modelo, su distribución en superficie sobre la MRCh puede considerarse fiable, ya que la validación presentó excelentes resultados (Resultado 4.3.1, Tablas 3-5).

El modelo General proporcionó datos precisos de radiación solar espectral en los sitios de interés con errores de predicción en promedio menores a $0,94 \text{ kJm}^{-2}$. El PD entre las dosis diarias modeladas y medidas de UVER en COL, GOB y RAN en función del día del año se puede revisar en el (Resultado 4.3.1, Figura 4). Donde el PD fue bajo entre -4 y 3%. En todos los sitios, la desviación en los meses de verano fue significativa, por lo que puede producirse eritema sin darse cuenta de su insensibilidad cutánea fototipos. Los indicadores MBE y RMSE más bajos se encontraron en RAN (MBE= -0.18 kJm^{-2} , RMSE= 0.66 kJm^{-2}), dado que RAN tiene un clima similar al de Santiago. Los mayores MBE y RMSE se encontraron en COL, lo que se sugiere por el efecto de la altitud. A mayor altura, el camino óptico se reduce y hay menos componentes atmosféricos que absorben o dispersan los rayos UV, lo que indica que el UVER es menos atenuado y por lo tanto las mediciones pueden ser mayores a las estimaciones por el modelo que no tiene en cuenta esta variable. En el norte de Chile, (Rivas et al., 2008) se ha informado aumentos de RUV del 10-12% por km. La desviación entre los valores estimados y los medidos no fue uniforme en todo el rango de valores UVER. En el rango medio, el modelo produjo la mayor variabilidad de valores de UVER, sugerida por los cambios de la nubosidad (Resultado 4.3.1, Figuras. 3a-d). Lo discutido también puede verse en la Figura 21 donde se muestra que en COL y GOB, la línea roja tiene una mayor pendiente que RAN. Por lo tanto, los valores de UVER estimados para RAN tienen mejor precisión que los estimados para COL o GOB. Estos resultados sugieren la necesidad de mejoras adicionales al modelo simple, incluyendo otros parámetros como la altitud, AOD, TOC y OC. El grado de concordancia entre las dosis diarias de UVER calculadas y medidas para todos los sitios y durante el período es inesperado ($IA \geq 0.93$). Por lo tanto, el rendimiento general del modelo presenta buena precisión y bajos errores para todos los sitios.

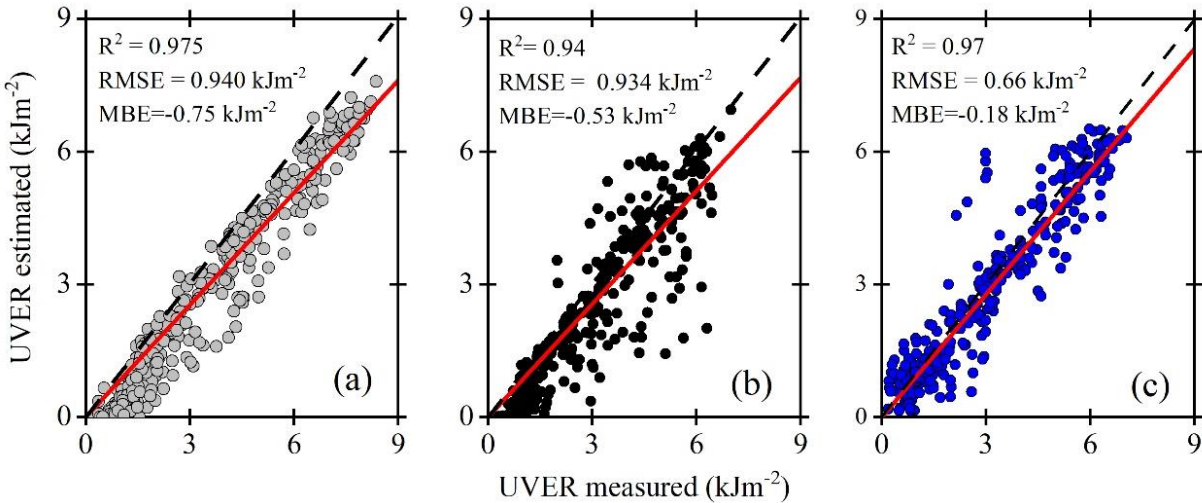


Figura 21. Comparación entre las dosis diarias de UVER estimadas y medidas en (a) COL, Santiago (zona montañosa andina), (b) GOB, Valparaíso (zona costera), y (c) RAN, O'Higgins, (zona de valle) durante el año 2019. La línea negra discontinua indica la línea 1:1. La línea roja indica el ajuste mediante el método de regresión por mínimos cuadrados (Furlan et al., 2012).

Se demostró que la distribución espacio-temporal del UVER está directamente relacionada con la estacionalidad y la topografía de la región. El aumento del UVER se observa a medida que nos acercamos a sitios de mayor altitud hacia la cordillera y el norte. En regiones montañosas pueden darse niveles de RUV elevados y perjudiciales, como demuestran otros estudios (Singh and Singh, 2004), (McKenzie et al., 2006), (Utrillas et al., 2018b). Por lo general, a mayor altitud el aire es más seco y limpio y tiene menos dispersión y absorción de la RUV (por ejemplo, por el TOC), lo que da lugar a mayores niveles de UVER en la superficie. Como consecuencia, en lugares de gran altitud (como El Colorado), las dosis de UVER pueden alcanzar unos $7,58 \text{ kJm}^{-2}$ en verano (enero). Este es un efecto que debe ser considerado por actividades recreativas como el snowboard en la montaña andina. Estudios anteriores reportaron resultados similares (Cordero et al., 2018; Rivas et al., 2008). El efecto de la altitud es menos evidente para los mapas no veraniegos. Incluso los cambios relativos con la altitud son menores en invierno que en verano debido a la menor carga de aerosoles en la capa límite. Para los mapas de invierno y primavera se encontró una diferencia máxima inferior a $4,6 \text{ kJm}^{-2}$. El mapa de invierno muestra unos valores de UVER entre 4 y 5 veces inferiores a los del mapa de verano. Sin embargo, es importante usar protección solar durante todo el año para reducir las posibilidades de padecer cáncer de piel y envejecimiento. Incluso en invierno y en días nublados, es importante proteger nuestra piel, la dosis diaria acumulada podría estar por encima del umbral de daño (González-Rodríguez et al., 2021b; Lehmann et al., 2019). Dos estudios para latitudes medias demostraron lo anterior (McKenzie and Lucas, 2018), (González-Rodríguez et al., 2021a). El mapa de primavera tiene valores de UVER en torno a un punto por encima del mapa de otoño, sugerido por la diferencia de TOC (Resultado 4.3.1, Figura 2c). En verano, el efecto de la altitud aparece con fuerza, con diferencias de hasta 2,0 entre la costa y las montañas más altas. Esto demuestra la necesidad de tener en cuenta el efecto de la altitud (Resultado 4.3.1, Figura 6). Las situaciones con grandes albedos, como las superficies cubiertas de nieve, no se consideran aquí. Sin embargo, estas condiciones están presentes en la estación COL y pueden producirse fuertes aumentos de la RUV con la elevación si el lugar tiene un albedo elevado (por ejemplo, nieve fresca). Se sabe que el UVI en estas situaciones

aumenta considerablemente, alrededor de un 50%, en comparación con las superficies sin nieve (Cordero; et al., 2014).

Sin embargo, es una limitante actual que no existan suficientes estaciones de IG y UVER que midan simultáneamente, además existe una escasa distribución espacial de las estaciones de seguimiento del IG en la RMCh (Resultado 4.3.1, Figuras 1, 7). Santiago metropolitano tiene mayor distribución de estaciones radiométricas que Valparaíso, O'Higgins, Maule y la región de Ñuble. Esta es una limitación del estudio.

En resumen, se utilizó un modelo sencillo para crear una exposición validada de la RUV que varía espacial y temporalmente en toda la RMCh. De esta forma se crearon por primera vez mapas de exposición al UVER mensual y anual en la región mediterránea chilena (RMCh) para el año 2019 (Resultado 4.3.1, Figuras 6, 7). Se espera que esta información pueda combinarse con otros conjuntos de datos para identificar áreas de preocupación basadas tanto en una mayor exposición a la RUV como en otros factores de riesgo de cáncer de piel, como el empleo en ocupaciones que requieren más tiempo al sol. Por ello, es importante incluirla como herramienta educativa y utilizar los medios de comunicación como una forma clara y sencilla de familiarizarse con el concepto y, por tanto, de poner en práctica las recomendaciones para una exposición solar adecuada, principalmente en los grupos de población vulnerables (por ejemplo, los niños y adulto mayor). De este modo, es posible reducir los efectos nocivos para la salud y también los costes que conlleva el tratamiento de las enfermedades que puede provocar una exposición prolongada.

Chile es un país muy privilegiado por su potencial de energía solar. Recibe del sol entre 900 y 2200 kWhm⁻² de energía al año (González-Rodríguez et al., 2017) y en algunas zonas del norte de Chile se recibe más de 4000 h de luz solar al año (Reina et al., 2019). A pesar de este enorme potencial solar destacado en Chile, su empleo como fuente energética en el tratamiento solar de aguas es insuficiente. Atendiendo a la posibilidad de conocer el potencial que tiene la RUV, como fuente de energía en la realización del proceso de degradación fotocatalítica de contaminantes en ciudades pobladas de Chile y al no encontrar datos relacionados de RUV para las latitudes estudiadas, se simuló valores de RUV en tres ciudades chilenas, Antofagasta, Santiago y Concepción. Para ello se empleó un periodo de 8 años y el modelo de transferencia radiativa LibRadtran (Brelford, 2017) (ver sección 2.7). Se incluyó en las simulaciones parámetros atmosféricos que influyen en los valores de RUV (ver sección 2.5), la cobertura de nubes, columna de O₃ aerosoles y SZA, además de la latitud y altitud. Se analizó de forma estacional los valores de RUV-simulada en términos de irradiancia (Wm⁻²) e irradiación (kJm⁻²) (ver Anexo V) en las tres ciudades de Chile. Para conocer las posibilidades de aprovechar el potencial de la RUV solar en el tratamiento solar de aguas la RUV-simulada se comparó con valores de irradiancia e irradiación reportados en literatura para la destrucción de contaminantes orgánicos (Resultado 4.3.2, Tabla 3).

Se simuló más de 5000 situaciones atmosféricas (cielos despejados/nublados, ozono y aerosoles) a diferente ángulo solar cenital (0-1) con salida espectrales. En la Figura 22 se muestra un ejemplo de salida del modelo, mostrando el espectro solar en término de irradiancia solar. El ejemplo fue para el mediodía (SZA=0°) con una columna de O₃ (229 DU) bajo dos condiciones (cielo despejado y nublado).

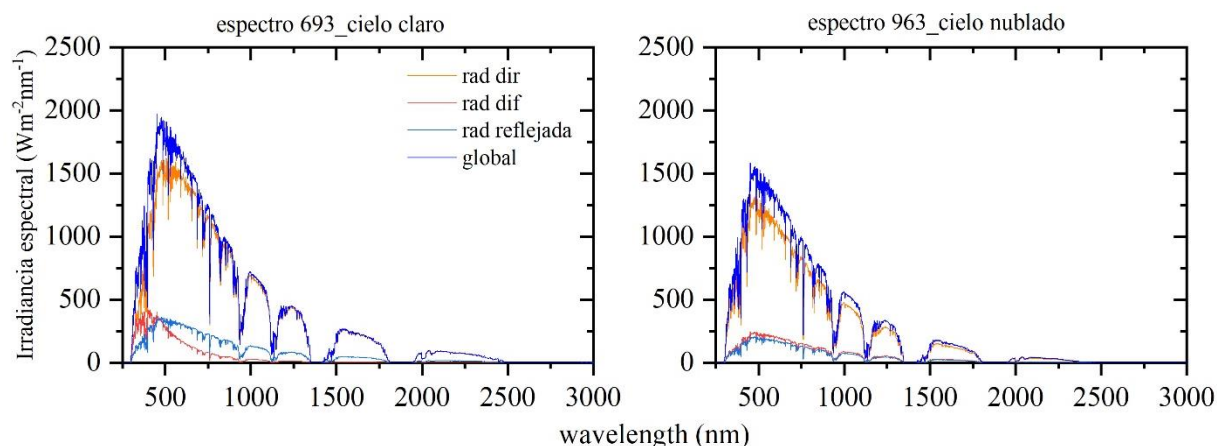


Figura 22. Representación del espectro solar al mediodía (SZA=0°) un día de cielo claro y nublado.

Se encontró que los valores de irradiancia UVR-simulada son sistemáticamente mayores a 20 Wm^{-2} durante ocho meses para Santiago y Concepción, mientras que en Antofagasta todos los meses del año superan este valor. La media anual de la RUV-simulada para cada ciudad fue de $32,81 \text{ Wm}^{-2}$ (Antofagasta), $30,07 \text{ Wm}^{-2}$ (Santiago) y, $27,66 \text{ Wm}^{-2}$ (Concepción). Estos valores fueron mayores a los reportados en la Plataforma Solar de Almería (PSA, $37,09^\circ\text{N}$, $-2,36^\circ\text{E}$ y 500 m.s.n.m.), o el norte de Portugal (41°N , $-9,14^\circ\text{W}$) donde se encuentra la primera planta preindustrial de tratamiento de lixiviados en un relleno sanitario (Silva et al., 2016). Indicando que, a pesar de la variación estacional de RUV, y las condiciones climáticas/ambientales características de cada ciudad (Resultado 4.3.2, Figura 1) durante la mayor parte del año puede usarse la RUV en el tratamiento del agua. Hacemos notar que, dado que los valores de RUV son simulados a partir del modelo de transferencia radiativa UVSPEC/LibRadtran, es importante contar con mediciones en tierra para su validación. Esta es una limitación actual en el estudio.

