**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

Universidad de La Laguna

**Grado en Física**

# *Predicción de irradiancia solar mediante modelos numéricos*

**Alejandro Rojano Padrón**

Tutores:

**Dr. Albano González Fernández**
**Dr. Juan Carlos Pérez Darias**

San Cristóbal de La Laguna, 8 de julio de 2019

## Abstract:

Due to the growing importance of renewable energies in our energy system, and in particular photovoltaic solar energy, it leads us to take on new challenges to try to optimize the energy production. One of these challenges is related to the high dependence that exists between the meteorological conditions of the environment and the power generation capacity in power plants. The companies supplying energy must communicate sufficiently in advance, between one and two days before, the energy that their plants will produce at any given time, and in the case of solar energy, the clouds play a fundamental role in the variability of the irradiance received by the solar panels, and therefore, in their production.

In this paper, the capacity of the simulations performed with the atmospheric model WRF (Weather Research and Forecasting) will be analyzed, examining different predictions for a set of cases of study.

For this purpose, firstly, the model must be correctly configured for the region to be studied and, subsequently, the influence of the different physical parameterizations on the irradiance calculation must be analysed and compared with experimental data.

## Resumen:

Debido a la creciente importancia de las energías renovables en nuestro sistema energético, y en concreto de la energía solar fotovoltaica, nos lleva a asumir nuevos retos para tratar de optimizar la gestión de la energía. Uno de dichos desafíos está relacionado con la alta dependencia que hay entre las condiciones meteorológicas del entorno y la capacidad de generación de energía en las centrales eléctricas. Las empresas suministradoras de energía deben comunicar con suficiente antelación, entre uno y dos días antes, la energía que sus plantas van a producir en cada momento, y en el caso de la energía solar, las nubes juegan un papel fundamental en la variabilidad de la irradiancia recibida por las placas solares, y por lo tanto, en su producción.

En este trabajo se analizará la capacidad de las simulaciones realizadas con el modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting), examinando distintas predicciones para una serie de casos de estudio.

Para ello, primero se deberá configurar correctamente el modelo para la región a estudiar y, posteriormente, se analizará la influencia de las diferentes parametrizaciones físicas en el cálculo de la irradiancia y se compararán con datos medidos en tierra.

# Índice

**Introducción.** **3**
Importancia y futuro de la energía solar fotovoltaica. 3
Relación entre la energía solar fotovoltaica y la predicción meteorológica. 4
Modelos atmosféricos. 5
Modelo WRF (Weather Research and Forecasting). 6
Objetivos. 7

**Metodología.** **8**

**Resultados.** **12**
Casos de estudio. 12
Primer caso: 13/12/2018 - 14/12/2018 12
Segundo caso: 05/02/2019 - 06/02/2019 17
Tercer caso: 14/02/2019 - 15/02/2019 22
Cuarto caso: 02/04/2019 - 03/04/2019 28
Análisis de resultados. 37

**Conclusiones.** **38**

**Referencias.** **40**

# 1. Introducción.

*Renewable energies have been gaining importance in our energy system, and in particular photovoltaic solar energy stands out for its enormous future potential. However, the main problem of solar energy lies in its total dependence on the amount of radiation received by the solar panels, and therefore, on the weather conditions of its environment. The aim of this work is to analyze the irradiance received on the earth's surface for a set of cases of study with different weather conditions, using the atmospheric model WRF, to later compare the results obtained with observational values. In addition, different physical parameterizations for this model will be examined.*

## 1.1. Importancia y futuro de la energía solar fotovoltaica.

No cabe duda de la importancia que en los últimos años han adquirido las energías renovables dentro de nuestro sector energético. Especialmente en un archipiélago como Canarias, con una alta densidad poblacional de 285.71 hab./Km² [1] y un territorio donde no abundan las materias primas, se hace indispensable por tanto aprovechar al máximo los recursos que nos brinda la naturaleza, de una forma inagotable y ecológica. De forma paralela al abandono de los métodos tradicionales de generación de energía eléctrica como las centrales térmicas de carbón o petróleo, las energías renovables jugarán un papel cada vez más importante. El año pasado, 2018, ya suponían un 38,4% del total de la energía eléctrica generada en España mientras que en Canarias este porcentaje aún estaba en el 11,0%, con lo cual todo parece indicar que en los próximos años las energías renovables van a seguir desarrollándose en nuestras islas. [2]

Dentro de las energías renovables hay que destacar la energía solar fotovoltaica. A pesar del boom inicial que tuvo en los años 2007-2008, la situación económica posterior, unido a la carestía que tradicionalmente ha tenido este tipo de generación de electricidad, produjo un estancamiento en la inversión e instalación de nuevos paneles solares en España, como se observa en la **Fig. 1**.

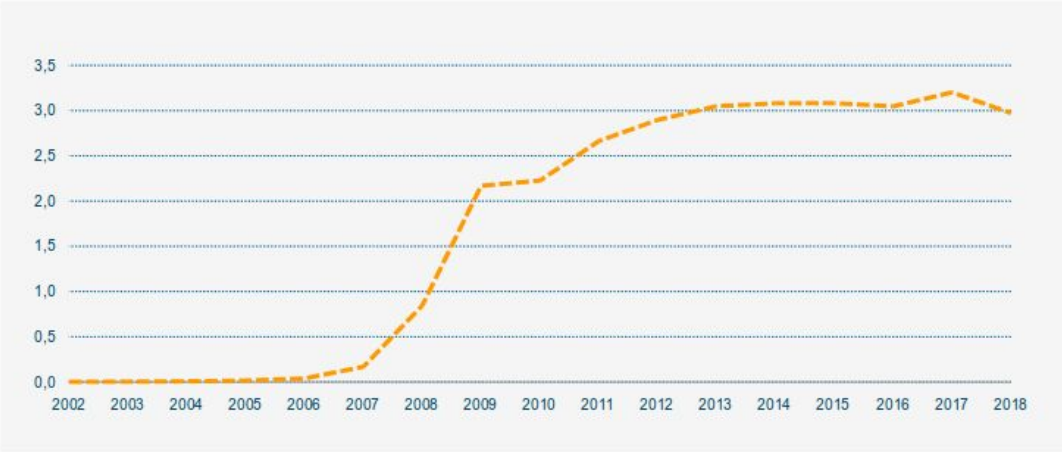


*Figura 1. Porcentaje de la energía generada en España correspondiente a la energía solar fotovoltaica (Fuente:* Red eléctrica de España S.A. [Disponible: https://www.ree.es/es/datos/generacion]*).*

Sin embargo, la energía solar tiene un enorme potencial a medida que se estudian nuevos métodos que permitan mejorar el rendimiento de los paneles solares y por ende abaratar este tipo de energía. A medida que se han desarrollado nuevas generaciones de paneles fotovoltaicos, y se ha estudiado el comportamiento de nuevos materiales como la perovskita en sustitución del silicio cristalino que históricamente se ha usado en la fabricación de dichos paneles [3] [4], se ha observado que el rendimiento de los paneles solares ha aumentado, lo que ha llevado a que el coste de la energía solar fotovoltaica se haya reducido de forma gradual desde que se diseñaron las primeras células solares comerciales y, en consecuencia, provocando que el coste medio de la generación eléctrica a partir de la radiación recibida del Sol sea ya competitivo frente a las fuentes de energía convencionales. Es esperable que en el futuro esta tendencia no solo se mantenga sino que se acreciente.

## 1.2. Relación entre la energía solar fotovoltaica y la predicción meteorológica.

No obstante, a pesar del incremento de la eficiencia de la energía solar, sigue existiendo una problemática, al igual que ocurre con el resto de las energías renovables, y es su alta dependencia de las condiciones meteorológicas del entorno en donde se encuentre la central eléctrica. En el caso de la energía solar, la potencia que generen los paneles fotovoltaicos dependerá de la irradiancia que estos reciban, y por tanto la potencia que se produzca dependerá de la cantidad de nubes que haya. La integración de la energía solar fotovoltaica en las redes eléctricas parte, por lo tanto, de la capacidad de conocer de antemano la capacidad de producción de los sistemas fotovoltaicos.

Las predicciones de radiación incidente se deben dar con una antelación de 24 a 48 horas. Esto responde a la necesidad por parte de los operadores de los sistemas eléctricos de conocer con suficiente anticipación la capacidad de todos los generadores del sistema de tal manera que el operador pueda despachar la producción individual de cada generador teniendo en cuenta la demanda. [5]

En los despachos, el operador del sistema eléctrico asigna a cada generador cuánta energía debe producir en función de su capacidad declarada de generación, es decir, de sus predicciones correspondientes, y la demanda prevista. Este criterio de asignación se basa tanto en criterios técnicos que buscan asegurar la fiabilidad y seguridad del suministro eléctrico como en criterios económicos que persiguen reducir los costes de generación de energía eléctrica. En el caso de que un generador eléctrico se desvíe de la cantidad que le ha sido asignada, puede incurrir en penalizaciones económicas. [5]

De este hecho radica la importancia en conocer de la forma más fiable posible, cuáles serán las condiciones meteorológicas en cada momento. No obstante, dado que la atmósfera es un sistema caótico, el problema resulta complejo ya que es imposible predecir su estado futuro de forma exacta. Es por ello por lo que, además de predecir la potencia que se generará a partir de las predicciones para la irradiancia, también es de utilidad proporcionar el error de que el resultado se desvíe de lo esperado, con el fin de hacer una estimación más razonable y ajustada de la energía que se debe declarar de cara al sistema, de tal manera que a largo plazo se consigan minimizar tanto las penalizaciones debidas a desvíos de producción como la energía desaprovechada.

## 1.3. Modelos atmosféricos.

Para predecir las condiciones meteorológicas de la atmósfera, entre ellas la irradiancia, se usan los modelos atmosféricos de Predicción Numérica del Tiempo (PNT), los cuales son modelos físico-matemáticos que simulan la evolución de la atmósfera y permiten conocer el estado futuro de la atmósfera partiendo del estado actual que estimamos por medio de las observaciones atmosféricas y un proceso que se conoce como asimilación de datos.

Para poder hacer evolucionar el estado de la atmósfera tenemos que recurrir a las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales describen el movimiento de un fluido y por tanto son las ecuaciones que representan la dinámica atmosférica. Sin embargo estas no son ecuaciones lineales por lo que no tienen solución analítica. Por tanto, han de ser aproximadas numéricamente, existiendo distintos métodos que dan lugar a una gran variedad de modelos. Es por ello, además de por la necesidad de que las predicciones estén disponibles poco tiempo después de haber recibido las observaciones, por lo que hemos de recurrir a grandes sistemas de cálculo. En consecuencia, el desarrollo de la PNT va muy ligado a los avances de los ordenadores.

Los modelos atmosféricos suelen incluir los siguientes componentes [6]:

I. **Asimilación de datos.** Consiste en la estimación del estado atmosférico en un momento dado a partir de las observaciones distribuidas por todo el mundo.

II. **Dinámica.** Trata de aproximar de forma eficiente, desde el punto de vista del tiempo computacional para los cálculos, las ecuaciones de la atmósfera. Describe procesos que se representan explícitamente en la resolución del modelo.

III. **Parametrizaciones físicas.** Estima los efectos de los procesos físicos que tienen lugar a escalas demasiado pequeñas para poder ser representados explícitamente por la dinámica del modelo, como es el caso de la microfísica que trata la formación y dinámica de las nubes.

IV. **Posprocesado.** A partir de las variables de predicción del modelo se calculan otras variables de interés.

## 1.4. Modelo WRF (Weather Research and Forecasting).

El modelo WRF es un modelo mesoescalar de predicción numérica diseñado tanto para la investigación atmosférica, como para las predicciones meteorológicas que requieran de cálculos computacionales. Cuenta con dos núcleos dinámicos: un sistema de asimilación de datos y una arquitectura de software que soporta computación paralela. Resulta de utilidad para una amplia gama de aplicaciones meteorológicas que conlleven escalas desde decenas de metros hasta miles de kilómetros. [7]

Además, WRF puede producir simulaciones basadas tanto en condiciones atmosféricas reales (es decir, a partir de observaciones y análisis) como en condiciones ideales. Este modelo ofrece una plataforma flexible y eficiente desde el punto de vista computacional, al tiempo que refleja los avances recientes en física, cálculo numérico y asimilación de datos aportados por desarrolladores de la comunidad científica.

El modelo WRF se encuentra actualmente en uso operativo en la NCEP (National Centers for Environmental Prediction), una agencia del gobierno estadounidense encargada de proporcionar información y pronósticos sobre el tiempo, así como en la AFWA (Air Force Weather Agency), la agencia meteorológica de las fuerzas aéreas del ejército de Estados Unidos, además de muchos otros organismos y universidades. [7]

Este modelo también permite utilizar diferentes parametrizaciones de procesos físicos. En concreto, en lo que respecta a este estudio, son de especial interés la microfísica, la cual juega un papel fundamental en la formación de nubes, así como la transferencia radiativa y los procesos de absorción y dispersión de la radiación incidente en la atmósfera.