Se mostró en términos de irradiación los valores UVR-simulados para Antofagasta, Santiago y Concepción mediante su evolución anual (Resultado 4.3.2, Figura 3). Los valores medios mensuales de RUV oscilaron entre un valor mínimo de $563,53 \pm 23,94 \text{ kJm}^{-2}$ (Concepción) en junio y un valor máximo de $1925,45 \pm 236,83 \text{ kJm}^{-2}$ (Santiago) en diciembre. Los valores de irradiación UV anual fueron $1414,76 \pm 265,06 \text{ kJm}^{-2}$, $1297,60 \pm 237,69 \text{ kJm}^{-2}$ y $1229,04 \pm 240,67 \text{ kJm}^{-2}$ se obtuvieron para Antofagasta, Santiago y Concepción, respectivamente (Resultado 3.4.2, Figura 3b). Paralelo a las simulaciones se revisó la literatura en busca de valores de RUV-reportados para la degradación de contaminantes de diversa naturaleza los cuales se reportaron en (Resultado 4.3.2, Tabla 3). El análisis comparativo, entre la RUV-simulada y la RUV-reportada permitió sugerir que la fotocatalisis solar de contaminantes fue posible, para la mayoría de los casos descritos en la literatura, con la RUV-simulada en las tres ciudades chilenas (Resultado 3.4.2, Figura 4). Dicho proceso será energéticamente más favorecido en la ciudad de Antofagasta que en Santiago y Concepción. Principalmente debido a la ubicación hacia el ecuador que favorece que se reciba mayores valores de RUV, asociados a los valores relativamente bajos de O_3 total en columna, la menor presencia de nubes y aerosoles atmosféricos en esta ciudad. No obstante, las condiciones experimentales encontradas en la literatura son muy variadas, por lo que es difícil hacer una comparación homogénea en todos los casos. La RUV por sí sola no contribuye al mejor rendimiento del proceso de fotocatalisis solar heterogénea, ya que se debe tener en cuenta otros parámetros (Malato et al., 2016), como la masa del catalizador, la concentración de contaminante, el pH, la temperatura, etc. Este

último trabajo es aún preliminar, dado que no se tienen mediciones en tierra de RUV para validar las simulaciones de RUV. Sin embargo, se pudo encontrar similitud con un error cuadrático medio de 5.77 Wm^{-2} (Figura 23) con las estimaciones de RUV que hace la herramienta en línea Explorador Solar (Chilean Ministry of Energy, 2021) para la ciudad de Antofagasta. Estudios futuros se realizarán en esta línea.

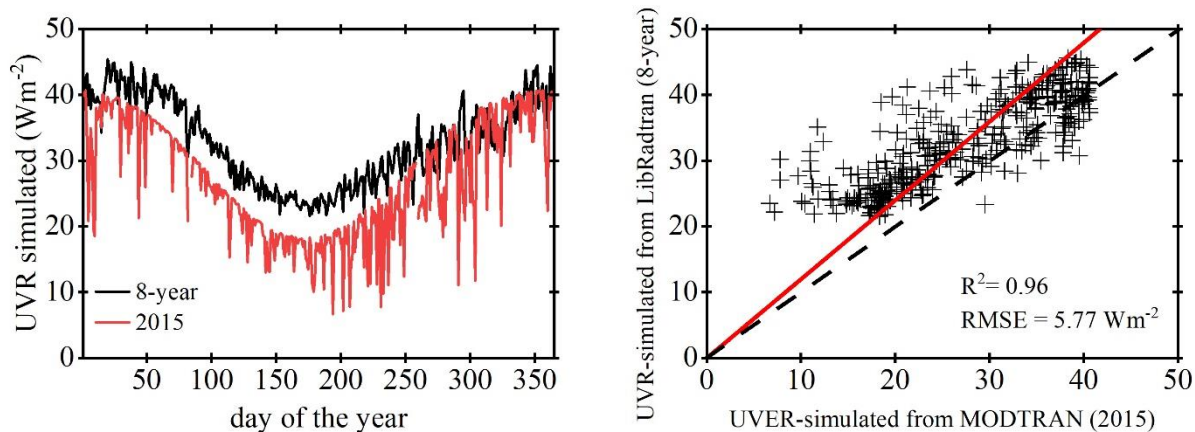


Figura 23. Comparación entre la RUV-simulada usando LibRadtran (8-años) y MODTRAN (2015). Ambos modelos son basados en la transferencia radiativa.



CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y PROYECCIONES

La hipótesis de esta investigación fue:

La modelación de la radiación solar espectral ultravioleta que llega a la superficie terrestre en latitudes medias de Chile podría asociarse con la capacidad de que es suficiente para generar daño en los fototipos de piel característicos de la población chilena cuando el UVI indica que es seguro y con la posibilidad de llevar a cabo tratamiento solar de aguas.

Después de este trabajo podemos concluir que es el primero en abordar el comportamiento y análisis a largo plazo de la RUV en Chile Central utilizando mediciones en tierra y técnicas de modelación (empírica y transferencia radiativa). Además, el análisis y cuantificación de la radiación solar espectral ultravioleta permitió conocer que, la población está expuesta a un alto riesgo de desarrollar quemaduras solares y/o otros daños en la piel relacionados con el sol en el 46% de los días con $UVI \leq 5$. Esto ocurre bajo condiciones de nubosidad y antes de las 11:00 LT durante la primavera, el verano y el otoño, cuando los índices de eritema (SED MED, y t_{ery}) indican que los valores de UVER son lo suficientemente altos como para causar quemaduras solares, aunque el UVI indica que es seguro. Enviando el mensaje que una exposición a niveles bajos de UVI (2) parece engañosa y la información reportada por la OMS/WHO de no proteger la piel en estas condiciones necesita reconsiderarse y debe ser discutida durante un proceso de actualización de los mensajes de salud pública a la población chilena. Como parte de una estrategia más amplia e integrada de protección solar en Chile Central se recomienda incluir, además del UVI, los índices de eritema, SED, MED, y t_{ery} , las condiciones de cielo y la estación del año.

Para las zonas pobladas no cubiertas por la red solar chilena, los valores horarios y diarios de radiación solar espectral (UVR y UVER) pueden estimarse mediante los modelos desarrollados en este trabajo. Los modelos empíricos que estiman los valores horarios y diarios de UVER teniendo en cuenta las condiciones de cielo (K_T), muestran un buen desempeño para la región mediterránea chilena. Se mostró que la variación espacio-temporal del UVER está directamente relacionada con la estacionalidad y la topografía de la región. Más del 40% de las dosis anuales de UVER se reciben en verano, entre el 29% y el 19% en primavera y otoño, y menos del 10% en invierno, con una intensidad creciente hacia las zonas de alta montaña y bajas latitudes del norte. La RUV-simulada mensual mediante el LibRadtran muestra similitud con las simulaciones de RUV que hace la herramienta en línea Explorador Solar en la ciudad de Antofagasta. Con los valores estimados (UVER y RUV) mediante las técnicas de modelación fue posible conocer la distribución espacio-temporal a escala mensual y anual del UVER a través de la región mediterránea chilena y sugerir que es posible es tratamiento solar de aguas en las ciudades de Antofagasta, Santiago y Concepción empleando la RUV como fuente de energía. Aportando dos herramientas que estiman valores de radiación solar espectral ultravioleta para su uso en cualquier estudio futuro que requiera datos sobre UVER o RUV (variación espacio-temporal, valores promedios horarios o diarios, así como otras potenciales aplicaciones) en sitios de Chile.

Por lo tanto, es posible confirmar que la hipótesis de trabajo se acepta.

La aplicación de ambas estrategias de modelación a otros sitios sería beneficiosa para mejorar la comprensión de la climatología solar, la fotobiología, los estudios biofísicos, la degradación de materiales, así como en otros campos científicos, como el tratamiento del agua, áreas donde Chile está más necesitado.

Proyecciones

A continuación, enumeramos algunos temas en los que se podría profundizar en líneas de trabajo que se desarrollarán a corto y mediano plazo:

UVER y índices de eritema

- Incluir estudios de dosimetría personal. El conjunto de datos UVER consiste en datos de irradiancia eritemática que se mide con un sensor ubicado de forma horizontal. Debido a esto, las mediciones se aproximan a la exposición individual, ya que la mayoría de las superficies de la piel humana no están orientadas horizontalmente.

Modelación empírica y transferencia radiativa de la radiación solar espectral ultravioleta

- Incluir una serie de tiempo más extensa para reconstruir los valores de irradiación del UVER recibidos sobre Chile Central permitiendo conocer sus tendencias y cambios.
- Los datos de entrada para el modelo incluyen: altitud, latitud, TOC, CF y parámetros AOD. Para mejorar el coeficiente K, necesitamos conocer además otras características del lugar, el uso del suelo o albedo de superficie, valores de aerosoles con precisión y CF con mejor resolución a 100km. Cuando el suelo estaba cubierto de escarcha o de nieve, las diferencias modelo-medida pueden ser grandes (más del 30%), (Cordero et al., 2014) así el aumento del albedo provocaba un aumento de la RUV. Un día en las pistas de esquí puede hacer que la piel se quemara como un día en la playa. Este estudio no considera el albedo en los modelos desarrollados. Por lo tanto, usar un albedo espectral completo en dependencia del uso del suelo de cada sitio es un punto a considerar en próximos trabajos. Análisis con diferentes valores de AOD son necesarios para probar el rendimiento de la modelización de la radiación solar espectral mediante la comparación con las mediciones UVR o UVER afectadas por una mayor carga de aerosoles. Se conoce que las ciudades de Chile Central presentan altos valores de contaminantes primarios y secundarios. Por tanto, incluir los efectos de AOD (mayor carga de aerosoles) deben ser investigados, junto a cambios en la cobertura de nubes.
- El rendimiento del modelo LibRadtran se validará en una investigación posterior con mediciones espectrales terrestres de UVR usando mediciones del espectro solar realizadas entre 2016 y 2017 en Chajnantor, región de Antofagasta.

Referencias bibliográficas

- (WHO), W.H.O., 2020. Arctic ozone depletion reached record level [WWW Document]. URL <https://public.wmo.int/en/media/news/arctic-ozone-depletion-reached-record-level> (accessed 3.10.21).
- Abolhasani, R., Araghi, F., Tabary, M., Aryannejad, A., Mashinchi, B., Robati, R.M., 2021. The impact of air pollution on skin and related disorders: A comprehensive review. *Dermatol. Ther.* 34. <https://doi.org/10.1111/dth.14840>
- Adam, M.E., Ahmed, E.A., 2016. An assessment of the ratio of ultraviolet-B to broadband solar radiation under all cloud conditions at a subtropical location. *Adv. Sp. Res.* 57, 764–775. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.11.030>
- Adam, M.E.N., 2015. Determination of daily total ultraviolet-B in a subtropical region (Upper Egypt): An empirical approach. *Atmos. Res.* 153, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.07.025>
- Ajona, J.I., Vidal, A., 2000. The use of CPC collectors for detoxification of contaminated water: Design, construction and preliminary results. *Sol. Energy* 68, 109–120. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00047-X)
- Al-Aruri, S.D., 1990. The empirical relationship between global radiation and global ultraviolet (0.290–0.385) μm solar radiation components. *Sol. Energy* 45, 61–64. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90028-B](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90028-B)
- Alfano, O.M., Bahnemann, D., Cassano, A.E., Dillert, R., Goslich, R., 2000. Photocatalysis in water environments using artificial and solar light. *Catal. Today* 58, 199–230.
- Alonso, F.T., Garmendia, M.L., Bogado, M.E., 2010. Increased skin cancer mortality in Chile beyond the effect of ageing: Temporal analysis 1990 to 2005. *Acta Derm. Venereol.* 90, 141–146. <https://doi.org/10.2340/00015555-0787>
- Alvarado, R.G., Wegertseder, P., Baeriswyl, S., Trebilcock, M., 2014. Mapa energético-solar de concepción: Cartografía urbana del consumo energético y captación solar en edificaciones residenciales de concepción, Chile. *Rev. Geogr. Norte Gd.* 2014, 123–143.
- Ambasht, N.K., Agrawal, M., 2003. Effects of enhanced UV-B radiation and tropospheric ozone on physiological and biochemical characteristics of field grown wheat. *Biol. Plant.* 47, 625–628. <https://doi.org/10.1023/B:BIOP.0000041076.95209.c3>
- Antil-martini, K., Contreras, D., Yáñez, J., Cornejo, L., Santander, P., Mansilla, H.D., 2017. Solar light driven oxidation of gentisic acid on ZnO. *Sol. Energy* 142, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.005>
- Antil-Martini, K., Contreras, D., Yáñez, J., Cornejo, L., Santander, P., Mansilla, H.D., 2017. Solar light driven oxidation of gentisic acid on ZnO. *Sol. Energy* 142, 26–32.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.005>