## 1.5. Objetivos.

El propósito de este trabajo no es otro que el de analizar una serie de casos de estudio con distintas condiciones meteorológicas, realizando predicciones con el modelo WRF, obtener valores de irradiancia recibida en la superficie terrestre y compararlos con medidas tomadas en tierra. Además, en cada caso de estudio se estudiarán distintas parametrizaciones del modelo relacionadas con la microfísica de nubes y con los balances radiativos en la atmósfera.

A continuación se expondrá la metodología utilizada para ello.

# 2. Metodología.

*All simulations have been performed with version (3.9) of WRF model. In this chapter, it will be explained the process necessary for the preparation of the atmospheric model before we are able to run the simulations: from the initial and boundary conditions, the definition of domains and the different physical parameterizations options in WRF that will be used.*

Todas las simulaciones se han realizado con la versión (3.9) del modelo WRF [8]. Para la preparación de dichas simulaciones, previamente se ha tenido que llevar a cabo una serie de ajustes y configuraciones.

Las condiciones iniciales y de contorno para las diferentes simulaciones realizadas se han obtenido del GFS (Gobal Forecast System) desarrollado por NCEP (National Centers for Environmental Prediction) [9]. Hay que señalar que las condiciones de contorno se han usado solamente para la frontera del dominio mayor que se ha definido, el resto de los datos con los que se ha tratado se han obtenido haciendo actuar el modelo WRF.

Posteriormente se han definido los cuatro dominios anidados en los que se ha dividido la zona a estudiar, la cual se ha centrado en las islas de Tenerife y Gran Canaria. En la **Fig. 2** se observan dichos dominios para una simulación realizada en el marco de este trabajo. Los dominios deben tener una separación suficiente para que no se vean afectados por la zona de esponjamiento, en la que se acoplan las ecuaciones de los distintos dominios, la cual se puede apreciar en los márgenes de los 4 dominios mostrados a continuación. El dominio 1, el exterior, posee una resolución espacial de 27 km, con una rejilla de 100x97 celdas. El segundo dominio, tiene una resolución espacial de 9 km (136x82 puntos de rejilla) y comprende un aŕea extensa alrededor de Canarias. El tercero, con 3 km de resolución, tiene una rejilla de 238x136 puntos. Finalmente, el dominio interior, el cuarto, se ha configurado con una rejilla de 208x151 nodos, con una resolución espacial de 1 km. Los resultados de este último dominio son los que se usarán en el presente estudio. Todos los dominios poseen el mismo número de niveles verticales, en concreto 32 niveles atmosféricos y 4 para el modelo de suelo.

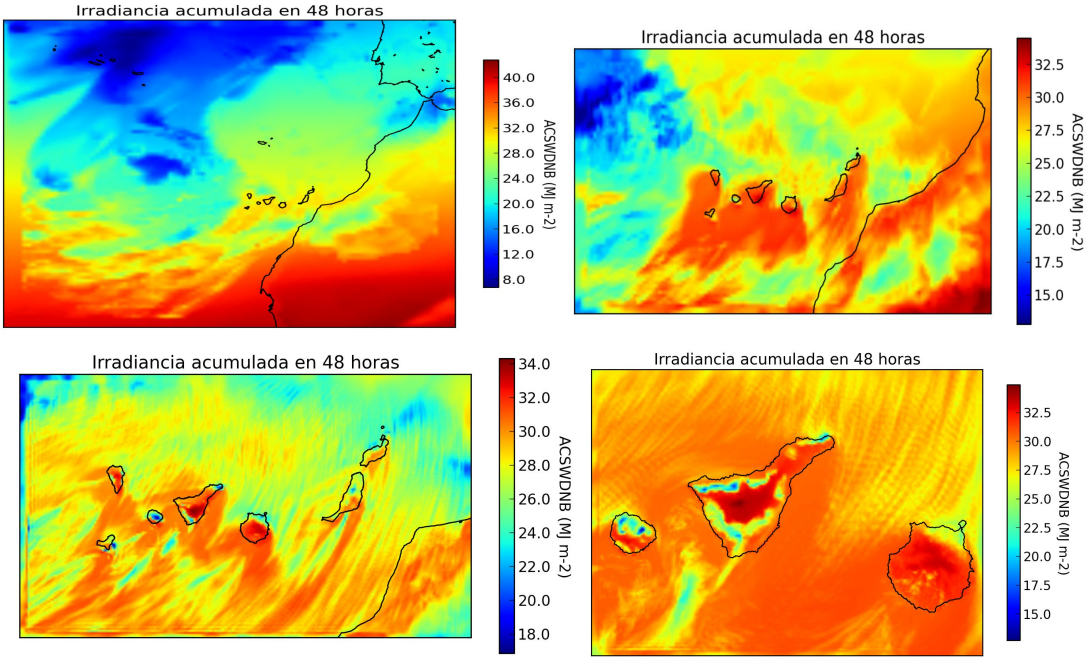


*Figura 2. Dominios en los que se han realizado todas las simulaciones. A modo de ejemplo, se muestran las irradiancias acumuladas durante una de las simulaciones.*

Una vez definidos los dominios en los que se trabaja, hay que ajustar el modelo con las parametrizaciones que mejor convengan en cada situación. En este caso, dos parametrizaciones son las que tienen un mayor impacto sobre la irradiancia solar en superficie, aquellas relativas a la microfísica y a la transferencia radiativa. Se han analizado las parametrizaciones que figuran en la **tabla 1** y **tabla 2**. Parte del trabajo consistirá precisamente en tratar de determinar cuál o cuáles son las parametrizaciones óptimas para la predicción de la irradiancia recibida en la superficie de la región a estudiar.

Como se observa en las siguientes tablas, en total se han usado tres parametrizaciones distintas para la microfísica y dos para la radiación, con lo cual para cada caso de estudio se han realizado seis simulaciones distintas, resultantes de las combinaciones posibles entre las parametrizaciones relativas a la microfísica y a la radiación.

| **Número de opción en WRF** | **Descripción/Autor** | **Abreviatura** | **Referencia** |
|---|---|---|---|
| n° 6 | WRF Single–moment 6–class | WSM6 | [10] |
| n° 8 | Thompson | Thom | [11] |
| n° 16 | WRF Double Moment 6–class | WDM6 | [12] |

*Tabla 1. Parametrizaciones relativas a la microfísica utilizadas en las simulaciones.*

| Número de opción en WRF | Descripción/Autor | Abreviatura | Referencia |
|---|---|---|---|
| n° 3 | CAM Shortwave and Longwave | CAM | [13] |
| n° 4 | RRTMG Shortwave and Longwave | RRTMG | [14] |

*Tabla 2. Parametrizaciones relativas a la radiación, tando de onda larga como de onda corta, utilizadas en las simulaciones.*

Las parametrizaciones de microfísica representan los procesos que controlan la evolución de las diferentes especies de hidrometeoros y las transiciones entre ellos. Estos procesos dependen de las variables dinámicas y termodinámicas de cada una de las celdas de simulación. Los tres esquemas seleccionados consideran los siguientes hidrometeoros: gotas de agua y partículas de hielo de las nubes, gotas de lluvia y copos de nieve, así como el vapor de agua. Tanto WSM6 como WDM6 utilizan una distribución gamma para caracterizar la distribución de tamaños de las partículas. WSM6 predice la masa total de cada hidrometeoro y WDM6 predice, además, el número de gotas de lluvia, siendo ambas predicciones independientes. La parametrización de Thompson también predice la concentración de partículas de lluvia, pero asume una distribución de tamaños que combina funciones gamma y exponenciales.

En cuanto a los esquemas de transferencia radiativa, se tendrán en cuenta principalmente las propiedades en onda corta, de interés para este estudio. CAM (Community Atmosphere Model) divide el espectro solar en 19 bandas espectrales e intervalos pseudo-espectrales que dependen de los gases considerados ($0_3$, $H_2O$, $CO_2$, $O_2$). Además de la absorción de los gases, considera el scattering Rayleigh, el efecto de los aerosoles y las nubes. Para las nubes tiene en cuenta la interacción con gotas de agua, cristales de hielo y copos de nieve. RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model - GCM, Global Climate Model, applications) tiene características comunes, pero toma 15 bandas espectrales y utiliza el modelo *correlated K-distribution* (CKD) para calcular la absorción molecular de los diferentes gases. Además, tiene en cuenta también la interacción con las gotas de lluvia.

El resto de parametrizaciones físicas se han mantenido fijas y se han elegido en base a estudios previos en los que se estudia el clima en Canarias utilizando WRF [15][16][17]. En concreto, se ha elegido el esquema Mellor–Yamada–Janjic [18] para la capa límite planetaria, el modelo de superficie en tierra NOAH [19] y el modelo de cúmulos Kain–Fritsch [20], aplicado sólo a los dos dominios externos, ya que la resolución espacial en los dos dominios interiores permite resolver los movimientos convectivos directamente con las ecuaciones dinámicas.

Las seis simulaciones que se realizan para cada caso de estudio se denominarán según la combinación de la abreviatura de la parametrización de microfísica y de

la de transferencia radiativa, esto es: WSM6CAM, WSM6RRTMG, ThomCAM, ThomRRTMG, WDM6CAM, WDM6RRTMG.

Cada caso a estudiar abarca 48 horas, empezando a las 00:00 horas del primer día y terminando a las 23:59 horas del segundo, y en ellos se han analizado los siguientes datos:

I. Irradiancia recibida en la superficie acumulada durante ese periodo de tiempo.

II. Irradiancia recibida por horas para las 6 simulaciones diferentes y en las que se compararán con la irradiancia por hora medida por 3 estaciones de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) situadas en Santa Cruz de Tenerife (N 28° 27' 48", O 16° 15' 19"), Izaña (N 28° 18' 32", O 16° 29’ 58") y Maspalomas (N 27° 45' 29", O 15° 34' 32"), todas ellas en las Islas Canarias. Hay que mencionar que para algunos casos de estudio, no estaban disponibles los datos de la AEMET de la estación de Maspalomas. [21]

III. Irradiancia por horas del promedio de las 6 simulaciones y su comparativa con los datos medidos por las estaciones de la AEMET.

IV. Errores referentes a las desviaciones de cada simulación respecto a los datos experimentales medidos por la AEMET.

V. Evolución de las nubes con respecto al tiempo y a la altura para los 3 puntos en donde se encontraban las estaciones medidoras de la AEMET.

Todas las gráficas han sido generadas mediante el lenguaje de programación Python.

Los cuatro casos analizados y que se expondrán a continuación son los siguientes (escritos en notación día/mes/año):

- Primer caso: 13/12/2018 - 14/12/2018
- Segundo caso: 05/02/2019 - 06/02/2019
- Tercer caso: 14/02/2019 - 15/02/2019
- Cuarto caso: 02/04/2019 - 03/04/2019

# 3. Resultados.

*This chapter will present all the results obtained by the simulations that have been performed. The first part will analyse how the different physical parameterizations, for the four considered cases of study , influence on the predictions. Subsequently, a general analysis will be carried out with the obtained results.*

## 3.1. Casos de estudio.

A continuación se presentarán los cuatro casos de estudio analizados correspondientes, como se ha mencionado anteriormente, a periodos de 48 horas en las que ha habido condiciones atmosféricas muy distintas, de forma que se pueda analizar posteriormente cómo se comporta el modelo usando cada parametrización en situaciones diferentes.

### 3.1.1. Primer caso: 13/12/2018 - 14/12/2018.

El primer caso corresponde a dos días con cielos relativamente despejados y en los que no había una gran presencia de aerosoles, por lo que se espera que la irradiancia recibida por horas tenga una forma similar para ambos días.

En la **Fig. 3** se observa un mapa de la radiación acumulada durante las 48 horas para las 6 distintas simulaciones hechas con las parametrizaciones comentadas anteriormente. De ahora en adelante, todos los mapas de radiación que se presenten serán los relativos al cuarto dominio.

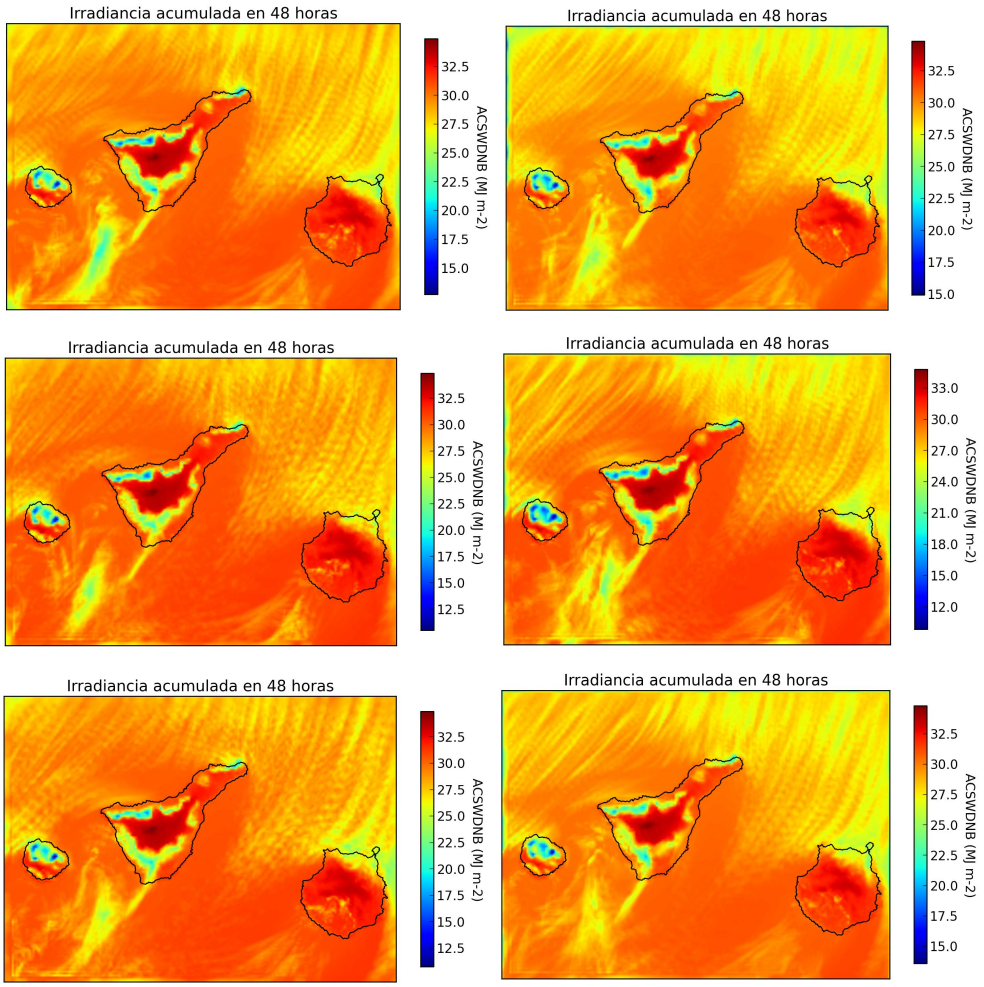


*Figura 3. Mapas de la irradiancia acumulada durante 48 horas para las distintas simulaciones (ordenadas de izquierda a derecha y de arriba a abajo: WSM6CAM, WSM6RRTMG, ThomCAM, ThomRRTMG, WDM6CAM, WDM6RRTM).*

Se observa que dado que fueron días de cielos relativamente despejados, no se aprecian grandes diferencias. Aún así hay zonas, como la situada al sur entre las islas de Tenerife y La Gomera, donde se pueden percibir ligeras diferencias, lo cual indica que dependiendo de la parametrización utilizada cambian los resultados obtenidos. No obstante, en este primer caso de estudio, al no haber nubes (especialmente en las dos zonas donde están situadas las estaciones de la AEMET con las que se podrán comparar los datos, Santa Cruz de Tenerife e Izaña) los resultados de las distintas simulaciones se espera que sean similares.

En la **Fig. 4** y **Fig. 5** se presentan los datos de la irradiancia medida por horas en estas dos zonas para todas las simulaciones realizadas y para los datos tomados por las estaciones de la AEMET [21]. En la **tabla 3** y **tabla 4** figuran los datos de la irradiancia total recibida durante el primer y el segundo día, la total de ambos días y el error relativo calculado a partir de la desviación de estos datos con los valores experimentales tomados por la AEMET. Además también se incluye la media aritmética de las 6 simulaciones, aunque en este caso las diferencias entre unas y otras son mínimas como se pueden observar.

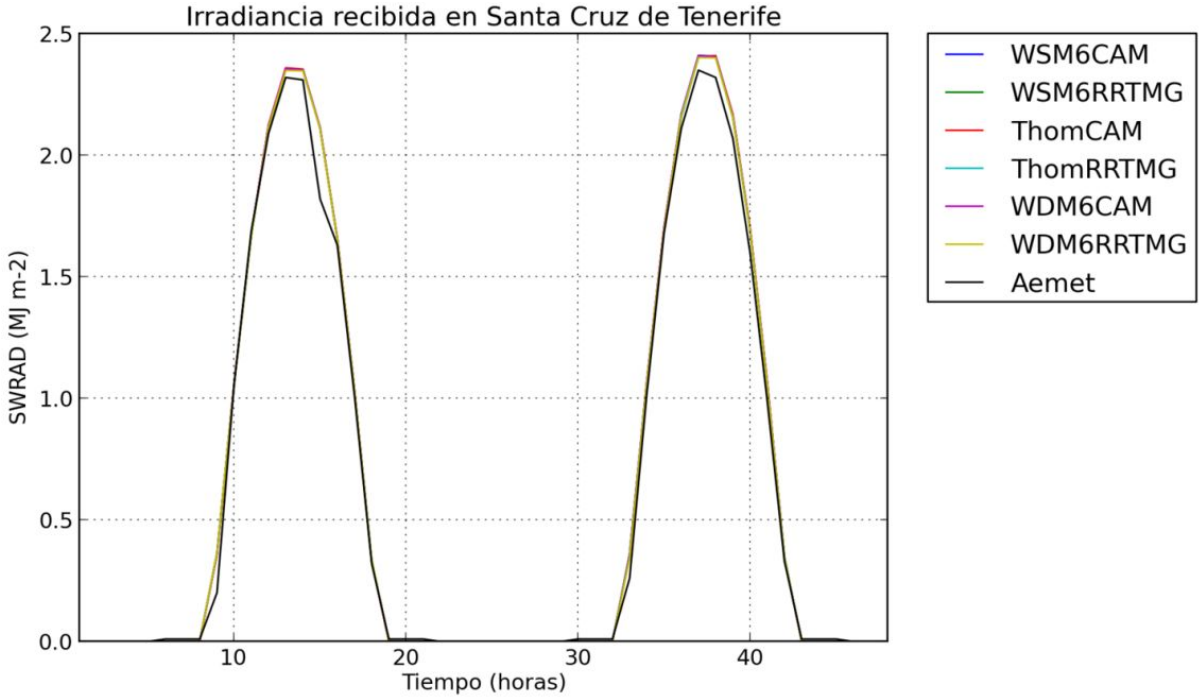


*Figura 4. Gráfica que representa la irradiancia recibida por hora en Santa Cruz de Tenerife.*

| Modelo | Irradiancia recibida en el primer día (MJ m-2) | Irradiancia recibida en el segundo día (MJ m-2) | Irradiancia total (MJ m-2) | Error relativo (en %) |
|---|---|---|---|---|
| WSM6CAM | 15.0627 | 15.3924 | 30.4551 | 3.94 |
| WSM6RRTMG | 15.0485 | 15.3523 | 30.4008 | 3.76 |
| ThomCAM | 15.0708 | 15.3792 | 30.4500 | 3.92 |
| ThomRRTMG | 15.0512 | 15.3527 | 30.4039 | 3.77 |
| WDM6CAM | 15.0546 | 15.3835 | 30.4381 | 3.88 |
| WDM6RRTMG | 15.0372 | 15.3262 | 30.3634 | 3.62 |
| Promedio de las predicciones | 15.0542 | 15.3644 | 30.4186 | 3.82 |
| Datos Aemet | 14.5100 | 14.7900 | 29.3000 | - |

*Tabla 3. Datos de la irradiancia recibida durante los dos días y de sus errores en Santa Cruz de Tenerife.*

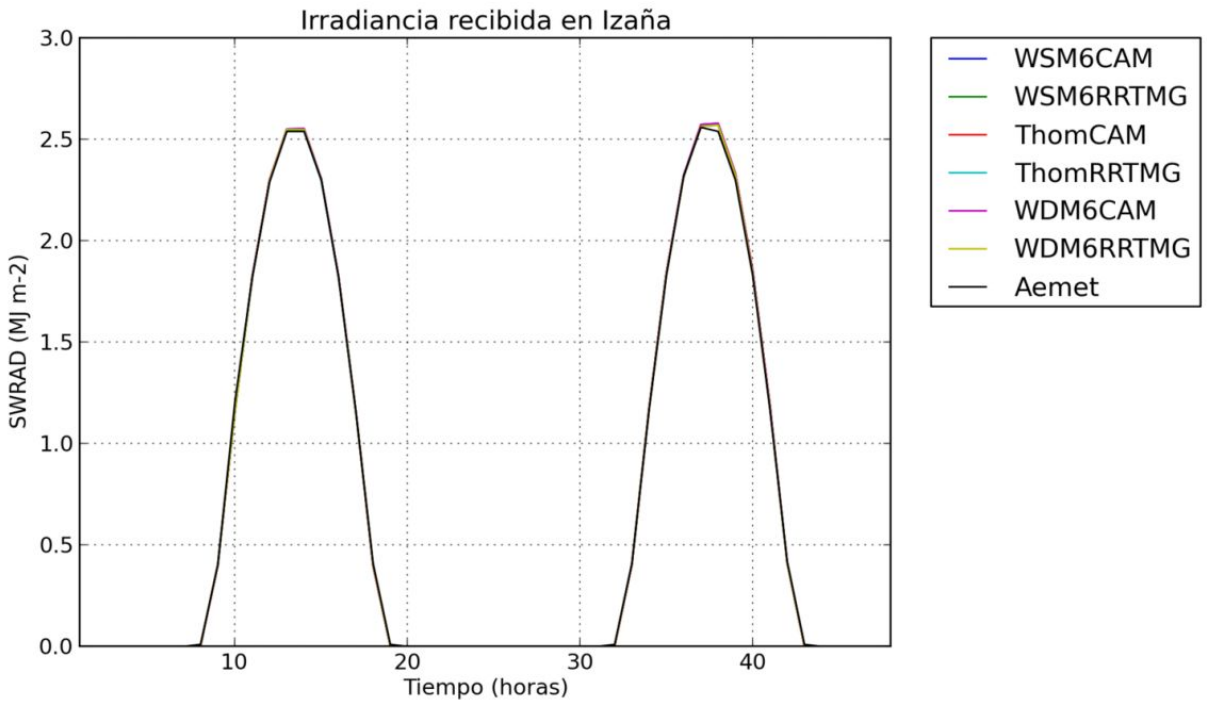


*Figura 5. Gráfica que representa la irradiancia recibida por hora en Izaña.*

| Modelo | Irradiancia recibida en el primer día (MJ m-2) | Irradiancia recibida en el segundo día (MJ m-2) | Irradiancia total (MJ m-2) | Error relativo (en %) |
|---|---|---|---|---|
| WSM6CAM | 16.4949 | 16.7023 | 33.1972 | 0.35 |
| WSM6RRTMG | 16.4663 | 16.6392 | 33.1057 | 0.08 |
| ThomCAM | 16.4687 | 16.6923 | 33.1610 | 0.24 |
| ThomRRTMG | 16.4443 | 16.6381 | 33.0824 | 0.01 |
| WDM6CAM | 16.4993 | 16.6988 | 33.1981 | 0.36 |
| WDM6RRTMG | 16.4727 | 16.6392 | 33.1119 | 0.10 |
| Promedio de las predicciones | 16.4744 | 16.6683 | 33.1427 | 0.19 |
| Datos Aemet | 16.5100 | 16.5700 | 33.0800 | - |

*Tabla 4. Datos de la irradiancia recibida durante los dos días y de sus errores en Izaña.*

Se observa que los datos obtenidos son bastante similares entre una predicción y otra, tal y como era de esperar. En consecuencia, los errores relativos son bajos, no superan en ningún caso el 4%, cuando se consideran errores habituales hasta un

límite del 40% [6], es decir, diez veces mayor que los obtenidos. Destaca el caso de Izaña donde los errores son en todos los casos inferiores al 1%.

Debido a la ausencia de nubes en este primer caso carece de interés representar la evolución de las mismas. En cambio, sí pudiera tener cierto interés conocer la humedad de la atmósfera para poder compararla con los demás casos de estudio, por lo que se ha representado, en las **Fig. 6 y 7,** la evolución de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, en Santa Cruz y en Izaña, la cual está medida en gramos de agua por kilogramo de aire.

Hay que señalar que la altura correspondiente a 0 Km corresponde al nivel del mar, por lo que en el caso de la estación de Izaña, la cual se encuentra a unos 2 Km de altitud aproximadamente, no podrá representarse nada por debajo de dicha altura. En ambos gráficos se ha usado la parametrización WSM6CAM, con las otras parametrizaciones se obtienen resultados similares.