- Anton, A. Serrano, M. L. Cancillo, and J.A.G., 2009. An empirical model to estimate ultraviolet erythema transmissivity. *Ann. Geophys.* 27, 1387–1398.
- Antón, M., Alados-Arboledas, L., Guerrero-Rascado, J.L., Costa, M.J., C Chiu, J., Olmo, F.J., 2012. Experimental and modeled UV erythema irradiance under overcast conditions: The role of cloud optical depth. *Atmos. Chem. Phys.* 12, 11723–11732. <https://doi.org/10.5194/acp-12-11723-2012>
- Antón, M., Cazorla, A., Mateos, D., Costa, M.J., Olmo, F.J., Alados-Arboledas, L., 2016. Sensitivity of UV Erythema Radiation to Total Ozone Changes under Different Sky Conditions: Results for Granada, Spain. *Photochem. Photobiol.* 92, 215–219. <https://doi.org/10.1111/php.12539>
- Antón, M., Serrano, A., Cancillo L., M., Garcia, J.A., 2008a. Relationship between erythema irradiance and total solar irradiance in South-Western Spain. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113.
- Antón, M., Serrano, A., Cancillo, M.L., Garcia, J.A., 2008b. Relationship between erythema irradiance and total solar irradiance in South-Western Spain. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JD009627>
- Armada, M.R., 2017. APLICACIÓN DE PROTOCOLOS DE CONTROL DE CALIDAD DE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR MEDIDOS EN SALTA (ARGENTINA). ASADES.
- Asta Juzeniene, Brekke, P., Dahlback, A., Andersson-Engels, S., Reichrath, J., Moan, K., Holick, M.F., Moan, W.B.G. and J., 2011. Solar radiation and human health. *Reports Prog. Phys.* 248, 1179–1180. <https://doi.org/10.1001/jama.1982.03330100019015>
- Barnard, W.F., Saxena, V.K., Wenny, B.N., DeLuisi, J.J., 2003. Daily Surface UV Exposure and Its Relationship to Surface Pollutant Measurements. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 53, 237–245. <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466134>
- Battie, C., Jitsukawa, S., Bernerd, F., Del Bino, S., Marionnet, C., Verschoore, M., 2014. New insights in photoaging, UVA induced damage and skin types. *Exp. Dermatol.* 23, 7–12. <https://doi.org/10.1111/exd.12388>
- Baudouin, C., Charveron, M., Tarroux, R., Gall, Y., 2002. Environmental pollutants and skin cancer. *Cell Biol. Toxicol.* 18, 341–348. <https://doi.org/10.1023/A:1019540316060>
- Behar-Cohen, F., Baillet, G., de Agyuavives, T., Garcia, P.O., Krutmann, J., Peña-García, P., Reme, C., Wolffsohn, J.S., 2014. Ultraviolet damage to the eye revisited: Eye-sun protection factor (E-SPF®), a new ultraviolet protection label for eyewear. *Clin. Ophthalmol.* 8, 87–104. <https://doi.org/10.2147/OPHTH.S46189>
- Bell, M.L., Peng, R.D., Dominici, F., 2006. The exposure-response curve for ozone and risk of mortality and the adequacy of current ozone regulations. *Environ. Health Perspect.* 114, 532–536.

<https://doi.org/10.1289/ehp.8816>

- Bernhard, G.H., Neale, R.E., Barnes, P.W., Neale, P.J., Zepp, R.G., Wilson, S.R., Andrady, A.L., Bais, A.F., McKenzie, R.L., Aucamp, P.J., Young, P.J., Liley, J.B., Lucas, R.M., Yazar, S., Rhodes, L.E., Byrne, S.N., Hollestein, L.M., Olsen, C.M., Young, A.R., Robson, T.M., Bornman, J.F., Jansen, M.A.K., Robinson, S.A., Ballaré, C.L., Williamson, C.E., Rose, K.C., Banaszak, A.T., Häder, D.P., Hylander, S., Wängberg, S.A., Austin, A.T., Hou, W.C., Paul, N.D., Madronich, S., Sulzberger, B., Solomon, K.R., Li, H., Schikowski, T., Longstreth, J., Pandey, K.K., Heikkilä, A.M., White, C.C., 2020. Environmental effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, update 2019. *Photochem. Photobiol. Sci.* 19, 542–584. <https://doi.org/10.1039/d0pp90011g>
- Bilbao, J., de Migue, A., 2020. Erythemal solar irradiance, UVER, and UV index from ground-based data in central Spain. *Appl. Sci.* 10. <https://doi.org/10.3390/APP10186589>
- Blanco, J., Malato, S., Fernández-Ibañez, P., Alarcón, D., Gernjak, W., Maldonado, M.I., 2009. Review of feasible solar energy applications to water processes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 1437–1445. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.016>
- Blumthaler, M., Webb, A.R., Seckmeyer, G., Bais, A.F., Huber, M., Mayer, B., 1994. Simultaneous spectroradiometry' a study of solar UV irradiance at two altitudes. *Geophys. Res. Lett.* 21, 2805–2808.
- Boisier, J.P., Alvarez-Garretón, C., Cordero, R.R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R.D., Lambert, F., Ramallo, C., Rojas, M., Rondanelli, R., 2018. Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa* 6. <https://doi.org/10.1525/elementa.328>
- Bornman, J.F., Barnes, P.W., Robson, T.M., Robinson, S.A., Jansen, M.A.K., Ballaré, C.L., Flint, S.D., 2019. Linkages between stratospheric ozone, UV radiation and climate change and their implications for terrestrial ecosystems. *Photochem. Photobiol. Sci.* 18, 681–716. <https://doi.org/10.1039/c8pp90061b>
- Brelsford, C.C., 2017. Radiative transfer theory and modelling with libRadtran Training event report Radiative transfer theory and modelling with libRadtran 0–1. <https://doi.org/10.19232/uv4pb.2016.2.15>
- Cabrera-reina, A., Miralles-cuevas, S., Rivas, G., Pérez, J.A.S., 2019. Comparison of different detoxification pilot plants for the treatment of industrial wastewater by solar photo-Fenton: Are raceway pond reactors a feasible option? *Sci. Total Environ.* 648, 601–608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.143>
- Cabrera-Reina, A., Miralles-Cuevas, S., Soriano-Molina, P., Sánchez-Pérez, J.A., 2021. A critical evaluation of the use of accumulated energy as a parameter for the scale-up of solar photoreactors during the treatment of simulated industrial wastewater by solar photo-Fenton. *J. Chem. Technol.*

Biotechnol. 96, 1593–1602. <https://doi.org/10.1002/jctb.6678>

- Cabrera, Ipiña, A., Damiani, A., Cordero, R.R., & Piacentini, R.D., 2012. UV index values and trends in Santiago, Chile (33.5°S) based on ground and satellite data. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 115, 73–84.
- Cabrera Reina, A., Miralles-Cuevas, S., Cornejo, L., Pomares, L., Polo, J., Oller, I., Malato, S., 2020. The influence of location on solar photo-Fenton: Process performance, photoreactor scaling-up and treatment cost. *Renew. Energy* 145, 1890–1900. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.113>
- Cañada, J., Esteve, A.R., Marín, M.J., Utrillas, M.P., Tena, F., Martínez-Lozano, 2007. Study of erythemal, UV (A+B) and global solar radiation in Valencia (Spain). *Int. J. Clim.* 416, 385–416. <https://doi.org/10.1002/joc>
- Carbone, S., Saarikoski, S., Frey, A., Reyes, F., Reyes, P., Castillo, M., Gramsch, E., Oyola, P., Jayne, J., Worsnop, D., Hillamo, R., 2013. Chemical characterization of submicron Aerosol particles in Santiago de Chile. *Aerosol Air Qual. Res.* 13, 462–473. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.10.0261>
- Carra, I., García Sánchez, J.L., Casas López, J.L., Malato, S., Sánchez Pérez, J.A., 2014. Phenomenological study and application of the combined influence of iron concentration and irradiance on the photo-Fenton process to remove micropollutants. *Sci. Total Environ.* 478, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.066>
- Casierra-martinez, H.A., Madera-parra, C.A., Vargas-ramírez, X.M., Caselles-osorio, A., Torres-lópez, W.A., De, C., Ambiental, C., Valle, U., Valle, U., Meléndez, C.U., 2020. Diclofenac and carbamazepine removal from domestic wastewater using a Constructed Wetland-Solar Photo-Fenton coupled system. *Ecol. Eng.* 153, 105699. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105699>
- Chadyšiene, R., Girgždys, A., 2008. Ultraviolet radiation albedo of natural surfaces. *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.* 16, 83–88. <https://doi.org/10.3846/1648-6897.2008.16.83-88>
- Chile, C. de E.– F.– U. de, 2020. MODELO DE TRANSFERENCIA RADIATIVA PARA EL ESPECTRO SOLAR. Herramienta de análisis de la caracterización espectral de la radiación solar del desierto de Atacama para mejorar la competitividad de la industria solar en Chile”. Chile.
- Chilean Ministry of Energy, 2021. Explorador Solar [WWW Document]. URL <http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/> (accessed 1.6.21).
- CIE, 2002. Spectral Weighting of Sunlight.
- CIE and WMO., 2014. RATIONALIZING NOMENCLATURE FOR UV DOSES AND EFFECTS ON HUMANS. Vienna, AUSTRIA.
- Climenti, M.J., María Jesus Sánchez-Martín, María Sonia Rodríguez-Cruz, P.P., Herrero-Hernández, R.U. and E., 2018. Determination of Pesticides in River Surface Waters of Central Chile Using SPE-GC-

MS Multi-Residue Method. *J. Chil. Chem. Soc* 2, 4023–4031.

Coates, J., Mar, K.A., Ojha, N., Butler, T.M., 2016. The influence of temperature on ozone production under varying NO_x conditions - A modelling study. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 11601–11615. <https://doi.org/10.5194/acp-16-11601-2016>

Cogulet, A., Blanchet, P., Landry, V., 2016. Wood degradation under UV irradiation: A lignin characterization. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 158, 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.02.030>

Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2013. Decreto 112. ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DE AIRE PARA OZONO (O₃).

Contreras, D., Melin, V., Pérez-gonzález, G., González, L., 2019. Advances and Challenges in BiOX (X : Cl, Br, I) -Based Materials for Harvesting Sunlight, in: Nature, S. (Ed.), . pp. 1–55.

Cooman, K., Debels, P., Gajardo, M., Urrutia, R., Barra, R., 2005. Use of *Daphnia* spp. for the ecotoxicological assessment of water quality in an agricultural watershed in South-Central Chile. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 48, 191–200. <https://doi.org/10.1007/s00244-004-0218-6>

Cooper, P.I., 1969. The absorption of radiation in solar stills. *Sol. Energy* 12.

Cordero, Damiani, Alessandro, Ferrer, Jorge, Jorquera, J., Tobar, M., Labbe, F., Carrasco, J., Laroze, D., 2014. UV Irradiance and Albedo at Union Glacier Camp (Antarctica): A Case Study. *PLoS One* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090705>

Cordero, R.R., Damiani, A., Da Silva, L., Laroze, D., Labbe, F., 2013. Spectral UV radiance measured at a coastal site: A case study. *Photochem. Photobiol. Sci.* 12, 1193–1201. <https://doi.org/10.1039/c3pp25440b>

Cordero, R.R., Damiani, A., Jorquera, J., Sepúlveda, E., Caballero, M., Fernandez, S., Feron, S., Llanillo, P.J., Carrasco, J., Laroze, D., Labbe, F., 2018. Ultraviolet radiation in the Atacama Desert. *Antonie van Leeuwenhoek, Int. J. Gen. Mol. Microbiol.* 111, 1301–1313. <https://doi.org/10.1007/s10482-018-1075-z>

Cordero, R.R., Damiani, A., Seckmeyer, G., Jorquera, J., Caballero, M., Rowe, P., Ferrer, J., Mubarak, R., Carrasco, J., Rondanelli, R., Matus, M., Laroze, D., 2016. The Solar Spectrum in the Atacama Desert. *Sci. Rep.* 6, 1–15. <https://doi.org/10.1038/srep22457>

Cordero, R.R., Seckmeyer, G., Damiani, A., Jorquera, J., Carrasco, J., Muñoz, R., Da Silva, L., Labbe, F., Laroze, D., 2014. Aerosol effects on the UV irradiance in Santiago de Chile. *Atmos. Res.* 149, 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.07.002>

Corrêa, M.D.P., Godin-Beekmann, S., Haefelin, M., Bekki, S., Saiag, P., Badosa, J., Jégou, F., Pazmiño, A., Mahé, E., 2013. Projected changes in clear-sky erythemal and vitamin D effective UV doses for

Europe over the period 2006 to 2100. *Photochem. Photobiol. Sci.* 12, 1053–1064. <https://doi.org/10.1039/c3pp50024a>

- Cuevas, S.M., 2011. Aplicación de fotocatalisis solar con baja concentración de TiO₂ como tratamiento terciario en efluentes de EDARs para eliminar microcontaminantes. Universidad de Almería.
- da Silva, L., Cortés, O., Ossandon, A., Mera, E., 2012. Influence on UV radiation by wildfire smoke in Valparaíso, Chile. *Eur. Phys. J. Plus* 127, 1–5. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2012-12015-1>
- Damiani, A., Cordero, R.R., Cabrera, S., Laurenza, M., Rafanelli, C., 2014. Cloud cover and UV index estimates in Chile from satellite-derived and ground-based data. *Atmos. Res.* 138, 139–151. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.006>
- De Miguel, A., Bilbao, J., Salsón, S., Lage, A., 1994. Solar radiation and sunshine hour maps in Castilla and León region (Spain). *Renew. Energy* 4, 933–940. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90227-5](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90227-5)
- de Miguel, A., Román, R., Bilbao, J., Mateos, D., 2011. Evolution of erythemal and total shortwave solar radiation in Valladolid, Spain: Effects of atmospheric factors. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 73, 578–586. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.11.021>
- de Troya Martín, M., Blázquez Sánchez, N., García Harana, C., Alarcón Leiva, M.C., Aguilera Arjona, J., Rivas Ruiz, F., de Gálvez Aranda, M.V., 2020. “Beach Lifeguards’ Sun Exposure and Sun Protection in Spain.” *Saf. Health Work.* <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.10.003>
- de Vries, E., Sierra, M., Piñeros, M., Loria, D., Forman, D., 2016. The burden of cutaneous melanoma and status of preventive measures in Central and South America. *Cancer Epidemiol.* 44, S100–S109. <https://doi.org/10.1016/j.canep.2016.02.005>
- Delcourt, C., Cougnard-Grégoire, A., Boniol, M., Carrière, I., Doré, J.F., Delyfer, M.N., Rougier, M.B., Goff, M. Le, Dartigues, J.F., Barberger-Gateau, P., Korobelnik, J.F., 2014. Lifetime exposure to ambient ultraviolet radiation and the risk for cataract extraction and age-related macular degeneration: The alienor study. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 55, 7619–7627. <https://doi.org/10.1167/iovs.14-14471>
- Despotovic, M., Nedic, V., Despotovic, D., Cvetanovic, S., 2016. Evaluation of empirical models for predicting monthly mean horizontal diffuse solar radiation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 56, 246–260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.058>
- Despotovic, M., Nedic, V., Despotovic, D., Cvetanovic, S., 2015. Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52, 1869–1880. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.035>
- DGA, 2016. Atlas del Agua. Atlas del Agua Chile 2016 1, 24.