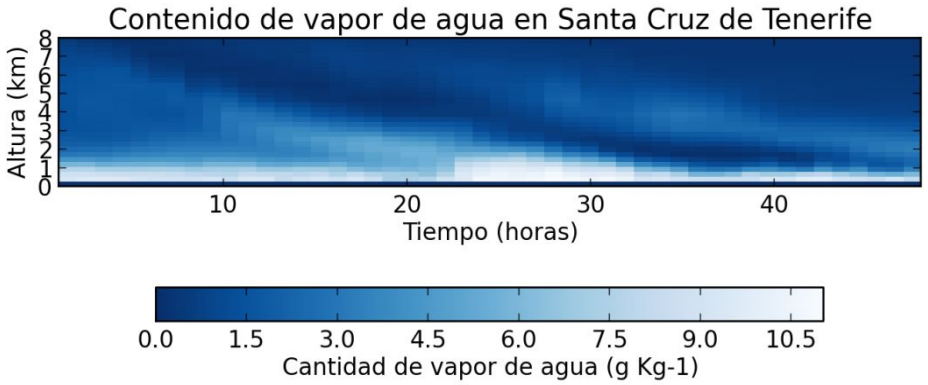


*Figura 6. Representación de la evolución de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera sobre Santa Cruz de Tenerife usando la parametrización WSM6CAM.*

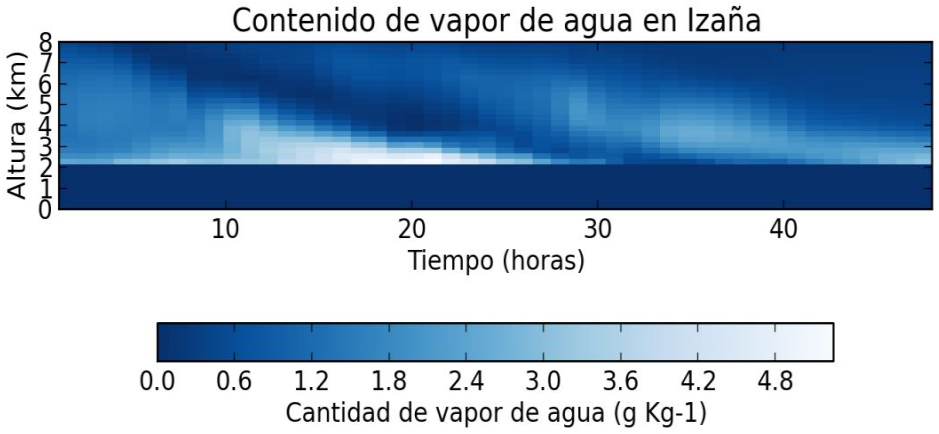


*Figura 7. Representación de la evolución de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera sobre Izaña usando la parametrización WSM6CAM.*

### 3.1.2. Segundo caso: 05/02/2019 - 06/02/2019

El segundo caso corresponde a dos días con cielos totalmente despejados pero en los que había una gran presencia de aerosoles en forma de calima, por lo que se espera que la irradiancia sea menor que para un día en la que no haya aerosoles.

En la **Fig. 8** se observa un mapa de la radiación acumulada durante las 48 horas para 2 simulaciones distintas hechas con la parametrización de microfísica WSM6 y con las 2 parametrizaciones de radiación CAM Y RRTMG. Se presentan solamente dos mapas ya que al no haber ninguna presencia de nubes, la irradiancia obtenida en cada simulación es prácticamente la misma como se podrá observar posteriormente.

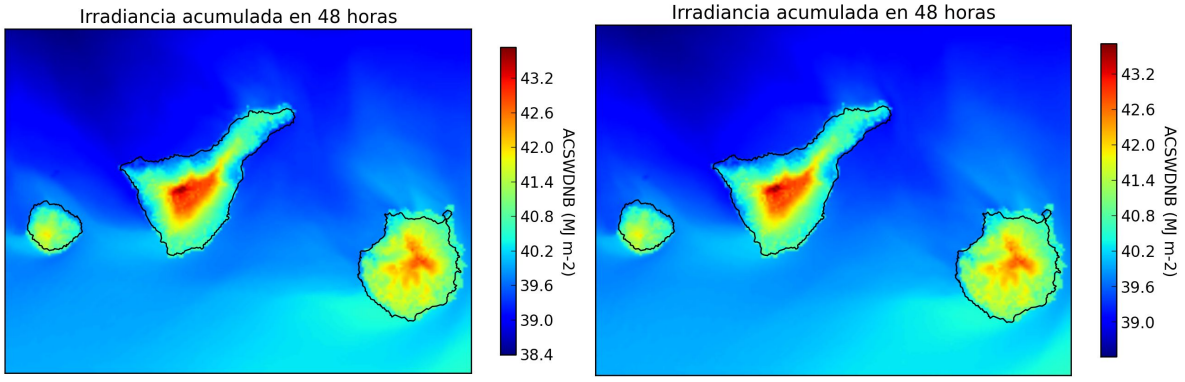


*Figura 8. Mapas de la irradiancia acumualada durante 48 horas para las parametrizaciones WSM6CAM (izqda.) y WSM6RRTMG (dcha.).*

En las **Fig. 9-11** se presentan los datos de la irradiancia medida por horas obtenidos por todas las simulaciones realizadas en Santa Cruz de Tenerife, Izaña y Maspalomas, y además se comparan con los datos experimentales obtenidos por la AEMET [21]. En las **tablas 5-7** figuran los datos de la irradiancia total recibida por días, la irradiancia total y el error relativo calculado a partir de la desviación de estos datos con los valores experimentales tomados por la AEMET. Además también se incluye la media aritmética de las 6 simulaciones, aunque al igual que ocurría en el primer caso, las diferencias entre unas y otras vuelven a ser mínimas debido a la ausencia de nubes.

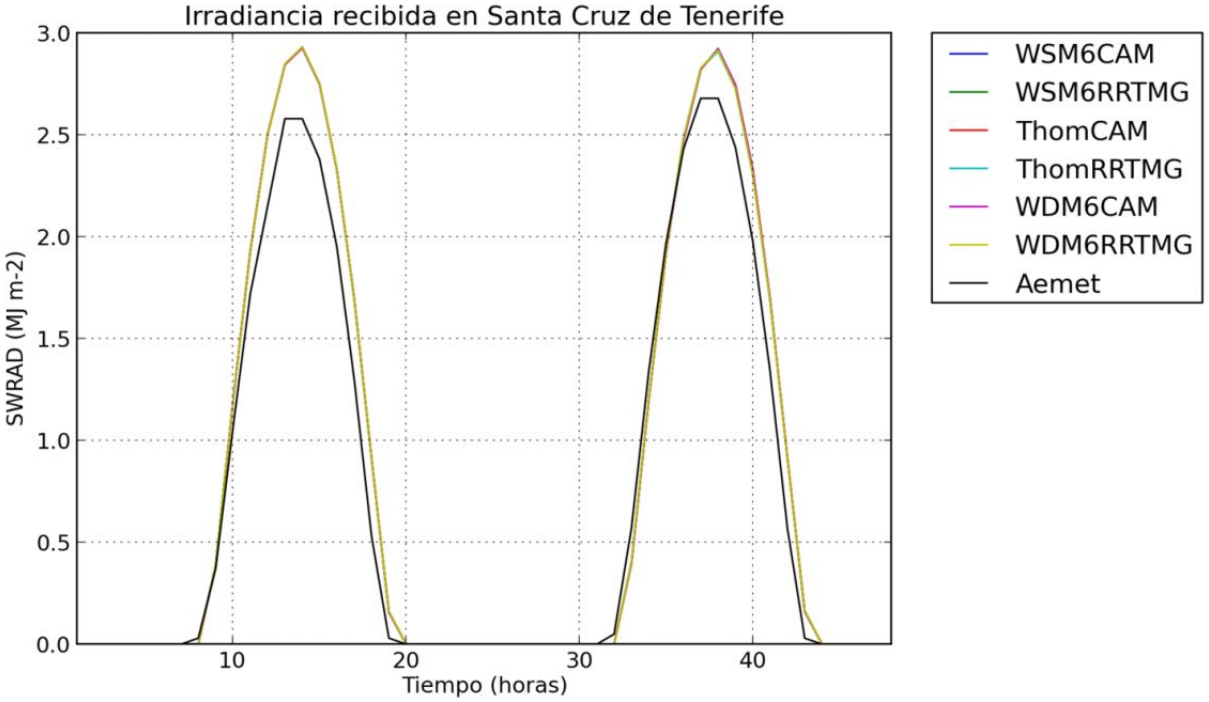


*Figura 9. Gráfica que representa la irradiancia recibida por hora en Santa Cruz de Tenerife.*

| Modelo | Irradiancia recibida en el primer día (MJ m-2) | Irradiancia recibida en el segundo día (MJ m-2) | Irradiancia total (MJ m-2) | Error relativo (en %) |
|---|---|---|---|---|
| WSM6CAM | 19.6232 | 19.5840 | 39.2072 | 12.79 |
| WSM6RRTMG | 19.6343 | 19.5686 | 39.2029 | 12.78 |
| ThomCAM | 19.6211 | 19.5886 | 39.2067 | 12.79 |
| ThomRRTMG | 19.6316 | 19.5675 | 39.1911 | 12.77 |
| WDM6CAM | 19.6227 | 19.5854 | 39.2081 | 12.80 |
| WDM6RRTMG | 19.6340 | 19.5671 | 39.2011 | 12.78 |
| Promedio de las predicciones | 19.6278 | 19.5764 | 39.2042 | 12.79 |
| Datos Aemet | 16.6800 | 18.0800 | 34.7600 | - |

*Tabla 5. Datos de la irradiancia recibida durante los dos días y de sus errores en Santa Cruz de Tenerife.*

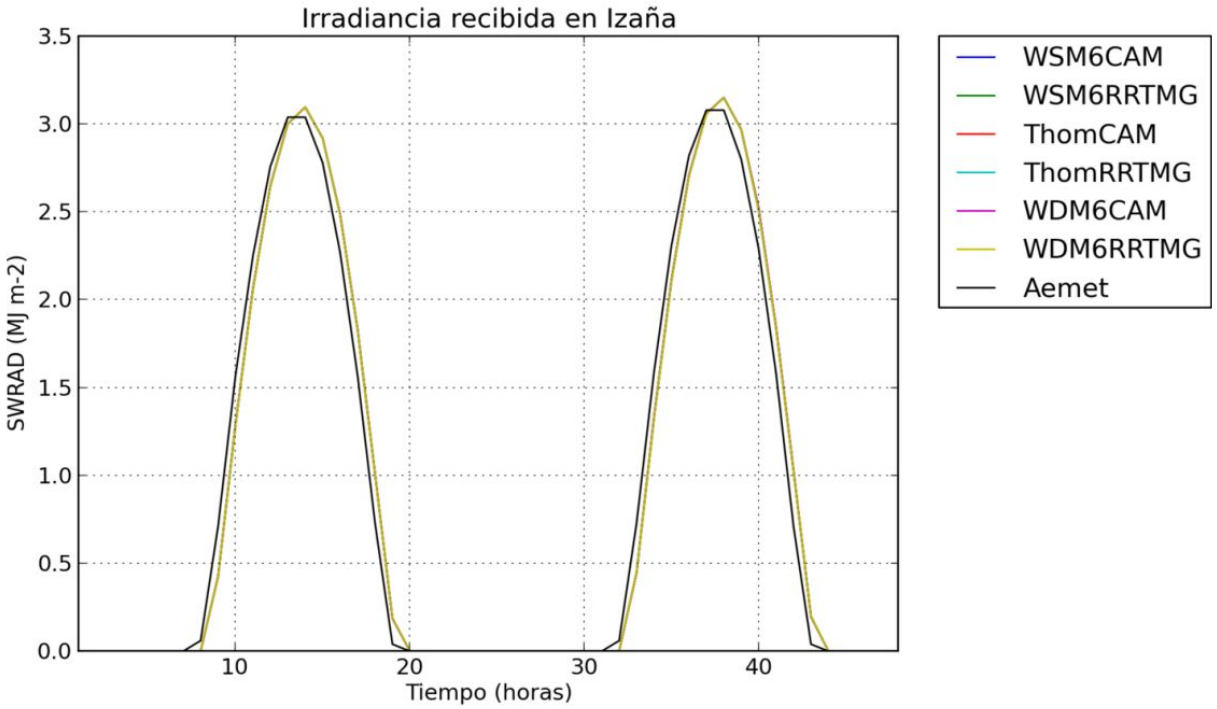


*Figura 10. Gráfica que representa la irradiancia recibida por hora en Izaña.*

| Modelo | Irradiancia recibida en el primer día (MJ m-2) | Irradiancia recibida en el segundo día (MJ m-2) | Irradiancia total (MJ m-2) | Error relativo (en %) |
|---|---|---|---|---|
| WSM6CAM | 20.9681 | 21.3698 | 42.3379 | 1.02 |
| WSM6RRTMG | 20.9490 | 21.3364 | 42.2854 | 0.90 |
| ThomCAM | 20.9670 | 21.3708 | 42.3378 | 1.02 |
| ThomRRTMG | 20.9478 | 21.3244 | 42.2722 | 0.86 |
| WDM6CAM | 20.9673 | 21.3749 | 42.3422 | 1.03 |
| WDM6RRTMG | 20.9484 | 21.3289 | 42.2773 | 0.88 |
| Promedio de las predicciones | 20.9516 | 21.3509 | 42.3088 | 0.95 |
| Datos Aemet | 20.8200 | 21.0900 | 41.9100 | - |

*Tabla 6. Datos de la irradiancia recibida durante los dos días y de sus errores en Izaña.*

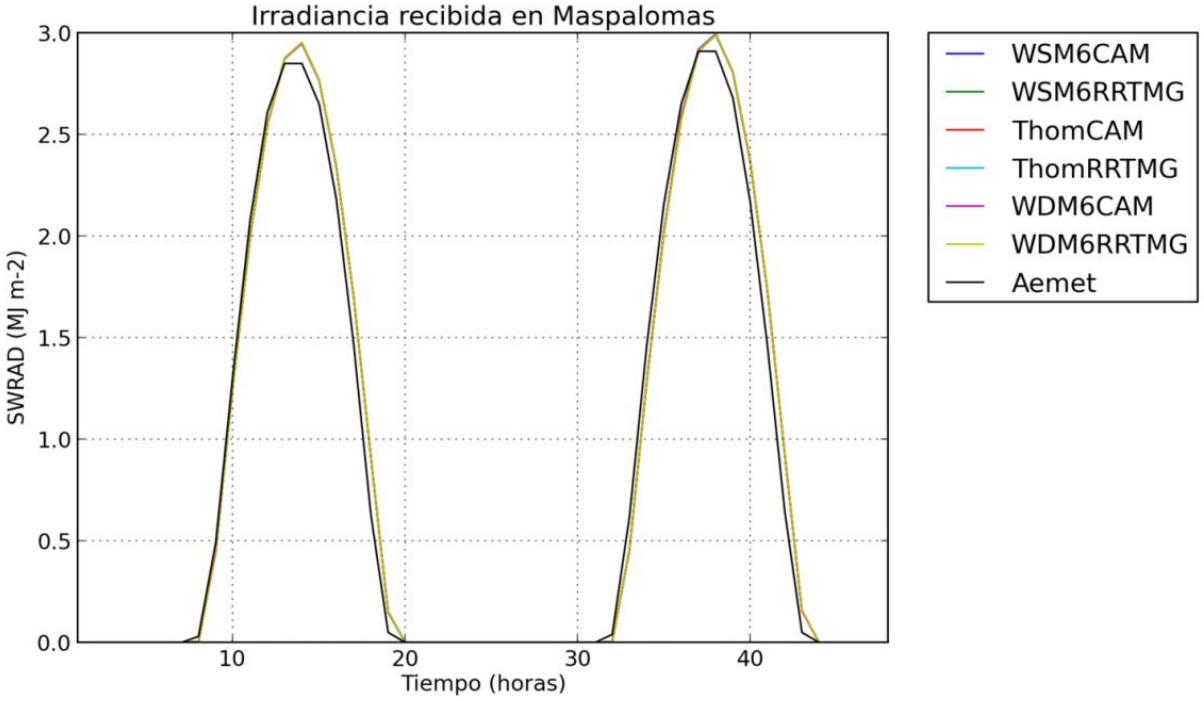


*Figura 11. Gráfica que representa la irradiancia recibida por hora en Maspalomas.*

| Modelo | Irradiancia recibida en el primer día (MJ m-2) | Irradiancia recibida en el segundo día (MJ m-2) | Irradiancia total (MJ m-2) | Error relativo (en %) |
|---|---|---|---|---|
| WSM6CAM | 19.9589 | 20.2600 | 40.2189 | 3.20 |
| WSM6RRTMG | 19.9707 | 20.2373 | 40.2080 | 3.18 |
| ThomCAM | 19.9577 | 20.2531 | 40.2108 | 3.18 |
| ThomRRTMG | 19.9694 | 20.2176 | 40.1870 | 3.12 |
| WDM6CAM | 19.9586 | 20.2567 | 40.2153 | 3.20 |
| WDM6RRTMG | 19.9707 | 20.2339 | 40.2046 | 3.17 |
| Promedio de las predicciones | 19.9643 | 20.4231 | 40.2074 | 3.18 |
| Datos Aemet | 19.2100 | 19.7600 | 38.9700 | - |

*Tabla 7. Datos de la irradiancia recibida durante los dos días y de sus errores en Maspalomas.*

Se vuelven a encontrar errores bajos para el caso de Izaña y Maspalomas dado la ausencia de nubes estos dos días. No obstante hay que señalar que para el caso de Santa Cruz, aunque los errores sigan siendo bastante menores al 40%, se han obtenido errores mayores, superiores al 12%, con respecto a los otros dos lugares.

Esto es debido a que el modelo atmosférico no ha tenido en cuenta la posible presencia de aerosoles. Para ello habría que haber incorporado el módulo WRF-Chem, el cual simula la emisión, transporte y mezcla de transformaciones químicas de las trazas de los gases y los aerosoles de forma simultánea con la dinámica atmosférica. El hecho de que los errores sean mayores en Santa Cruz que en Maspalomas o en Izaña refleja el hecho de que mientras que la primera ciudad se vio afectada por episodios de calima, en las otras dos zonas este fenómeno no tuvo tanta incidencia, bien por su lejanía espacial, como en el caso de Maspalomas, o bien por su altitud, como en el caso de Izaña.

En las **Fig. 12** y **Fig. 13** se representa la evolución de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, en Santa Cruz de Tenerife y en Izaña, con respecto a la altura y el tiempo medido en horas para la parametrización WSM6CAM. Destaca los valores bajos de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, en comparación con el caso de estudio anterior, correspondientes a un día de sequedad manifiesta.

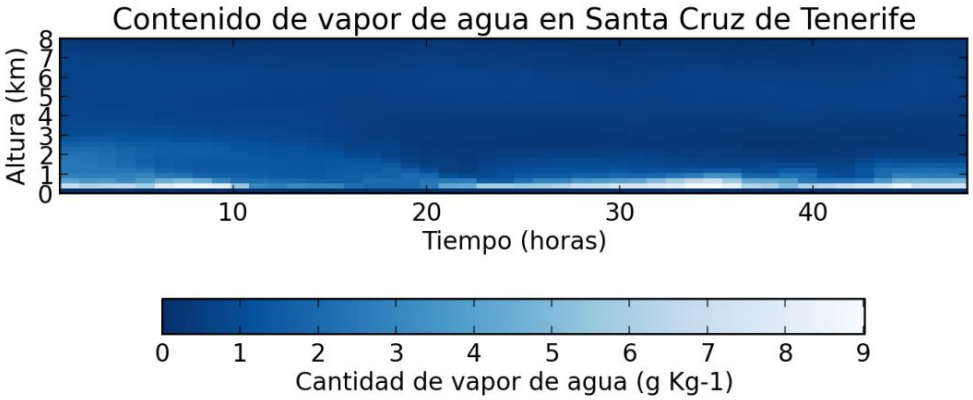


*Figura 12. Representación de la evolución de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera sobre Santa Cruz de Tenerife usando la parametrización WSM6CAM.*

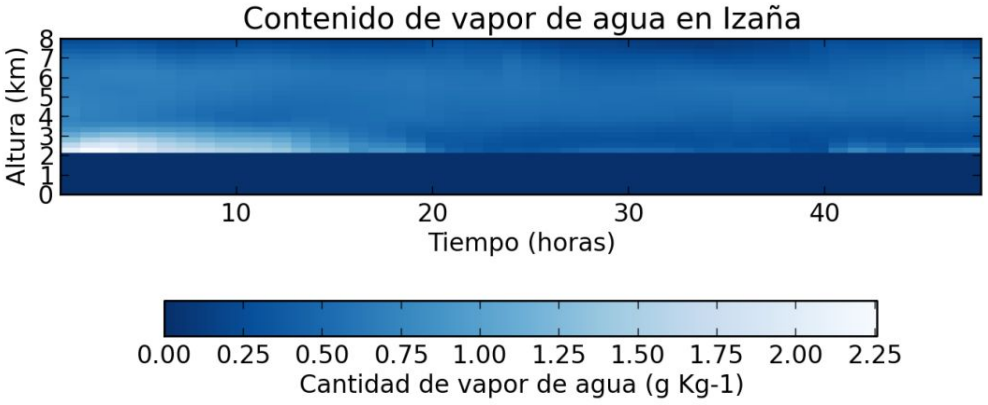


*Figura 13. Representación de la evolución de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera sobre Izaña usando la parametrización WSM6CAM.*

### 3.1.3. Tercer caso: 14/02/2019 - 15/02/2019

El tercer caso corresponde a un día con cielos despejados seguido de otro día nuboso, por lo que se esperará que la irradiancia recibida en la superficie durante el segundo día sea menor que la del primero.

En la **Fig. 14** se observa un mapa de la radiación acumulada durante las 48 horas para las seis distintas simulaciones realizadas con las combinaciones de parametrizaciones mencionadas en la metodología.

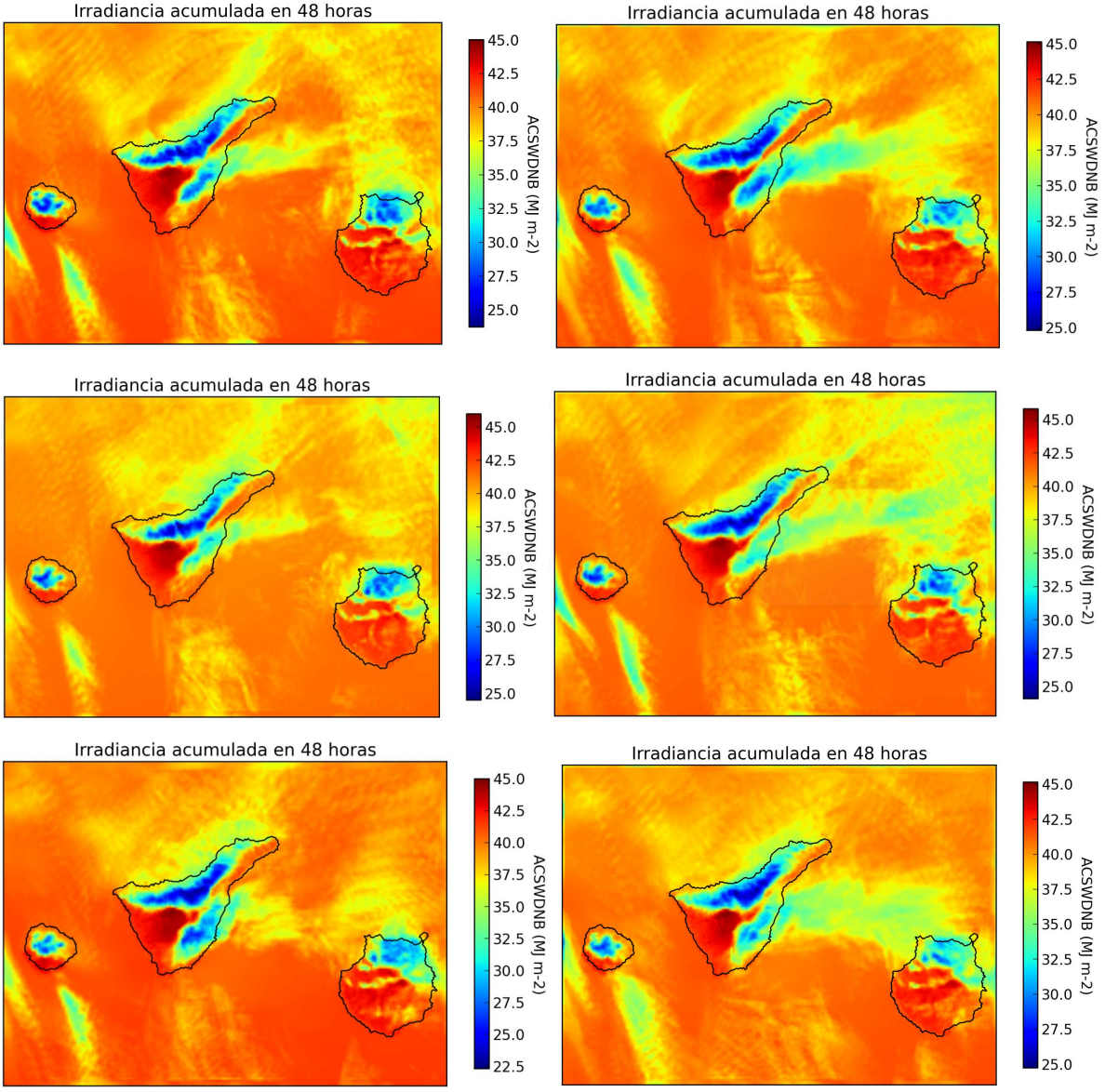


*Figura 14.* Mapas de la irradiancia acumulada durante 48 horas para las distintas simulaciones (ordenadas de izquierda a derecha y de arriba a abajo: WSM6CAM, WSM6RRTMG, ThomCAM, ThomRRTMG, WDM6CAM, WDM6RRTM).

A pesar de que los patrones de radiación sean semejantes, en este caso sí se encuentran diferencias más notorias entre unas simulaciones y otras, como en la región marítima situada entre las islas de Tenerife y Gran Canaria donde se observa que la irradiancia recibida en la superficie ha sido distinta. Esto se debe a que en función de la parametrización escogida se formarán distintos patrones de nubes.