Dhomse, S.S., Kinnison, D., Chipperfield, M.P., Salawitch, R.J., Cionni, I., Hegglin, M.I., Abraham, N.L., Akiyoshi, H., Archibald, A.T., Bednarz, E.M., Bekki, S., Braesicke, P., Butchart, N., Dameris, M., Deushi, M., Frith, S., Hardiman, S.C., Hassler, B., Horowitz, L.W., Hu, R.M., Jöckel, P., Josse, B., Kirner, O., Kremser, S., Langematz, U., Lewis, J., Marchand, M., Lin, M., Mancini, E., Marécal, V., Michou, M., Morgenstern, O., O'Connor, F.M., Oman, L., Pitari, G., Plummer, D.A., Pyle, J.A., Revell, L.E., Rozanov, E., Schofield, R., Stenke, A., Stone, K., Sudo, K., Tilmes, S., Visioni, D., Yamashita, Y., Zeng, G., 2018. Estimates of ozone return dates from Chemistry-Climate Model Initiative simulations. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 8409–8438. <https://doi.org/10.5194/acp-18-8409-2018>

DMC, 2021. The Chilean Ultraviolet Radiation Network: monitoring and forecasting the UV index for health protection.

Durán, A., Monteagudo, J.M., Carnicer, A., San Martín, I., Serna, P., 2012. Solar photodegradation of synthetic apple juice wastewater: Process optimization and operational cost study. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 107, 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.07.001>

Dutton, C.N.L. and E.G., n.d. BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0.

EPA, 2020. Environmental Protection Agency (EPA) [WWW Document]. UV index Descr. URL <https://www.epa.gov/>

Escobedo, J.F., Gomes, E.N., Oliveira, A.P., & Soares, J., 2011. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renew. Energy* 36, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.018>

Escobedo, J.F., Gomes, E.N., Oliveira, A.P., & Soares, J., 2009. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Appl. Energy* 86, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.013>

Esteve, A.R., Martinez-Lozano J. A., Marín, M.J., Estellés, V., Tena, F., Utrillas, M.P., 2009. The influence of ozone and aerosols on the experimental values of UV erythemal radiation at ground level in Valencia. *Int. J. Climatol.* 2182, 2171–2182. <https://doi.org/10.1002/joc>

Eyheramendy, S., Martinez, F.I., Manevy, F., Vial, C., Repetto, G.M., 2015. Genetic structure characterization of Chileans reflects historical immigration patterns. *Nat. Commun.* 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms7472>

Feng, L., Wang, L., Gong, W., Lin, A., Hu, B., 2015. Estimation of hourly and daily ultraviolet solar irradiation under various sky conditions at Sanya, Southern China. *Theor. Appl. Climatol.* 121, 187–198. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1239-3>

Ferrero, E., Eory, M., Ferre, G., 2006. UV Effects on Aquatic and Coastal Ecosystems Vertical Mixing and Ecological Effects of Ultraviolet Radiation in Planktonic Communities. *Photochem. Photobiol.* 898–902. <https://doi.org/10.1562/2005-11-23-RA-736>

- Fioletov, V., Kerr, J.B., Fergusson, A., 2010. The UV index: Definition, distribution and factors affecting it. *Can. J. Public Heal.* 101, 15–19. <https://doi.org/10.1007/bf03405303>
- Fioletov, V.E., Kerr, J.B., McArthur, L.J.B., Wardle, D.I., Mathews, T.W., 2003. Estimating UV index climatology over Canada. *J. Appl. Meteorol.* 42, 417–433. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<0417:EUCOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0417:EUCOC>2.0.CO;2)
- Fitzpatrick, T.B., 1988. The Validity and Practicality of Sun-Reactive Skin Types I Through VI. *Arch Dermatol.* 124, 869–871. <https://doi.org/doi:10.1001/archderm.1988.01670060015008>
- Flament, F., Bazin, R., Laquieze, S., Rubert, V., Simonpietri, E., Piot, B., 2013. Effect of the sun on visible clinical signs of aging in Caucasian skin. *Clin. Cosmet. Investig. Dermatol.* 6, 221–232. <https://doi.org/10.2147/CCID.S44686>
- Foyo-Moreno, I., Alados, I., Alados-Arboledas, L., 2007. Adaptation of an empirical model for erythemal ultraviolet irradiance. *Ann. Geophys.* 25, 1499–1508. <https://doi.org/10.5194/angeo-25-1499-2007>
- Fujishima, A., Rao, T.N., Tryk, D.A., 2000. Titanium dioxide photocatalysis. *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.* 1, 1–21.
- Fuks, K.B., Woodby, B., Valacchi, G., 2019. Skin damage by tropospheric ozone. *Leitthema* 70, 163–168. <https://doi.org/10.1007/s00105-019-4361-4>
- Furlan, de Oliveira, A.P., Soares, J., Codato, G., Escobedo, J.F., 2012. The role of clouds in improving the regression model for hourly values of diffuse solar radiation. *Appl. Energy* 92, 240–254. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.032>
- Gallardo, L., Olivares, G., Langner, J., Aarhus, B., 2002. Coastal lows and sulfur air pollution in Central Chile. *Atmos. Environ.* 36, 3829–3841. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00285-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00285-6)
- Gandía, S., Utrillas, M.P., Gómez-Amo, J.L., Esteve, A.R., Estellés, V., P., R., ..., & Martínez Lozano, J.A., 2015. Relationship between UVB and broadband solar radiation in Spain. *Int. J. Climatol.* 1771, 1761–1771. <https://doi.org/10.1002/joc.4088>
- Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D., 2020. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40, 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Ghoneim, A.A., Kadad, I.M., Altouq, M.S., 2013. Statistical analysis of solar UVB and global radiation in Kuwait. *Energy* 60, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.027>
- Giles, D.M., Sinyuk, A., Sorokin, M.G., Schafer, J.S., Smirnov, A., Slutsker, I., Eck, T.F., Holben, B.N., Lewis, J.R., Campbell, J.R., Welton, E.J., Korkin, S. V, Lyapustin, A.I., 2019. Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database – automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD)

measurements 169–209.

- González-Rodríguez, L., de Oliveira, A.P., Rodríguez-López, L., Rosas, J., Contreras, D., Baeza, A.C., 2021a. A Study of UVER in Santiago , Chile Based on Long-Term In Situ Measurements (Five Years) and Empirical Modelling. *Energies* 14, 21. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en14020368>
- González-Rodríguez, L., Jiménez, J., Rodríguez-lópez, L., Oliveira, A.P. De, 2021b. Ultraviolet erythemat radiation in Central Chile : direct and indirect implication for public health. *Air Qual. Atmos. Heal.*
- González-Rodríguez, Pérez, L., Fissore, A., Rodríguez-López, L., Jimenez, and J., 2017. Tilt and Orientation of a Flat Solar Collector to Capture Optimal Solar Irradiation in Chilean Latitudes, in: Springer (Ed.), *Proceedings of the 2nd International Conference on BioGeoSciences*. pp. 215–228.
- González-Rodríguez, Rosas, J., de Oliveira, A.P., Rodríguez, L., Contreras, D., & Baeza, C., 2019. Modeling of hourly and daily values of erythemat ultraviolet radiation in Santiago de Chile City, in: *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019*. Santiago de Chile, pp. 2213–2222. <https://doi.org/10.18086/swc.2019.45.04>
- Gramsch, Reyes, F., Va, Y., & Oyola, P., 2016a. Prevalence of freshly generated particles during pollution episodes in Santiago de Chile. *Aerosol Air Qual. Res.* 16, 2172–2185. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.12.0691>
- Gramsch, Reyes, F., Vásquez, Y., Oyola, P., Rubio, M.A., 2016b. Prevalence of freshly generated particles during pollution episodes in Santiago de Chile. *Aerosol Air Qual. Res.* 16, 2172–2185. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.12.0691>
- GRATZEL, M., 2007. Photovoltaic and photoelectrochemical conversion of solar energy. *Phil. Trans. R. Soc. A* 933–1005.
- Gueymard, C.A., 2004. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Sol. Energy* 76, 423–453. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.039>
- Gueymard, C.A., 2001. Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Sol. Energy* 71, 325–346. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00054-8)
- Gueymard, C.A., Myers, D., Emery, K., 2002. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing. *Sol. Energy* 73, 443–467. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00005-7)
- Häder, D.P., Kumar, H.D., Smith, R.C., & Worrest, R.C., 2007. Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochem. Photobiol. Sci.* 6, 267–285. <https://doi.org/10.1039/b700020k>
- Hagihara, Y., Okamoto, H., Yoshida, R., 2010. Development of a combined CloudSat-CALIPSO cloud

mask to show global cloud distribution. *J. Geophys. Res. Atmos.* 115, 1–17.
<https://doi.org/10.1029/2009JD012344>

Harrison, G.I., Young, A.R., 2002. Ultraviolet radiation-induced erythema in human skin. *Methods* 28, 14–19. [https://doi.org/10.1016/S1046-2023\(02\)00205-0](https://doi.org/10.1016/S1046-2023(02)00205-0)

He, Q.C., Tavakkol, A., Wietecha, K., Begum-Gafur, R., Ansari, S.A., Polefka, T., 2006. Effects of environmentally realistic levels of ozone on stratum corneum function. *Int. J. Cosmet. Sci.* 28, 349–357. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2494.2006.00347.x>

Hearing, M.B. and V.J., 2008. The Protective Role of Melanin Against UV Damage in Human Skin. *Photochem Photobiol.* 84, 539–549. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2007.00226.x>.

Hegglin, M.I., Shepherd, T.G., 2009. Large climate-induced changes in ultraviolet index and stratosphere-to-troposphere ozone flux. *Nat. Geosci.* 2, 687–691. <https://doi.org/10.1038/ngeo604>

Heimo, A., Vernez, A., Wasserfallen, and P., 1993. Baseline Surface Radiation Network (BSRN): Concept and Implementation of a BSRN station.

Hodzic, A., Madronich, S., 2018. Response of surface ozone over the continental United States to UV radiation declines from the expected recovery of stratospheric ozone. *Clim. Atmos. Sci.* 1, 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0045-5>

Hoque, M.E., Cloutier, F., Arcieri, C., McInnes, M., Sultana, T., Murray, C., Vanrolleghem, P.A., Metcalfe, C.D., 2014. Removal of selected pharmaceuticals, personal care products and artificial sweetener in an aerated sewage lagoon. *Sci. Total Environ.* 487, 801–812. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.063>

IARC, 2021. WHO Cancer Mortality Database [WWW Document]. URL <https://www-dep.iarc.fr/>

ICNIRP, 2004. Guidelines Radiation of Wavelengths Between 180 nm and 400 nm. *Health Phys.* 87, 171–186.

INN, 1977. NORMA CHILENA OFICIAL NCh1079.Of77. Arquitectura y construcción - Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico.

Iny, J., Coull, B.A., And, A.Z., Koutrakis, P., 2015. The impact of nitrogen oxides concentration decreases on ozone trends in the USA. *Air Qual. Atmos. Heal.* 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.03.040>

Iqbal, M., 1983. *An Introduction to Solar Radiation.*, Academic P. ed. Canada.

Jacob, S.M.F.& D.J., 1992. Surface ozone depletion in Arctic spring sustained by bromine reactions on aerosols. *Nature* 359, 710–713.

- Jacovides, C.P., Tymvios, F.S., Asimakopoulos, D. N., Kaltsounides, N.A., Theoharatos, G.A.&, Tsitouri, M., 2009. Solar global UVB (280-315 nm) and UVA (315-380 nm) radiant fluxes and their relationships with broadband global radiant flux at an eastern Mediterranean site. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1188–1200. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.02.009>
- Janjai, S., Buntung, S., Wattan, R., Masiri, I., 2010. Mapping solar ultraviolet radiation from satellite data in a tropical environment. *Remote Sens. Environ.* 114, 682–691. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.008>
- Jiabin, Qingsong, Chengjin, Zhao, 2018. Modulation of valence band maximum edge and photocatalytic activity of BiOX by incorporation of halides. *Chemosphere* 191, 427–437. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.149>
- Jordá, L.S.J., Martín, M.M.B., Gómez, E.O., Reina, A.C., Sánchez, I.M.R., López, J.L.C., Pérez, J.A.S., 2011. Economic evaluation of the photo-Fenton process. Mineralization level and reaction time: The keys for increasing plant efficiency. *J. Hazard. Mater.* 186, 1924–1929. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.100>
- Jubran, B.A., Ismail, A.F., Pervez, T., 2000. Prediction of the performance of a solar water detoxification system under Malaysian climatic conditions. *Energy Convers. Manag.* 41, 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00092-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00092-8)
- Kalogirou, S., 2014. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Amsterdam.
- Kalogirou, S.A., Pashiardis, S., & Pashiardi, A., 2017. Statistical analysis and inter-comparison of erythemal solar radiation for Athalassa and Larnaca, Cyprus. *Renew. Energy* 111, 580–597. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.043>
- Kim, J., Lee, Y.G., Koo, J., 2020. Surface Erythemal UV and Global Horizontal Irradiance in Korea. *Energies*.
- Kim, J.E., Ryu, S.Y., Kim, Y.J., 2008. Determination of radiation amplification factor of atmospheric aerosol from the surface UV irradiance measurement at Gwangju, Korea. *Theor. Appl. Climatol.* 91, 217–228. <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0285-x>
- Klein, S.A., 1976. Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces. *Sol. Energy* 19, 325–329.
- Koepke, P., Bais, A., Balis, D., Buchwitz, M., De Backer, H., De Cabo, X., Eckert, P., Eriksen, P., Gillotay, D., Heikkilä, A., Koskela, T., Lapeta, B., Litynska, Z., Lorente, J., Mayer, B., Renaud, A., Ruggaber, A., Schauburger, G., Seckmeyer, G., Seifert, P., Schmalwieser, A., Schwander, H., Vanicek, K., Weber, M., 1998. Comparison of Models Used for UV Index Calculations. *Photochem. Photobiol.* 67, 657–662. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1998.tb09109.x>
- Koronakis, P.S., Sfantos, G.K., Paliatsos, A.G., Kaldellis, J.K., Garofalakis, J.E., Koronaki, I.P., 2002.

Interrelations of UV-global/global/diffuse solar irradiance components and UV-global attenuation on air pollution episode days in Athens, Greece. *Atmos. Environ.* 36, 3173–3181. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00233-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00233-9)

Kudish, & Evseev, E., 2000. STATISTICAL RELATIONSHIPS BETWEEN SOLAR UVB AND UVA RADIATION AND GLOBAL RADIATION MEASUREMENTS AT TWO SITES IN ISRAEL. *Int. J. Climatol.* 770, 759–770.

Kudish, A., Evseev, E.G., 2020. An empirical correlation between erythemal UVB and global irradiation developed for a single site and tested at two sites in Israel. *Theor. Appl. Climatol.* 142, 237–242. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03306-0>

Kudish, A.I., Evseev, G., 2011. The analysis of solar UVB radiation as a function of solar global radiation , ozone layer thickness and aerosol optical density. *Renew. Energy* 36, 1854–1860. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.12.008>

Kudish, A.I., Lyubansky, V., Evseev, E.G., Janetz, A., 2005. Inter-comparison of the solar UVB, UVA and global radiation clearness and UV indices for Beer Sheva and Neve Zohar (Dead Sea), Israel. *Energy* 30, 1623–1641. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.033>

Lamy, K., Portafaix, T., Josse, B., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., Revell, L., Akiyoshi, H., Bekki, S., Hegglin, M.I., Jöckel, P., Kirner, O., Liley, B., Marecal, V., Morgenstern, O., Stenke, A., Zeng, G., Luke Abraham, N., Archibald, A.T., Butchart, N., Chipperfield, M.P., Di Genova, G., Deushi, M., Dhomse, S.S., Hu, R.M., Kinnison, D., Kotkamp, M., McKenzie, R., Michou, M., O'Connor, F.M., Oman, L.D., Pitari, G., Plummer, D.A., Pyle, J.A., Rozanov, E., Saint-Martin, D., Sudo, K., Tanaka, T.Y., Visioni, D., Yoshida, K., 2019. Clear-sky ultraviolet radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative. *Atmos. Chem. Phys.* 19, 10087–10110. <https://doi.org/10.5194/acp-19-10087-2019>

Lapere, R., Mailler, S., Menut, L., 2021a. The 2017 mega-fires in central chile: Impacts on regional atmospheric composition and meteorology assessed from satellite data and chemistry-transport modeling. *Atmosphere (Basel)*. 12. <https://doi.org/10.3390/atmos12030344>

Lapere, R., Menut, L., Mailler, S., Huneus, N., 2021b. Seasonal variation in atmospheric pollutants transport in central Chile: Dynamics and consequences. *Atmos. Chem. Phys.* 21, 6431–6454. <https://doi.org/10.5194/acp-21-6431-2021>

Lehmann, M., Pfahlberg, A.B., Sandmann, H., Uter, W., & Gefeller, O., 2019. Public health messages associated with low uv index values need reconsideration. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16. <https://doi.org/10.3390/ijerph16122067>

Lenoble, J., 1998. Modeling of the influence of snow reflectance on ultraviolet irradiance for cloudless sky. *Appl. Opt.* 37, 2441. <https://doi.org/10.1364/ao.37.002441>

Li, M., Wang, T., Xie, M., Zhuang, B., Li, S., Han, Y., Chen, P., 2017. Impacts of aerosol-radiation

feedback on local air quality during a severe haze episode in Nanjing megacity, eastern China. *Tellus, Ser. B Chem. Phys. Meteorol.* 69, 1–16. <https://doi.org/10.1080/16000889.2017.1339548>

Lofrano, G., Libralato, G., Casaburi, A., Siciliano, A., Iannece, P., Guida, M., Pucci, L., Dentice, E.F., Carotenuto, M., 2018. Municipal wastewater spiramycin removal by conventional treatments and heterogeneous photocatalysis. *Sci. Total Environ.* 624, 461–469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.145>

Lu, H., Fan, W., Dong, H., Liu, L., 2017. Dependence of the irradiation conditions and crystalline phases of TiO₂ nanoparticles on their toxicity to *Daphnia magna*. *Environ. Sci. Nano* 4, 406–414. <https://doi.org/10.1039/c6en00391e>

Lucas, R., McMichael, T., Smith, W., Armstrong, B., 2006. Solar Ultraviolet Radiation: Global burden of disease from solar ultraviolet radiation, World Health Organization. Geneva.

Madronich, S. & Flocke, S., 1995. Solar ultraviolet radiation, in: Springer (Ed.), Series I: Advanced Study Institute. pp. 23–48.

Madronich Sasha, 1993. Environmental Effects of UV, in: Tevini, M. (Ed.), UV Radiation in the Natural and Perturbed Atmosphere. NATO-ASI Series, National Center for Atmospheric Research Boulder. Colorado USA.

Mahmoodi, V., Ahmadpour, A., Bastami, T.R., Mosavian, M.T.H., 2018. PVP assisted synthesis of high efficient BiOI/Graphene oxide nanohybrid and its photocatalytic performance in degradation of organic dye pollutants. *Sol. Energy* 176, 483–495. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.056>

Malato, Blanco, J., Fernández-Alba, Agüera, A., 2000. Solar photocatalytic mineralization of commercial pesticides: acrinathrin. *Chemosphere* 40, 403–409. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00267-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00267-2)

Malato, Blanco, J., Vidal, A., Richter, C., 2002. Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: An overview. *Appl. Catal. B Environ.* 37, 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(01\)00315-0](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(01)00315-0)

Malato, S., Blanco, J., Fernández-Alba, A., Agüera, A., 2003. Solar photocatalytic mineralization of commercial pesticides: Oxamyl. *Chemosphere* 40, 403–409. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(99\)00267-2](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(99)00267-2)

Malato, S., Blanco, J., Richter, C., Fernández, P., Maldonado, M.I., Kaneco, S., Rahman, M.A., Suzuki, T., Katsumata, H., Ohta, K., Alfano, O.M., Bahnemann, D., Cassano, A.E., Dillert, R., Goslich, R., 2000. Optimization of solar photocatalytic degradation conditions of bisphenol A in water using titanium dioxide. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 58, 199–230. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2004.01.012>

Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado, M.I., Blanco, J., Gernjak, W., 2009. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. *Catal. Today* 147, 1–59.

<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.06.018>

- Malato, S., Maldonado, M.I., Fernández-ibáñez, P., Oller, I., Polo, I., Sánchez-moreno, R., 2016. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis : The pilot plants of the Plataforma Solar de Almeria. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 42, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.017>
- Malinovic-Milicevic, S., Vyklyuk, Y., Radovanovic, M.M., Petrovic, M.D., 2018. Long-term erythematultraviolet radiation in Novi Sad (Serbia) reconstructed by neural network modelling. *Int. J. Climatol.* 38, 3264–3272. <https://doi.org/10.1002/joc.5499>
- Marín, M.J., Sola, Y., Tena, F., Utrillas, M.P., Campmany, E., de Cabo, X., Lorente, J., Martínez-Lozano, J.A., 2005. The UV Index on the Spanish Mediterranean Coast. *Photochem. Photobiol.* 81, 659. <https://doi.org/10.1562/2004-11-25-ra-380.1>
- Mayer, B., Kylling, A., 2005. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - Description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 1855–1877. <https://doi.org/10.5194/acp-5-1855-2005>
- Mbonimpa, E.G., Iii, E.R.B., Applegate, B., Jr, W.F.H., 2018. Ultraviolet A and B wavelength-dependent inactivation of viruses and bacteria in the water. *J. Water Health* 796–806. <https://doi.org/10.2166/wh.2018.071>
- McKenzie, B. y, 1996. An algorithm for inferring surface UV irradiance including cloud effects. *J. Appl. Meteorol.*
- McKenzie, R., Bodeker, G., Scott, G., Slusser, J., Lantz, K., 2006. Geographical differences in erythemally-weighted UV measured at mid-latitude USDA sites. *Photochem. Photobiol. Sci.* 5, 343–352. <https://doi.org/10.1039/b510943d>
- McKenzie, R.L., Liley B., J., & Björn, L.O., 2009. UV radiation: Balancing risks and benefits. *Photochem. Photobiol.* 85, 88–98. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2008.00400.x>
- McKenzie, R.L., Lucas, R.M., 2018. Reassessing Impacts of Extended Daily Exposure to Low Level Solar UV Radiation. *Sci. Rep.* 8, 1–5. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32056-3>
- Mckenzie, R.L., Matthews, W.A., 1991. THE RELATIONSHIP BETWEEN ERYTHEMAL UV AND OZONE, DERIVED FROM SPECTRAL IRRADIANCE MEASUREMENT. *Geophys. Res. Lett.* 18.
- McKinlay, A.F. and Diffey, B.L., 1987. A Reference Action Spectrum for Ultraviolet Induced Erythema in Human Skin. *CIE J.* 6, 17–22.
- Mechenrikunnel, A.T., Lee, B.R., Kyle, H, L., Major, E.R., 1988. Intercomparison of Solar Total Irradiance Data From Recent Spacecraft Measurements. *J. Geophysic Research* 93, 9503–9509.

- Mehos, M., Turchi, C., Boegel, A.J., Merrill, T., Stanley, R., 1992. Pilot-Scale Study of the Solar Detoxification of Groundwater. Sandia National Laboratories 92016405.
- Meierhofer, R., 2006. Establishing Solar Water Disinfection as a water treatment method at household level. *Madagascar Conserv. Dev.* 1, 0–5.
- Menares, C., Gallardo, L., Kanakidou, M., Seguel, R., Huneus, N., 2020. Increasing trends (2001–2018) in photochemical activity and secondary aerosols in Santiago, Chile. *Tellus, Ser. B Chem. Phys. Meteorol.* 72, 1–18. <https://doi.org/10.1080/16000889.2020.1821512>
- Miguel, A., Bilbao, J., Román, R., Mateos, D., 2012. Measurements and attenuation of erythemal radiation in Central Spain. *Int. J. Climatol.* 32, 929–940. <https://doi.org/10.1002/joc.2319>
- Miyauchi, M., Nakajima, H., 2016. Determining an Effective UV Radiation Exposure Time for Vitamin D Synthesis in the Skin Without Risk to Health: Simplified Estimations from UV Observations. *Photochem. Photobiol.* 92, 863–869. <https://doi.org/10.1111/php.12651>
- MMA, 2020. Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente. Santiago de Chile.
- MMA, 2017. ESTABLECE PLAN DE PREVENCIÓN Y DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LA REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Chile.
- Modenese, A., Korpinen, L., Gobba, F., 2018. Solar radiation exposure and outdoor work: An underestimated occupational risk. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 1–24. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102063>
- Moisan, S., Herrera, R., Clements, A., 2018. A dynamic multiple equation approach for forecasting PM2.5 pollution in Santiago, Chile. *Int. J. Forecast.* 34, 566–581. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2018.03.007>
- Monks, P.S., Archibald, A.T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K.S., Mills, G.E., Stevenson, D.S., Tarasova, O., Thouret, V., Von Schneidmesser, E., Sommariva, R., Wild, O., Williams, M.L., 2015. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmos. Chem. Phys.* 15, 8889–8973. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>
- Morata, D., Polvé, M., Valdés, A., Belmar, M., Dinator, M.I., Silva, M., Leiva, M.A., Aigouy, T., Morales, J.R., 2008. Characterisation of aerosol from Santiago, Chile: an integrated PIXE–SEM–EDX study. *Environ. Geol.* 56, 81–95. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1141-8>
- Moreno, J.C., Serrano, M.A., Lorente, M., Cañada, J., Utrillas, M.P., 2013. An empirical model of erythemal ultraviolet radiation in the city of Valencia, Spain. *Photochem. Photobiol. Sci.* 12, 1707–1716. <https://doi.org/10.1039/c3pp25439a>