En la **Fig. 15** y **Fig. 16** se presentan los datos de la irradiancia medida por horas en Santa Cruz de Tenerife e Izaña para todas las simulaciones realizadas y para los datos tomados por las estaciones de la AEMET [21]. En la **tabla 8** y **tabla 9** figuran los datos de la irradiancia total recibida durante el primer, durante el segundo día, la total de ambas días y el error relativo calculado a partir de la desviación de estos datos con los valores experimentales tomados por la AEMET, incluyéndose la media aritmética de las 6 simulaciones.

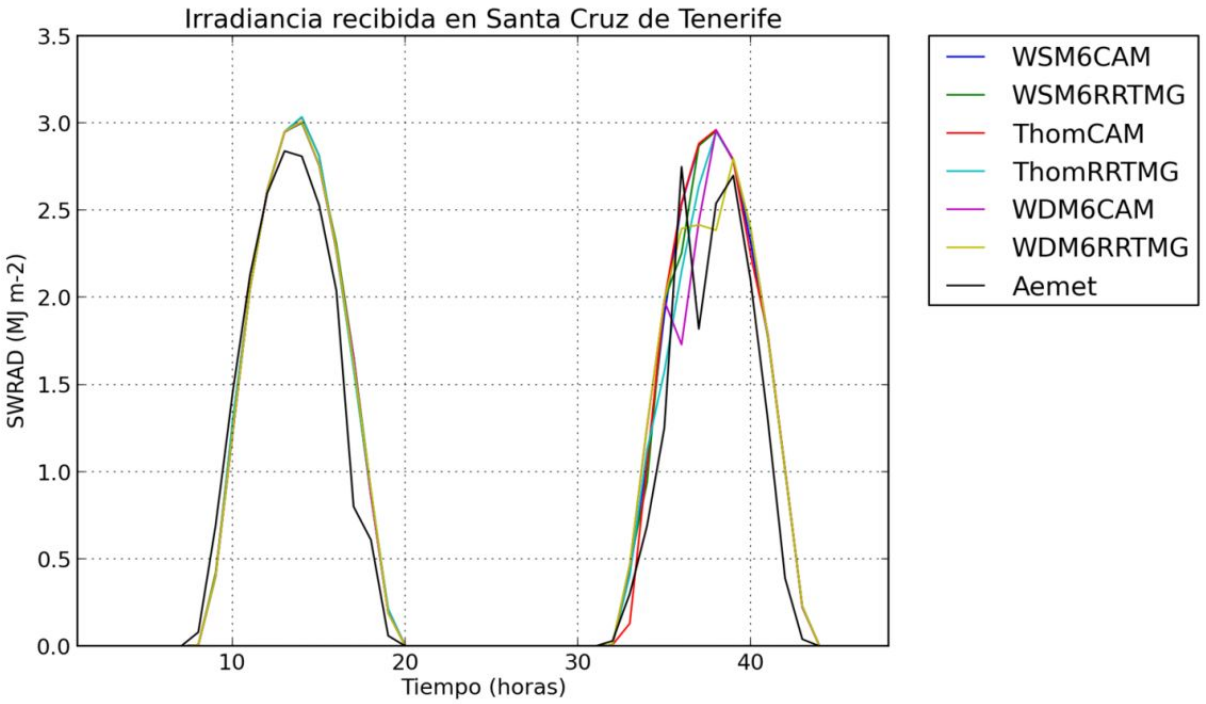


*Figura 15. Gráfica que representa la irradiancia recibida por hora en Santa Cruz de Tenerife.*

| Modelo | Irradiancia recibida en el primer día (MJ m-2) | Irradiancia recibida en el segundo día (MJ m-2) | Irradiancia total (MJ m-2) | Error relativo (en %) |
|---|---|---|---|---|
| WSM6CAM | 20.0141 | 19.8598 | 39.8739 | 15.38 |
| WSM6RRTMG | 20.1121 | 19.6544 | 39.7665 | 15.07 |
| ThomCAM | 20.1095 | 19.6073 | 39.7168 | 14.92 |
| ThomRRTMG | 20.1113 | 19.0448 | 39.1561 | 13.30 |
| WDM6CAM | 20.0134 | 19.0449 | 39.0583 | 13.02 |
| WDM6RRTMG | 20.0280 | 19.1359 | 39.1639 | 13.32 |
| Promedio de las predicciones | 20.0647 | 19.3911 | 39.4558 | 14.17 |
| Datos Aemet | 18.6500 | 15.9100 | 34.5600 | - |

Tabla 8. Datos de la irradiancia recibida durante los dos días y de sus errores en Santa Cruz de Tenerife.

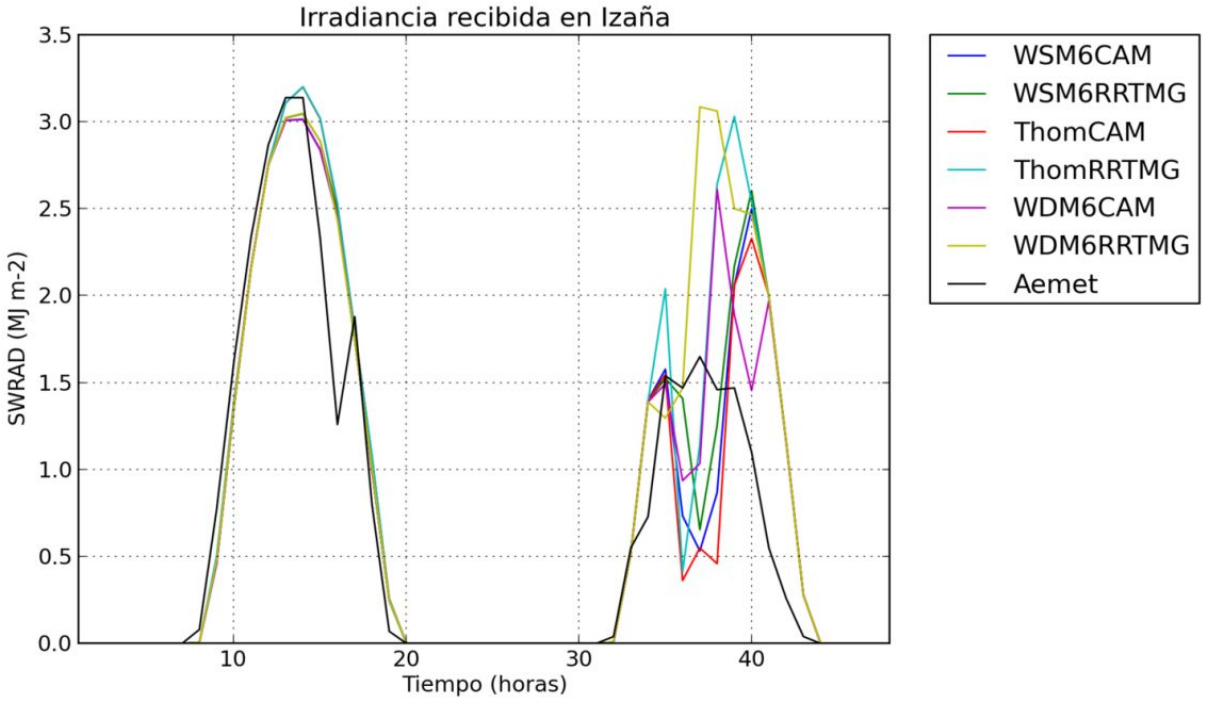


*Figura 16. Gráfica que representa la irradiancia recibida por hora en Izaña.*

| Modelo | Irradiancia recibida en el primer día (MJ m-2) | Irradiancia recibida en el segundo día (MJ m-2) | Irradiancia total (MJ m-2) | Error relativo (en %) |
|---|---|---|---|---|
| WSM6CAM | 21.0515 | 13.6286 | 34.6801 | 11.30 |
| WSM6RRTMG | 21.1589 | 14.9730 | 36.1319 | 15.96 |
| ThomCAM | 21.7862 | 12.6770 | 34.4632 | 10.60 |
| ThomRRTMG | 21.8075 | 17.1725 | 38.9800 | 25.10 |
| WDM6CAM | 21.0535 | 14.7540 | 35.8075 | 14.91 |
| WDM6RRTMG | 21.1546 | 19.2373 | 40.3919 | 26.63 |
| Promedio de las predicciones | 21.3353 | 15.4070 | 36.7424 | 17.92 |
| Datos Aemet | 20.3000 | 10.8600 | 31.1600 | - |

Tabla 9. Datos de la irradiancia recibida durante los dos días y de sus errores en Izaña.

En este caso, tal y como se había predicho, se observa que en el primer día se mide más irradiancia que en el segundo, correspondientes a un día con cielos despejados y otro día con algo de nubes. Se observa también que en Santa Cruz hubo menos nubes que en Izaña, por lo que resulta más interesante analizar este último caso.

En la **Fig. 16** se observa que las distintas parametrizaciones muestran predicciones diferentes, aunque en líneas generales se observan que las seis simulaciones muestran descensos y ascensos en la irradiancia en este periodo. Las diferencias radican más bien en la amplitud de estas variaciones. Los datos de la AEMET reflejan que en las horas centrales del segundo día la irradiancia recibida por hora se mantuvo aproximadamente constante mientras que todas las simulaciones predecían una bajada de la irradiancia en la primera parte del día y un ascenso en las primeras horas de la tarde.

Analizando dicho gráfico y contrastándolo con la información que nos aporta la **tabla 9**, vemos que a pesar de que todos los errores están dentro del límite del 40%, cuando se usa la parametrización radiativa CAM se obtienen mejores resultados que cuando se usa la RRTMG. Además, también se mejoran los resultados cuando se usa la parametrización relativa a la microfísica WSM6 o Thom, ambas en combinación con la CAM. De hecho, la combinación ThomCam es la que mejor se comporta en este caso tanto en Santa Cruz como en Izaña.

Hay que destacar que en este caso el promedio de las seis simulaciones no mejora significativamente los resultados, en consecuencia carecerá de interés la representación de dicho promedio.

A continuación, en la **Fig. 17** y **Fig. 18** se representa la evolución de las nubes para las distintas parametrizaciones, en Santa Cruz y en Izaña.

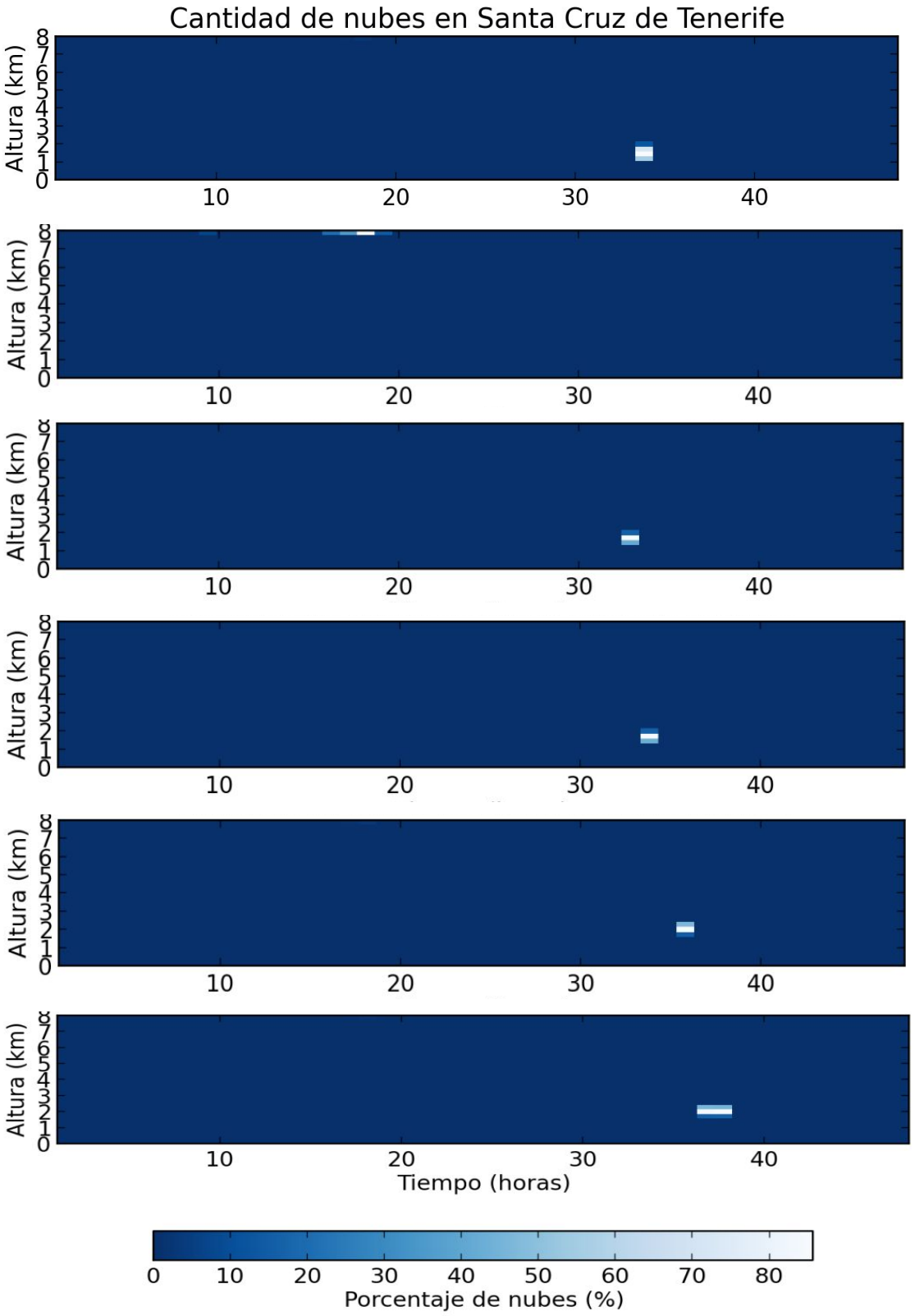


*Figura 17. Representación de la evolución de las nubes en la atmósfera sobre Santa Cruz de Tenerife usando la parametrizaciones ordenadas de arriba a abajo: WSM6CAM,* WSM6RRTMG, ThomCAM, ThomRRTMG, WDM6CAM, WDM6RRTM.