- Murillo, W., Cañada, J., Pedrós, G., 2003. Correlation between global ultraviolet (290-385nm) and global irradiation in Valencia and Cordoba (Spain). *Renew. Energy* 28, 409–418. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00039-3)
- Myhre, G., Samset, B.H., Schulz, M., Balkanski, Y., Bauer, S., Berntsen, T.K., Bian, H., Bellouin, N., Chin, M., Diehl, T., Easter, R.C., Feichter, J., Ghan, S.J., Hauglustaine, D., Iversen, T., Kinne, S., Kirkevåg, A., Lamarque, J.F., Lin, G., Liu, X., Lund, M.T., Luo, G., Ma, X., Van Noije, T., Penner, J.E., Rasch, P.J., Ruiz, A., Seland, Skeie, R.B., Stier, P., Takemura, T., Tsigaridis, K., Wang, P., Wang, Z., Xu, L., Yu, H., Yu, F., Yoon, J.H., Zhang, K., Zhang, H., Zhou, C., 2013. Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 1853–1877. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1853-2013>
- Navarro, S., Fenoll, J., Vela, N., Ruiz, E., Navarro, G., 2009. Photocatalytic degradation of eight pesticides in leaching water by use of ZnO under natural sunlight. *J. Hazard. Mater.* 172, 1303–1310. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.137>
- Nikolaou, V., Stratigos, A.J., 2014. Emerging trends in the epidemiology of melanoma. *Br. J. Dermatol.* 170, 11–19. <https://doi.org/10.1111/bjd.12492>
- NREL, 1993. Users Manual for SERI QC Software.
- Obra, I. De, Ponce-robles, L., Miralles-cuevas, S., Oller, I., Malato, S., 2017. Microcontaminant removal in secondary effluents by solar photo-Fenton at circumneutral pH in raceway pond reactors. *Catal. Today* 287, 10–14. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.12.028>
- Ogunjobi, K.O., Kim, Y.J., 2004. Ultraviolet (0.280-0.400 μm) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: Analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. *Atmos. Res.* 71, 193–214. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.05.001>
- Osses, P., Escobar, R., del Rio, C., Garcia, R., Vargas, C., 2017. El clima desértico costero con nublados abundantes del desierto de atacama y su relación con los recursos naturales energía solar y agua de niebla. Caso de estudio alto patache (20,5°S), región de tarapacá, Chile. *Rev. Geogr. Norte Gd.* 48, 33–48. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022017000300033>
- Palancar, G.G., Olcese, L.E., Achad, M., López, M.L., Toselli, B.M., 2017. A long term study of the relations between erythemal UV-B irradiance, total ozone column, and aerosol optical depth at central Argentina. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 198, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.05.002>
- Palancar, G.G., Toselli, B.M., 2004. Effects of meteorology on the annual and interannual cycle of the UV-B and total radiation in Córdoba City, Argentina. *Atmos. Environ.* 38, 1073–1082. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.10.057>
- Palma, G., Sánchez, A., Olave, Y., Encina, F., Palma, R., Barra, R., 2004. Pesticide levels in surface waters in an agricultural-forestry basin in Southern Chile. *Chemosphere* 57, 763–770.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.047>

- Parker, E.R., 2021. The influence of climate change on skin cancer incidence – A review of the evidence. *Int. J. Women's Dermatology* 7, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijwd.2020.07.003>
- Parra, R., Cadena, E., Flores, C., 2019. Maximum UV index records (2010-2014) in Quito (Ecuador) and its trend inferred from remote sensing data (1979-2018). *Atmosphere (Basel)*. 10. <https://doi.org/10.3390/ATMOS10120787>
- Parrish, D.D., Ryerson, T.B., Holloway, J.S., Trainer, M., Fehsenfeld, F.C., 1999. New directions: Does pollution increase or decrease tropospheric ozone in Winter-Spring? *Atmos. Environ.* 33, 5147–5149. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00253-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00253-8)
- Pashiardis, Kalogirou, A., P., 2017. Statistical Analysis and InterComparison of Solar UVA and Global Radiation for Athalassa and Larnaca, Cyprus. *SM J. Biometrics Biostat.* 2, 1–16. <https://doi.org/10.36876/smjbb.1020>
- Pereira, Vilar, J.P., Borges, M.T., Gonza, O., Esplugas, S., Boaventura, R.A.R., 2011. Photocatalytic degradation of oxytetracycline using TiO₂ under natural and simulated solar radiation. *Sol. Energy* 85, 2732–2740. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.012>
- Piacentini, R.D., Cede, A., Bárcena, H., 2003. Extreme solar total and UV irradiances due to cloud effect measured near the summer solstice at the high-altitude desertic plateau Puna of Atacama (Argentina). *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 65, 727–731. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(03\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(03)00084-1)
- Piacentini, R.D., Cede, A., Bárcena, H., Salum, G.M., Fraidenaich, N., Tiba, C., 2011. Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 65, 727–731. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.009>
- Pino, P., Iglesias, V., Garreaud, R., Cortés, S., Canals, M., Folch, W., Burgos, S., Levy, K., Naeher, L.P., Steenland, K., 2015. Chile confronts its environmental health future after 25 years of accelerated growth. *Ann. Glob. Heal.* 81, 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.06.008>
- Rafiq, L., Tajbar, S., Manzoor, S., 2017. Long term temporal trends and spatial distribution of total ozone over Pakistan. *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.* 20, 295–301. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.05.002>
- Rappenglück, B., Oyola, P., Olaeta, I., & Fabian, P. (2000)., 2000. The evolution of photochemical smog in the Metropolitan Area of Santiago de Chile. *J. Appl. Meteorol.* 39, 275–290. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<0275:TEOPSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<0275:TEOPSI>2.0.CO;2)
- Ravanat, J.-L., Douki, T., Cadet, J., 2001. Direct and indirect effects of UV radiation on DNA and its components. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 63, 88–102. <https://doi.org/10.3109/00016925409177218>

- Reda, A., 2004. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Sol. Energy* 76, 577–589. <https://doi.org/doi:10.1016/j.solener.2003.12.003>
- Reina, A.C., Cornejo, L., Pomares, L., Polo, J., Oller, I., Malato, S., 2019. The influence of location on solar photo-Fenton: process performance, photoreactor scaling-up and treatment cost. *Renew. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.113>
- Ribeiro, C.S., Brandestini, M.D., Moro, C.C., Lansarin, M.A., 2019. A fair comparison between bismuth catalysts for application in photodegradation under visible and solar light. *Brazilian J. Chem. Eng.* 36, 201–208. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190361s20170498>
- Riordan, B. and, 1986. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 25, 57–71.
- Riordan, C.J., Hulstrom, R.L., Myers, D.R., 1990. Influences of Atmospheric Conditions and Air Mass on the Ratio of Ultraviolet to Total Solar Radiation. Colorado, EEUU.
- Rivas A, M., Rojas E, E., Madronich, S., 2009. Aumento Del Índice Solar Ultravioleta Con La Altura. *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.* 16. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052008000200013>
- Rivas, M., Araya, M.C., Caba, F., Rojas, E., Calaf, G.M., 2011. Ultraviolet light exposure influences skin cancer in association with latitude. *Oncol. Rep.* 25, 1153–1159. <https://doi.org/10.3892/or.2011.1164>
- Rivas, M., Calaf, G.M., Laroze, D., Rojas, E., Mendez, J., Honeyman, J., Araya, M.C., 2020. Solar ultraviolet A radiation and nonmelanoma skin cancer in Arica, Chile. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 212, 112047. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.112047>
- Rivas, M., Rojas, E., 2018. Effects of ozone layer variation in Ultraviolet solar radiation level received at ground in Arica north of Chile. *J. Phys. Conf. Ser.* 1043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1043/1/012066>
- Rivas, M., Rojas, E., Araya, M.C., Calaf, G.M., 2015. Ultraviolet light exposure, skin cancer risk and vitamin D production. *Oncol. Lett.* 10, 2259–2264. <https://doi.org/10.3892/ol.2015.3519>
- Rivas, M., Rojas, E., Calaf, G.M., 2014a. Skin cancer risk affected by ultraviolet solar irradiance in Arica, Chile. *Oncol. Lett.* 7, 483–486. <https://doi.org/10.3892/ol.2013.1698>
- Rivas, M., Rojas, E., Calaf, G.M., Barberán, M., Liberman, C., De Paula Correa, M., 2017. Association between non-melanoma and melanoma skin cancer rates, vitamin D and latitude. *Oncol. Lett.* 13, 3787–3792. <https://doi.org/10.3892/ol.2017.5898>
- Rivas, M., Rojas E., E., Méndez C., J., Contreras A., G., 2014b. Dosis Eritémicas, Sobrexposición a la Radiación Solar Ultravioleta y Su Relación Con el Cáncer de Piel en Arica, Chile. *Interciencia* 39, 506–510.

- Rivas, M., Rojas E, E., Madronich, S., 2008. Aumento del índice solar ultravioleta con la altura. *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.* 16, 383–388. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052008000200013>
- Robaa, S.M., 2008. On the estimation of UV-B radiation over Egypt. *Idojaras* 112, 45–60.
- Rodríguez-López, L., González-Rodríguez, L., Peñate-Alvariño, L., Cardenas, R., Parra, O., 2018. Influence of solar and geomagnetic storms on terrestrial photosynthesis. *E3S Web Conf.* 62. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186202007>
- Roman, R., 2014. Reconstrucción y análisis de la radiación ultravioleta eritemática en la Península Ibérica desde 1950.
- Rozas, O., Vidal, C., Baeza, C., Jardim, W.F., Rossner, A., Mansilla, H.D., 2016. Organic micropollutants (OMPs) in natural waters: Oxidation by UV/H₂O₂ treatment and toxicity assessment. *Water Res.* 98, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.069>
- Rubio, M.A., Oyola, P., Gramsch, E., Lissi, E., Pizarro, J., Villena, G., 2004. Ozone and peroxyacetylnitrate in downtown Santiago, Chile. *Atmos. Environ.* 38, 4931–4939. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.051>
- Sabatini-Ugarte, N., Molgó, M., Vial, G., 2018. Melanoma en Chile ¿Cuál es nuestra realidad? *Rev. Médica Clínica Las Condes* 29, 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2018.06.006>
- Sagripanti, J.L., Lytle, C.D., 2020. Estimated Inactivation of Coronaviruses by Solar Radiation With Special Reference to COVID-19. *Photochem. Photobiol.* 96, 731–737. <https://doi.org/10.1111/php.13293>
- Scambos, T., Stammerjohn, and S., 2020. State of the Climate in 2019. Antarctica and the Southern Ocean, *Bulletin of the American Meteorological Society.* <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0090.1>
- Seguel, R.J., Gallardo, L., Fleming, Z.L., Landeros, S., 2020. Two decades of ozone standard exceedances in Santiago de Chile. *Air Qual. Atmos. Heal.* 593–605. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00822-w>
- Serrano, A., Antón, M., Cancillo, M.L., Mateos, V.L., 2006. Daily and annual variations of erythemal ultraviolet radiation in Southwestern Spain. *Ann. Geophys.* 24, 427–441. <https://doi.org/10.5194/angeo-24-427-2006>
- Serrano, M.A., Cañada, J., Moreno, J.C., 2013. Erythemal ultraviolet solar radiation doses received by young skiers. *Photochem. Photobiol. Sci.* 12, 1976–1983. <https://doi.org/10.1039/c3pp50154j>
- Serrano, M.A., Cañada, J., Moreno, J.C., Gurrea, G., 2017. Solar ultraviolet doses and vitamin D in a northern mid-latitude. *Sci. Total Environ.* 574, 744–750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.102>

- Sharma, B.K., 2014. Environmental chemistry. India.
- Shepherd, T.G., 2007. Transport in the middle atmosphere. *J. Meteorol. Soc. Japan* 85 B, 165–191. <https://doi.org/10.2151/jmsj.85B.165>
- Silva, T.F.C.V., Fonseca, A., Saraiva, I., Boaventura, R.A.R., Vilar, V.J.P., 2016. Scale-up and cost analysis of a photo-Fenton system for sanitary landfill leachate treatment. *Chem. Eng. J.* 283, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.063>
- Singh, S., Singh, R., 2004. High-altitude clear-sky direct solar ultraviolet irradiance at Leh and Hanle in the western Himalayas : Observations and model calculations. *J. Geophysic Research* 109, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2004JD004854>
- Solano, F., 2020. Photoprotection and skin pigmentation: Melanin-related molecules and some other new agents obtained from natural sources. *Molecules* 25, 1–18. <https://doi.org/10.3390/molecules25071537>
- SSK, 2004. Die neue Klassifikation des solaren UV-Index (UVI) – Anpassung an die internationale Empfehlung der WHO –.
- Stolpe, N., Undurraga, P., 2016. Long term climatic trends in Chile and effects on soil moisture and temperature regimes. *Chil. J. Agric. Res.* 76, 487–496. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392016000400013>
- Su, W., Wang, J., Huang, Y., Wang, W., Wu, L., Wang, X.X., Liu, P., 2010. Synthesis and catalytic performances of a novel photocatalyst BiOF. *Scr. Mater.* 62, 345–348. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.10.039>
- Suárez, D.Acosta, C.Cadena, G.Suárez, 2018. RADIACIÓN UV ERITÉMICA EN LA PUNA: ESTUDIO ESTADÍSTICO DIARIO Y HORARIO PARA UN AÑO TÍPICO. *ASADES* 53, 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tereszchuk, K.A., Rochon, Y.J., McLinden, C.A., & Vaillancourt, P.A., 2018. Optimizing UV Index determination from broadband irradiances. *Geosci. Model Dev.* 11, 1093–1113. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1093-2018>
- Tiba, C., Silva Leal, S. Da, 2017. Enhancement of UV radiation by cloud effect in NE of Brazil. *Int. J. Photoenergy* 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8107435>
- Udo, S.O., 2000. Sky conditions at Ilorin as characterized by clearness index and relative sunshine. *Sol. Energy* 69, 45–53. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00008-6)
- Urraca, R., Sanz-Garcia, A., Sanz-Garcia, I., 2020. BQC: A free web service to quality control solar irradiance measurements across Europe. *Sol. Energy* 211, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.055>

- Urrejola, E., Antonanzas, J., Ayala, P., Salgado, M., Ramírez-Sagner, G., Cortés, C., Pino, A., Escobar, R., 2016. Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile. *Energy Convers. Manag.* 114, 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.016>
- Utrillas, M.P., Marín Fernández, M.J., Martínez, E., A. R., S., G. A., Suárez, H., Gandía Franco, S., & Martínez Lozano, J.A., 2018a. Relationship between erythemal UV and broadband solar irradiation at high altitude in Northwestern Argentina. *Energy* 162, 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.021>
- Utrillas, M.P., Marín, M.J., Esteve, A.R., Estellés, V., Gandía, S., Núñez, J.A., Martínez-Lozano, J.A., 2013. Ten years of measured UV Index from the Spanish UVB Radiometric Network. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 125, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2013.04.005>
- Utrillas, M.P., Marín, M.J., Esteve, A.R., Salazar, G., Suarez, H., Castillo, J., Martínez-Lozano, J.A., 2016. UVER and UV index at high altitude in Northwestern Argentina. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 163, 290–295. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.08.012>
- Utrillas, M.P., Marín, M.J., Esteve, A.R., Salazar, G., Suárez, H., Gandía, S., Martínez-Lozano, J.A., 2018b. Relationship between erythemal UV and broadband solar irradiation at high altitude in Northwestern Argentina. *Energy* 162, 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.021>
- Utrillas, M.P., Martínez-Lozano, J.A., Esteve, A.R., Serrano, D., Marín, M.J., 2012. UV Index experimental values on vertical surfaces. *Int. J. Climatol.* 32, 2066–2072. <https://doi.org/10.1002/joc.2423>
- Vanicek, K., Frei, T., 2005. UV- Index for the Public. Publ. Eur. Communities, Brussels, Belgium 1.
- Viale, M., Garreaud, R., 2015. Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitating clouds. *J. Geophys. Res.* 120, 4962–4974. <https://doi.org/10.1002/2014JD023014>
- Vicedo-Cabrera, A.M., Sera, F., Liu, C., Armstrong, B., Milojevic, A., Guo, Y., Tong, S., Lavigne, E., Kyselý, J., Urban, A., Orru, H., Indermitte, E., Pascal, M., Huber, V., Schneider, A., Katsouyanni, K., Samoli, E., Stafoggia, M., Scortichini, M., Hashizume, M., Honda, Y., Ng, C.F.S., Hurtado-Diaz, M., Cruz, J., Silva, S., Madureira, J., Scovronick, N., Garland, R.M., Kim, H., Tobias, A., Íñiguez, C., Forsberg, B., Åström, C., Ragettli, M.S., Rössli, M., Guo, Y.L.L., Chen, B.Y., Zanobetti, A., Schwartz, J., Bell, M.L., Kan, H., Gasparrini, A., 2020. Short term association between ozone and mortality: global two stage time series study in 406 locations in 20 countries. *BMJ* 368, 1–10. <https://doi.org/10.1136/bmj.m108>
- Vidal, A., Di, A.I., 2000. High-Performance, Low-Cost Solar Collectors for Disinfection of Contaminated Water. *Water Environ. Res.* 72, 1–6. <https://doi.org/10.2175/106143000X137473>
- Vimercati, L., De Maria, L., Caputi, A., Cannone, E.S.S., Mansi, F., Cavone, D., Romita, P., Argenziano, G., Di Stefani, A., Parodi, A., Peris, K., Scalvenzi, M., Girolomoni, G., Foti, C., 2020. Non-

melanoma skin cancer in outdoor workers: A study on actinic keratosis in Italian navy personnel. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072321>

Vivar, M., Fuentes, M., Pichel, N., López-Vargas, A., Rodrigo, M.J., Srithar, K., 2020. Photovoltaic and solar disinfection technology meeting the needs of water and electricity of a typical household in developing countries: From a Solar Home System to a full-functional hybrid system. *Sci. Total Environ.* 747, 141082. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141082>

Wald, L., 2012. Elements on the computation of UV maps in the Eurosun database.

Wang, L., Gong, W., Li, J., Ma, Y., Hu, B., 2014a. Empirical studies of cloud effects on ultraviolet radiation in Central China. *Int. J. Climatol.* 34, 2218–2228. <https://doi.org/10.1002/joc.3832>

Wang, L., Gong, W., Lin, A., Hu, B., 2014b. Measurements and cloudiness influence on UV radiation in Central China. *Int. J. Climatol.* 34, 3417–3425. <https://doi.org/10.1002/joc.3918>

Wang, N., Li, M., Huang, L., Zou, Z., Deng, Y., Liu, Yang, Chen, R., Liu, Yan, Yu, J., Yang, T., Hua, H., Yang, D., Ma, F., Li, X., 2020. The Relationship between PM_{2.5} and the Action Spectrum of Ultraviolet Radiation for Vitamin D Production Based on a Manikin Model. *IEEE Access* 8, 28718–28734. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971734>

Wang, Y., Yu, J., Gao, Q., Hu, L., Gao, N., Gong, H., Liu, Y., 2012. The Relationship between the Disability Prevalence of Cataracts and Ambient Erythral Ultraviolet Radiation in China. *PLoS One* 7, 1–8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051137>

Whiteman, D.C., Thompson, B.S., Thrift, A.P., Hughes, M.C., Muranushi, C., Neale, R.E., Green, A.C., Olsen, C.M., Webb, P.M., Jackman, L.M., Ranieri, B.A., Cicero, R.A., 2016. A Model to Predict the Risk of Keratinocyte Carcinomas. *J. Invest. Dermatol.* 136, 1247–1254. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2016.02.008>

WHO, 2018. Scientific assessment of ozone depletion: 2018. Geneva, Switzerland.

WHO, 2005. WHO: WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.

WHO, 2002a. Global solar UV index : a practical guide.

WHO, 2002b. Global Solar UV Index: A Practical Guide. Switzerland.

Wilson, S.R., Madronich, S., Longstreth, J.D., Solomon, K.R., 2019. Interactive effects of changing stratospheric ozone and climate on tropospheric composition and air quality, and the consequences for human and ecosystem health. *Photochem. Photobiol. Sci.* 18, 775–803. <https://doi.org/10.1039/C8PP90064G>

Young, A.H., Knapp, K.R., Inamdar, A., Hankins, W., Rossow, W.B., 2018a. The International Satellite

Cloud Climatology Project H-Series climate data record product. *Earth Syst. Sci. Data* 10, 583–593. <https://doi.org/10.5194/essd-10-583-2018>

Young, A.H., Knapp, K.R., Inamdar, A., Hankins, W., Rossow, W.B., 2018b. The International Satellite Cloud Climatology Project H-Series climate data record product. *Earth Syst. Sci. Data* 10, 583–593. <https://doi.org/10.5194/essd-10-583-2018>

Zaratti, F., Piacentini, R.D., Guillén, H.A., Cabrera, S.H., Liley, J. Ben, McKenzie, R.L., 2014. Proposal for a modification of the UVI risk scale. *Photochem. Photobiol. Sci.* 13, 980–985. <https://doi.org/10.1039/c4pp00006d>

Zemelman, Alvarado O, C., Valenzuela, V.B.P. and, 1990. Assessment of skin type, eye and hair color, freckles tendency in Chilean adolescents. *J Eur Acad Dermatol Venereol* 12, 321.

Zemelman, Viviana, Beck, V., Petra, A., Orlando, & Valenzuela, C.Y., 2002. Dimorfismo sexual en la pigmentación de la piel, color de ojos y pelo y presencia de pecas en adolescentes chilenos en dos estratos socioeconómicos. *Rev. Med. Chil.* 130, 879–884.

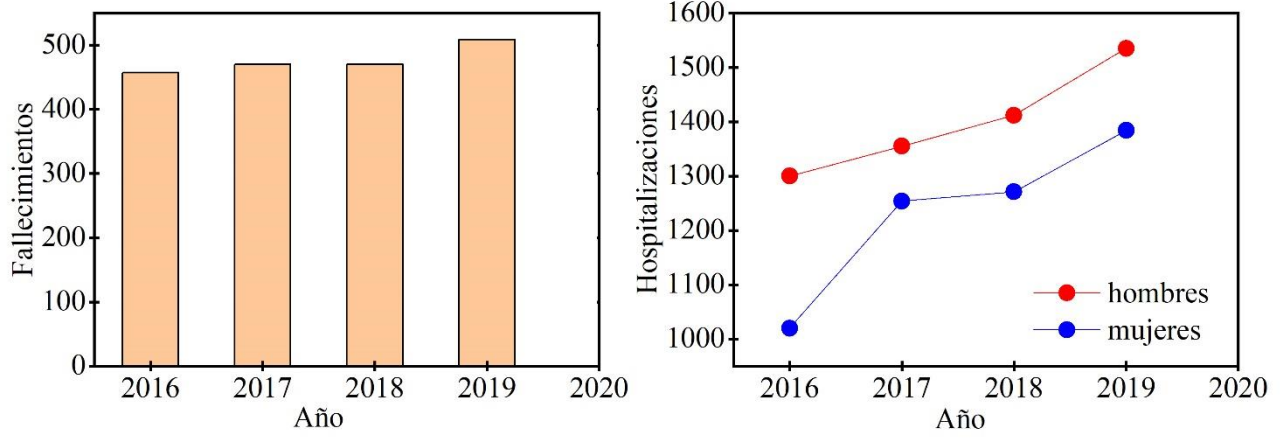
Zhang, H., Wang, J., García, L.C., Zeng, J., Dennhardt, C., Liu, Y., Krotkov, N.A., 2019. Surface erythemal UV irradiance in the continental United States derived from ground-based and OMI observations: Quality assessment, trend analysis and sampling issues. *Atmos. Chem. Phys.* 19, 2165–2181. <https://doi.org/10.5194/acp-19-2165-2019>

Zhou, Y., Meng, X., Belle, J.H., Zhang, H., Kennedy, C., Al-Hamdan, M.Z., Wang, J., Liu, Y., 2019. Compilation and spatio-temporal analysis of publicly available total solar and UV irradiance data in the contiguous United States. *Environ. Pollut.* 253, 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.074>

Zo, Jee, J., Kim, B., Lee, K., 2017. Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Quality Control of Solar Radiation Data on the Gangneung-Wonju National University Radiation Station. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.* 53, 11–19. <https://doi.org/10.1007/s13143-016-0029-5>

Anexos

Anexo I. Fallecimiento y hospitalizaciones por melanoma y otros tipos de cáncer en la piel en Chile.



Anexo II. Topografía y clasificación climática según Köppen.

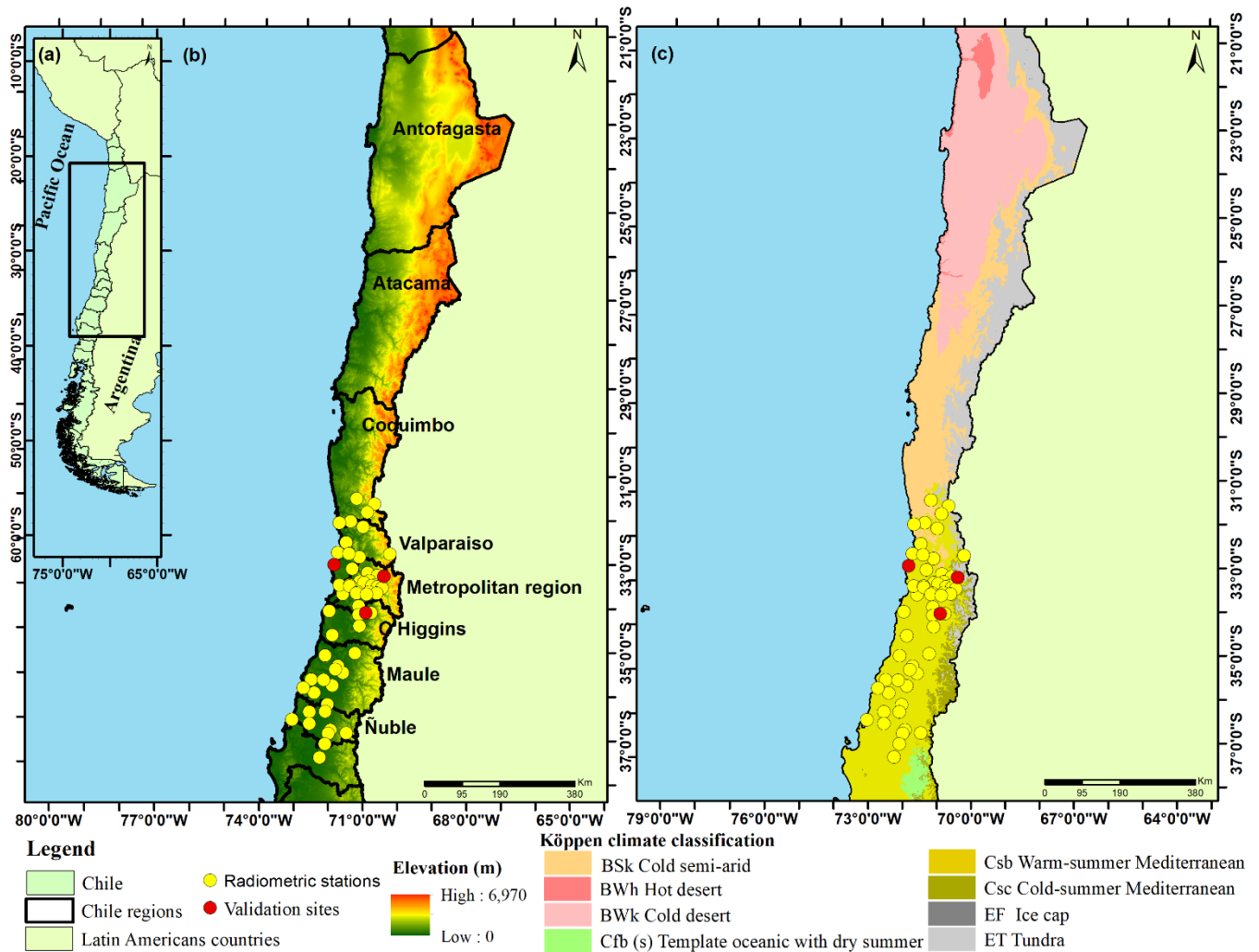


Figura 1. Representación topográfica y clasificación climática según Köppen.