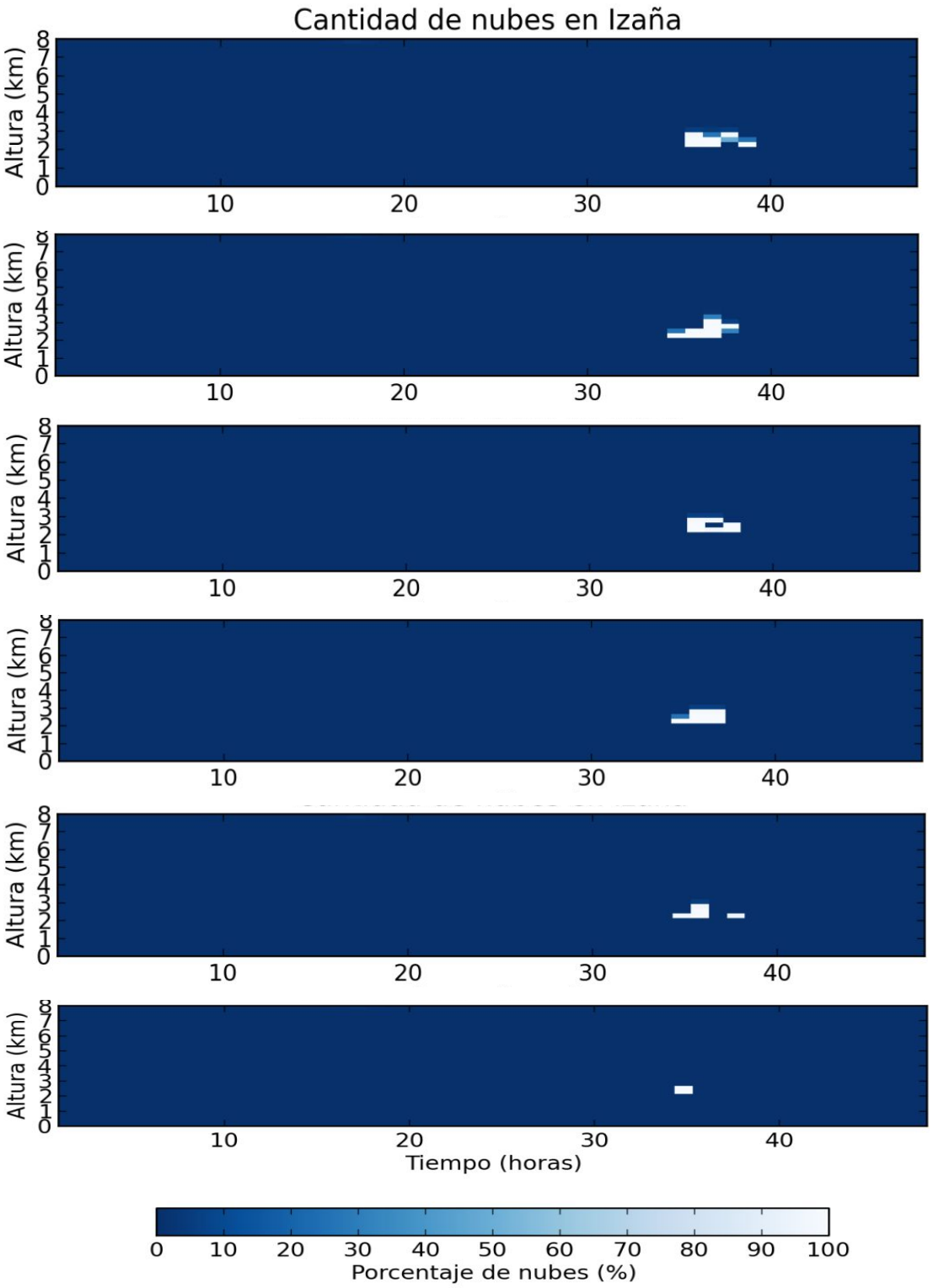


*Figura 18. Representación de la evolución de las nubes en la atmósfera sobre Izaña usando la parametrizaciones ordenadas de arriba a abajo: WSM6CAM,* WSM6RRTMG, ThomCAM, ThomRRTMG, WDM6CAM, WDM6RRTM.

Se aprecia que la formación de nubes no cambia solamente con la parametrización de microfísica, sino también con la de transferencia radiativa.
En el siguiente caso se hará un análisis más exhaustivo de la formación de nubes para las distintas parametrizaciones contempladas.

### 3.1.4. Cuarto caso: 02/04/2019 - 03/04/2019

El cuarto caso corresponde a dos días con cielos completamente nubosos, por lo que se esperará que las predicciones de cada simulación sean diferentes entre sí, en función de los patrones de nubes que simulen cada una de ellas.

En la **Fig. 19** se observa un mapa de la radiación acumulada durante las 48 horas para las 6 distintas simulaciones realizadas con las combinaciones de parametrizaciones mencionadas anteriormente y correspondientes al cuarto dominio.

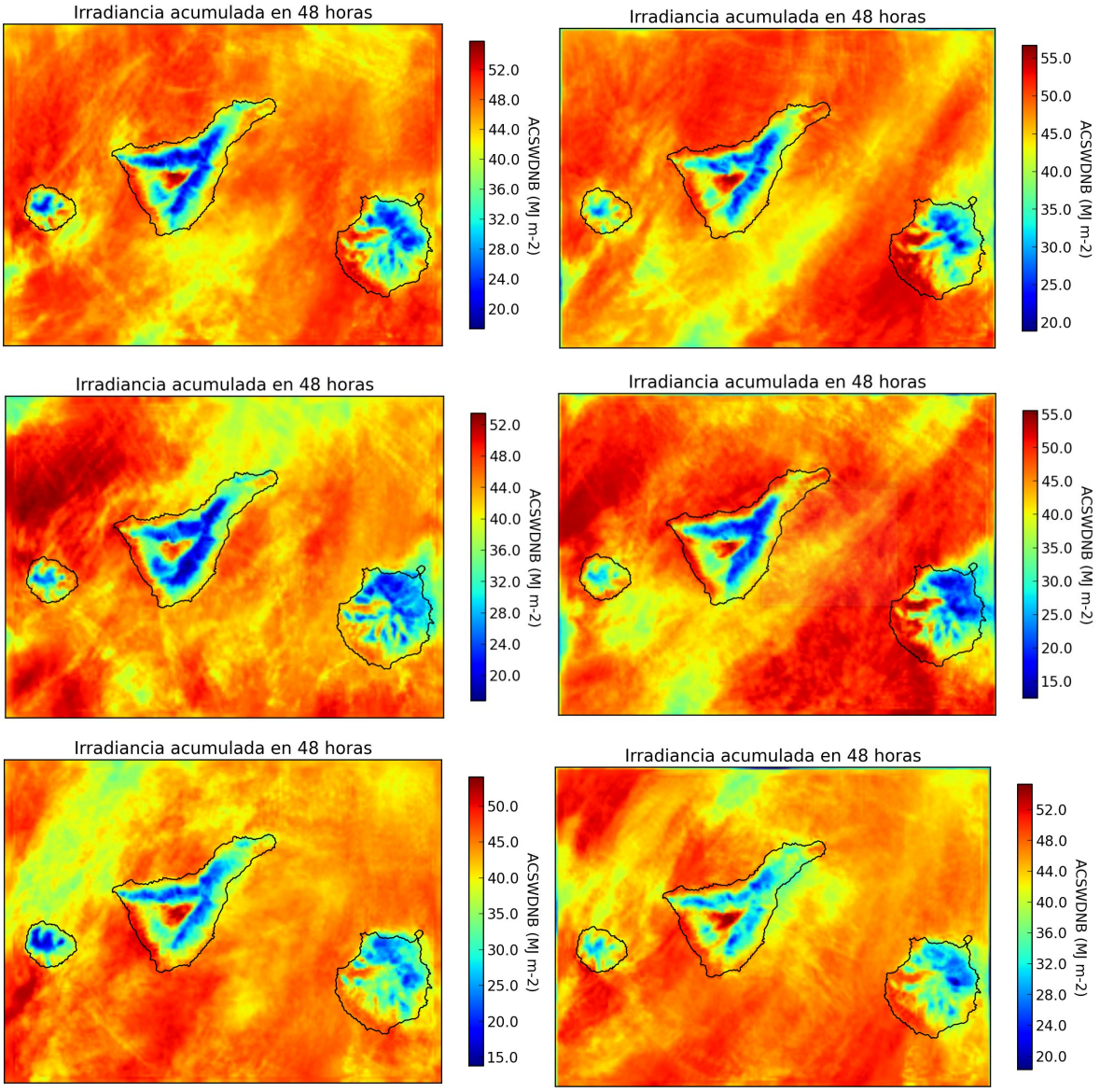


*Figura 19.* Mapas de la irradiancia acumulada durante 48 horas para las distintas simulaciones (ordenadas de izquierda a derecha y de arriba a abajo: WSM6CAM, WSM6RRTMG, ThomCAM, ThomRRTMG, WDM6CAM, WDM6RRTM).

En este último caso de estudio se aprecia que las diferencias entre los mapas de radiación de las distintas simulaciones resultan notables, por lo que se espera que los patrones de nubosidad sean también diferentes.

En las **Fig. 20-22** se presentan los datos de la irradiancia medida por horas obtenidos por todas las simulaciones realizadas en Santa Cruz de Tenerife, Izaña y Maspalomas, y además se comparan con los datos experimentales obtenidos por la AEMET [21]. En las **tablas 10-12** figuran los datos de la irradiancia total recibida por días, la irradiancia total y el error relativo calculado a partir de la desviación de estos datos con los valores experimentales tomados por la AEMET. Además también se incluye la media aritmética de las seis simulaciones, la cual nos puede resultar útil para el análisis posterior.