Anexo II. Archivo generado para mostrar cómo se simularon los espectros observados en las ciudades de estudio.

```
ata_files_path /home/lgr/source-libRadtran-2.0.2/data/rte_solver twostr
atmosphere_file /home/lgr/source-libRadtran-2.0.2/data/atmmod/afglms.dat
aerosol_vulcan 1
aerosol_haze 5
aerosol_season 1
aerosol_visibility 20.0
aerosol_modify ssa scale 0.85
aerosol_amgstrom 1.1 0.2
wavelength 200.00 4000.00

albedo 0.16
source solar/home/lgr/source-libRadtran-2.0.2/data/solar_flux/Thekaekara.dat
mol_abs_param crs

aerosol_modify tau set 0.40

sza 0.00

altitude 6.00

mol_modify O3 309.00 DU

aerosol_set_tau_at_wvl 500.0 0.40

//wc_modify tau set 10.0
//wc_file 1D WC.DAT
```



Anexo III

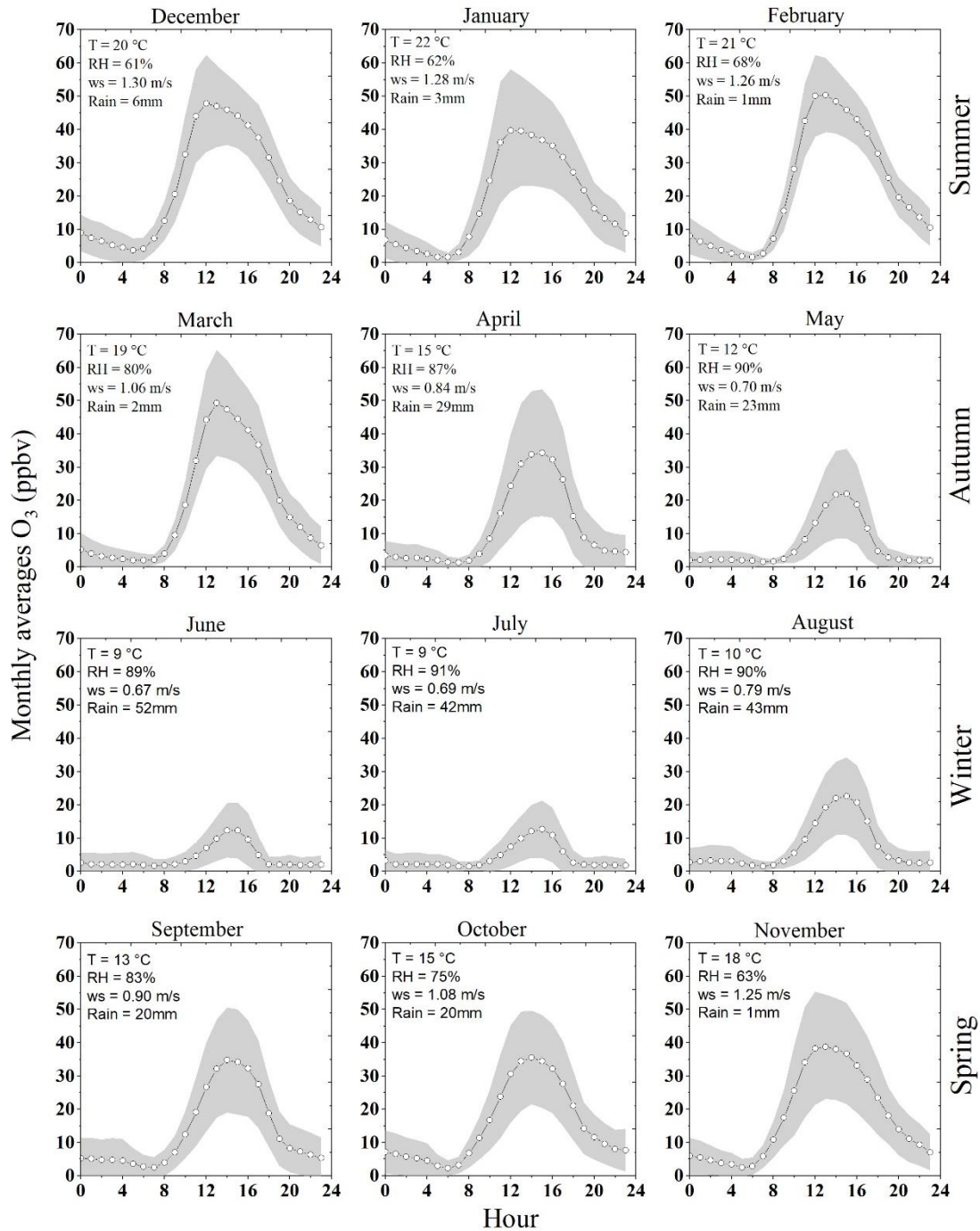


Figure S1. Valores mensuales de ozono troposférico por hora durante los años 2015-2018 en Santiago de Chile. Temperatura media mensual, humedad relativa, velocidad del viento y lluvia a las 8:00 LT mostradas dentro del gráfico.

Anexo IV

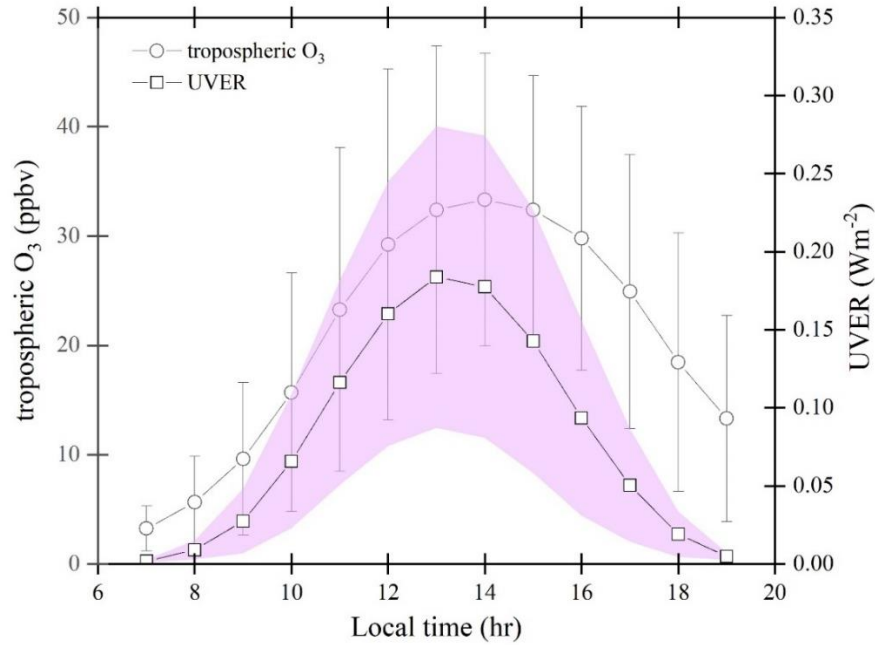


Figure S2. Valores mensuales horarios de  O₃ troposférico y UVER durante el periodo 2015-2018 para Santiago de Chile.

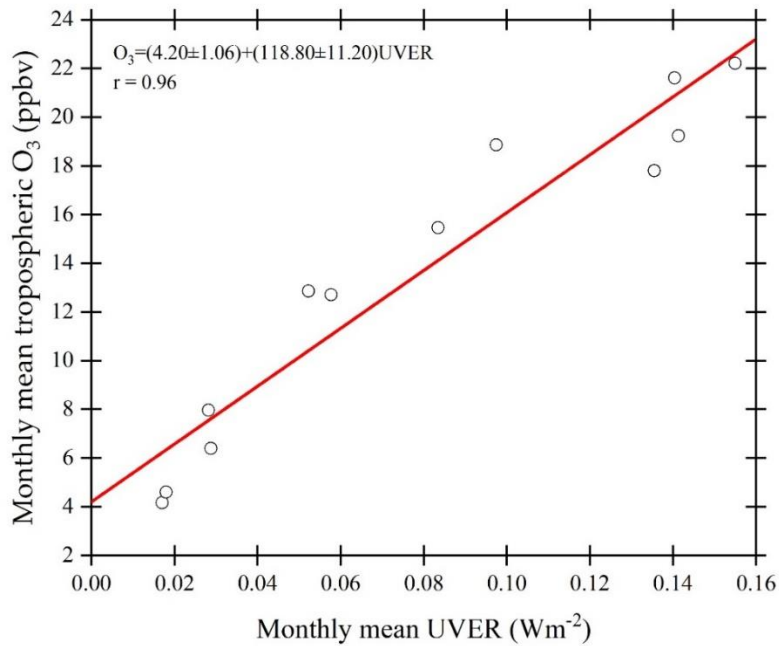


Figura S3. Regresión lineal entre el O₃ troposférico promedio mensual y el UVER durante el período 2015-2018 para Santiago de Chile. El gráfico interior muestra el modelo empírico obtenido con el coeficiente de Pearson.

Anexo V. Cantidades radiométricas

Se definen cantidades básicas relacionadas con los conceptos de transferencia radiante que se utilizaron en el resto del trabajo. La nomenclatura es basada en la norma UNIT-ISO9488:1999.

Albedo terrestre: Porcentaje de radiación n reflejada por la Tierra respecto a la radiación incidente sobre ella.

Angulo cenital: Angulo entre la línea Tierra-Sol y la normal a un observador.

Constante solar: Valor promedio de la irradiancia solar a una distancia del Sol igual al radio medio de la órbita terrestre.

Radiación Solar: Radiación se refiere a emisión o transferencia de energía. El nombre Solar se refiere al espectro solar (entre 280 nm y 3000 nm). También llamada radiación de Onda Corta.

Irradiancia extraterrestre: Irradiancia que llega al tope de la atmosfera en un plano horizontal.

Irradiancia solar (Wm^{-2}): Potencia radiante incidente por unidad de area receptora.

Irradiación solar (Jm^{-2} o Wh/m^2): Integración en el tiempo de la irradiancia (o alguna de sus componentes) en un intervalo de tiempo dado. En el caso de la irradiación horaria se expresa usualmente en Wh/m^2 .

Irradiancia Solar Global (IG) en un plano Horizontal (Wm^{-2}): Es la irradiancia solar hemisférica (Irradiancia directa y difusa) recibida en un plano horizontal en la superficie terrestre.

Índice de Claridad (K_T): Relación entre la irradiación global en plano horizontal en superficie terrestre y la irradiación global en el tope de la atmosfera.



Anexo V.

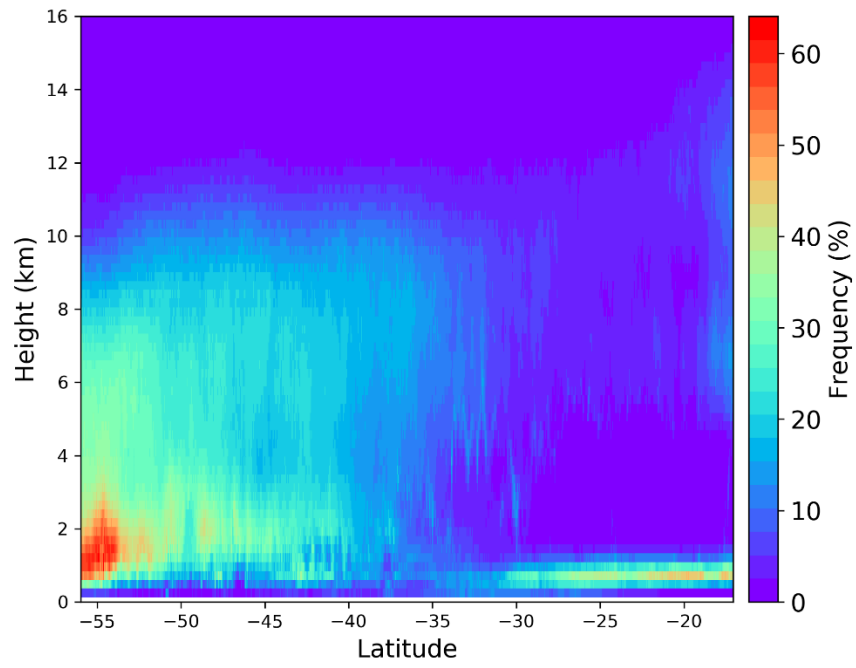


Figura S1. Resultado 4.3.1 Perfiles de frecuencia de nubes en latitudes chilenas.