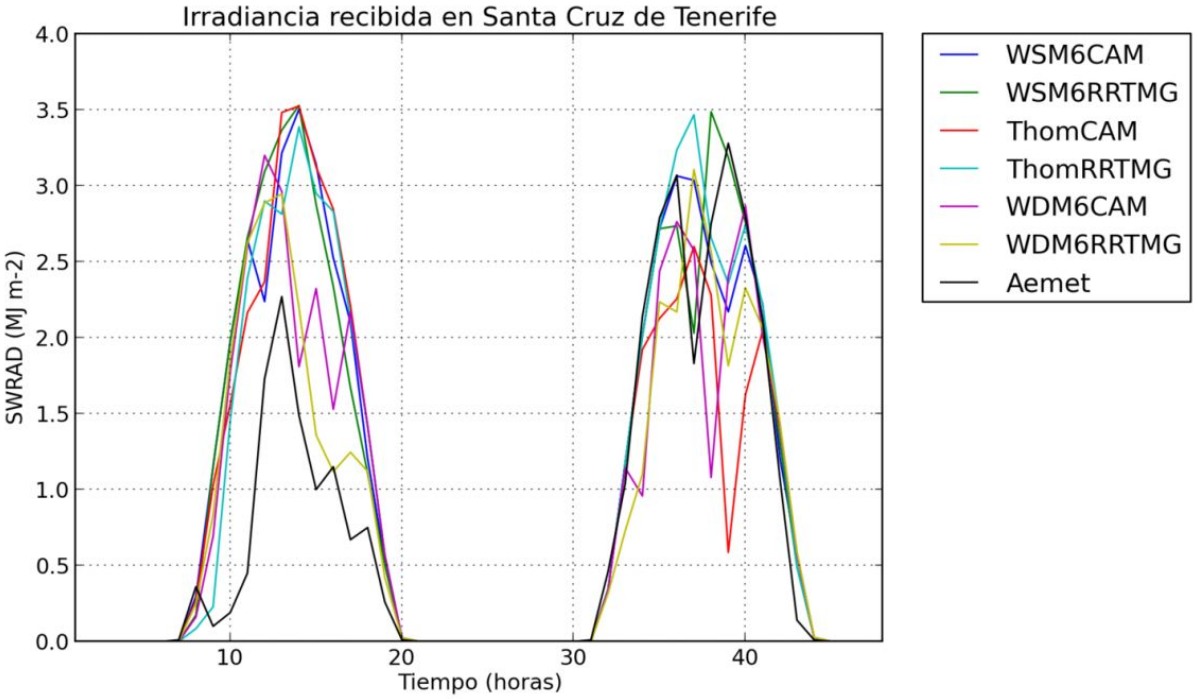


*Figura 20. Gráfica que representa la irradiancia recibida por hora en Santa Cruz de Tenerife.*

| Modelo | Irradiancia recibida en el primer día (MJ m-2) | Irradiancia recibida en el segundo día (MJ m-2) | Irradiancia total (MJ m-2) | Error relativo (en %) |
|---|---|---|---|---|
| WSM6CAM | 24.5473 | 23.6533 | 48.2006 | 41.98 |
| WSM6RRTMG | 24.4676 | 24.3989 | 48.8665 | 43.94 |
| ThomCAM | 24.5837 | 18.9612 | 43.5449 | 28.26 |
| ThomRRTMG | 23.1765 | 24.8702 | 48.0467 | 41.52 |
| WDM6CAM | 21.2308 | 20.6104 | 41.8412 | 23.24 |
| WDM6RRTMG | 18.8779 | 20.4934 | 39.3713 | 15.97 |
| Promedio de las predicciones | 22.8140 | 22.1646 | 44.9785 | 32.48 |
| Datos Aemet | 10.4400 | 23.5100 | 33.9500 | - |

Tabla 10. Datos de la irradiancia recibida durante los dos días y de sus errores en Santa Cruz de Tenerife.

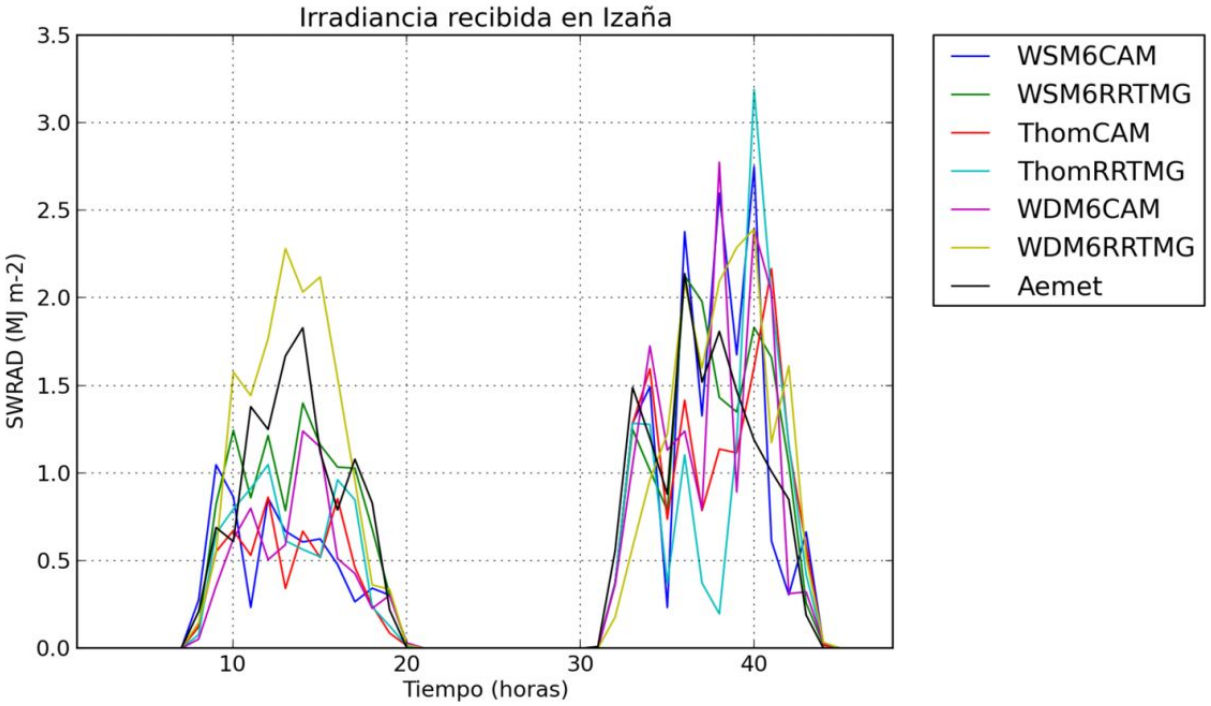


*Figura 21. Gráfica que representa la irradiancia recibida por hora en Izaña..*

| Modelo | Irradiancia recibida en el primer día (MJ m-2) | Irradiancia recibida en el segundo día (MJ m-2) | Irradiancia total (MJ m-2) | Error relativo (en %) |
|---|---|---|---|---|
| WSM6CAM | 6.6029 | 15.7221 | 22.3250 | -14.13 |
| WSM6RRTMG | 10.6854 | 15.1500 | 25.8354 | -0.63 |
| ThomCAM | 5.9358 | 13.9725 | 19.6083 | -24.58 |
| ThomRRTMG | 7.3789 | 12.9783 | 20.3572 | -21.70 |
| WDM6CAM | 6.8227 | 15.0711 | 21.8938 | -15.79 |
| WDM6RRTMG | 15.1384 | 16.7510 | 31.8894 | 22.65 |
| Promedio de las predicciones | 8.7606 | 14.9408 | 23.7015 | -8.84 |
| Datos Aemet | 11.6800 | 14.3200 | 26.0000 | - |

Tabla 11. Datos de la irradiancia recibida durante los dos días y de sus errores en Izaña.

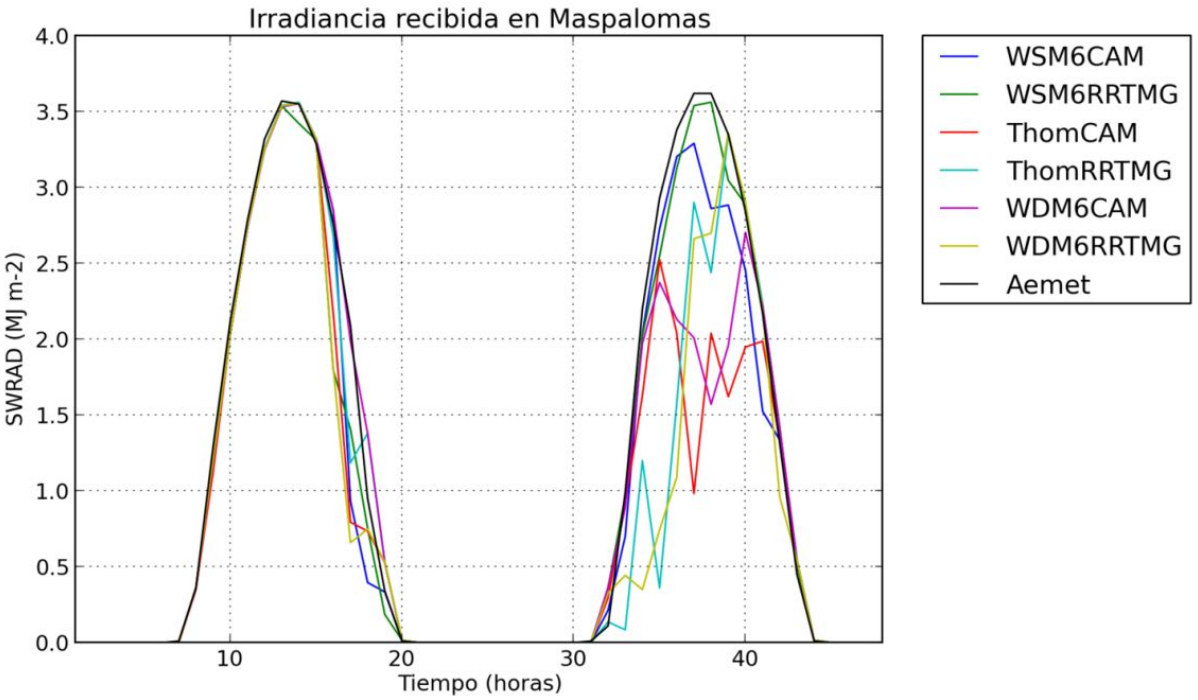


*Figura 22. Gráfica que representa la irradiancia recibida por hora en Maspalomas.*

| Modelo | Irradiancia recibida en el primer día (MJ m-2) | Irradiancia recibida en el segundo día (MJ m-2) | Irradiancia total (MJ m-2) | Error relativo (en %) |
|---|---|---|---|---|
| WSM6CAM | 24.5135 | 23.7944 | 48.3079 | -9.59 |
| WSM6RRTMG | 24.0328 | 26.2392 | 50.2720 | -5.91 |
| ThomCAM | 24.1544 | 17.8673 | 42.0128 | -21.37 |
| ThomRRTMG | 25.8076 | 19.1453 | 44.9529 | -15.87 |
| WDM6CAM | 26.7308 | 20.1643 | 46.8951 | -12.23 |
| WDM6RRTMG | 23.7645 | 18.2899 | 42.0544 | -21.29 |
| Promedio de las predicciones | 24.8324 | 20.9167 | 45.7492 | -14.38 |
| Datos Aemet | 26.4400 | 26.9900 | 53.4300 | - |

Tabla 12. Datos de la irradiancia recibida durante los dos días y de sus errores en Maspalomas.

Se observa que, efectivamente, como se comentaba anteriormente, cada simulación muestra resultados distintos, aunque todas coinciden por ejemplo en la **Fig. 22** en señalar que el primer día en Maspalomas hubo cielos despejados, tal y como confirman los datos de la AEMET. Sin embargo, las predicciones para el segundo día en todas las simulaciones reflejan la existencia de nubes que, sin embargo, no se produce, pues los datos de la AEMET reflejan que el segundo día también hubo cielos despejados. Por este motivo, en este caso los errores cometidos en las predicciones de la irradiancia son debidos a una estimación deficitaria y no excedentaria como en los casos anteriores. Aunque ningún error representado en esta gŕafica es elevado, **tabla 12**, destaca el buen funcionamiento de la parametrización WSM6RRTMG, la cual consigue reducir el error por debajo del 6%.

En el caso de Izaña, tal y como se aprecia en la **Fig. 21** y en la **tabla 11**, ambos días fueron nubosos y por tanto la irradiancia medida en superficie fue baja y altamente variable. En este caso los errores son del mismo orden que en el caso de Maspalomas aunque hay que destacar de nuevo la parametrización WSM6RRTMG que vuelve a ser la que mejor funciona, en este caso reduciendo el error por debajo del 1%.

Finalmente en el caso de Santa Cruz, como se observa en la **Fig. 20** y en la **tabla 10**, los errores son mucho mayores que en los casos anteriores, superando incluso el límite del 40% con algunas parametrizaciones, puesto que para el primer día todas las simulaciones han predicho bastante más irradiancia de la que finalmente se ha medido. No obstante, hay algunas parametrizaciones, como la

WDM6RRTMG, que consiguen reducir el error por debajo del 20%, aunque en Izaña y Maspalomas esta parametrización es de las que peores ha funcionado. Hay que destacar también el caso de la parametrización WSM6RRTMG, la cual sí que ha funcionado bien en este caso en Izaña y Maspalomas. A pesar de que su error cometido en Santa Cruz es más elevado, esto es debido a que la irradiancia calculada para el primer día ha sido mayor que la prevista por otras parametrizaciones. No obstante, si nos fijamos en el segundo día, WSM6RRTMG ha sido la parametrización que más se ha acercado a los datos experimentales tomados por la AEMET, por lo que para este día vuelve a ser la parametrización que mejor ha funcionado.

A continuación, en las **Fig. 23-25**, se muestra la evolución de las nubes en Santa Cruz de Tenerife, Izaña y Maspalomas para las distintas parametrizaciones, ordenadas de arriba a abajo como *WSM6CAM,* WSM6RRTMG, ThomCAM, ThomRRTMG, WDM6CAM, WDM6RRTM.

Se puede observar que aquellas que tienen las mismas parametrizaciones de microfísica, sus patrones nubosos se asemejan más entre sí, como era de esperar, y cuando se modifica esta parametrización, los patrones presentan grandes diferencias. Sin embargo, lo que resulta más llamativo es que para aquellas gráficas que comparten una misma parametrización de microfísica, pero que se les ha variado la parametrización relativa a la radiación, su patrón de nubes también varía, tanto en cantidad de nubes, grosor y altura de las mismas. Por lo tanto se concluye que la formación y evolución de las nubes que predecirá el modelo no solamente dependerá de la parametrización de la microfísica sino también de la relativa a los balances radiativos.

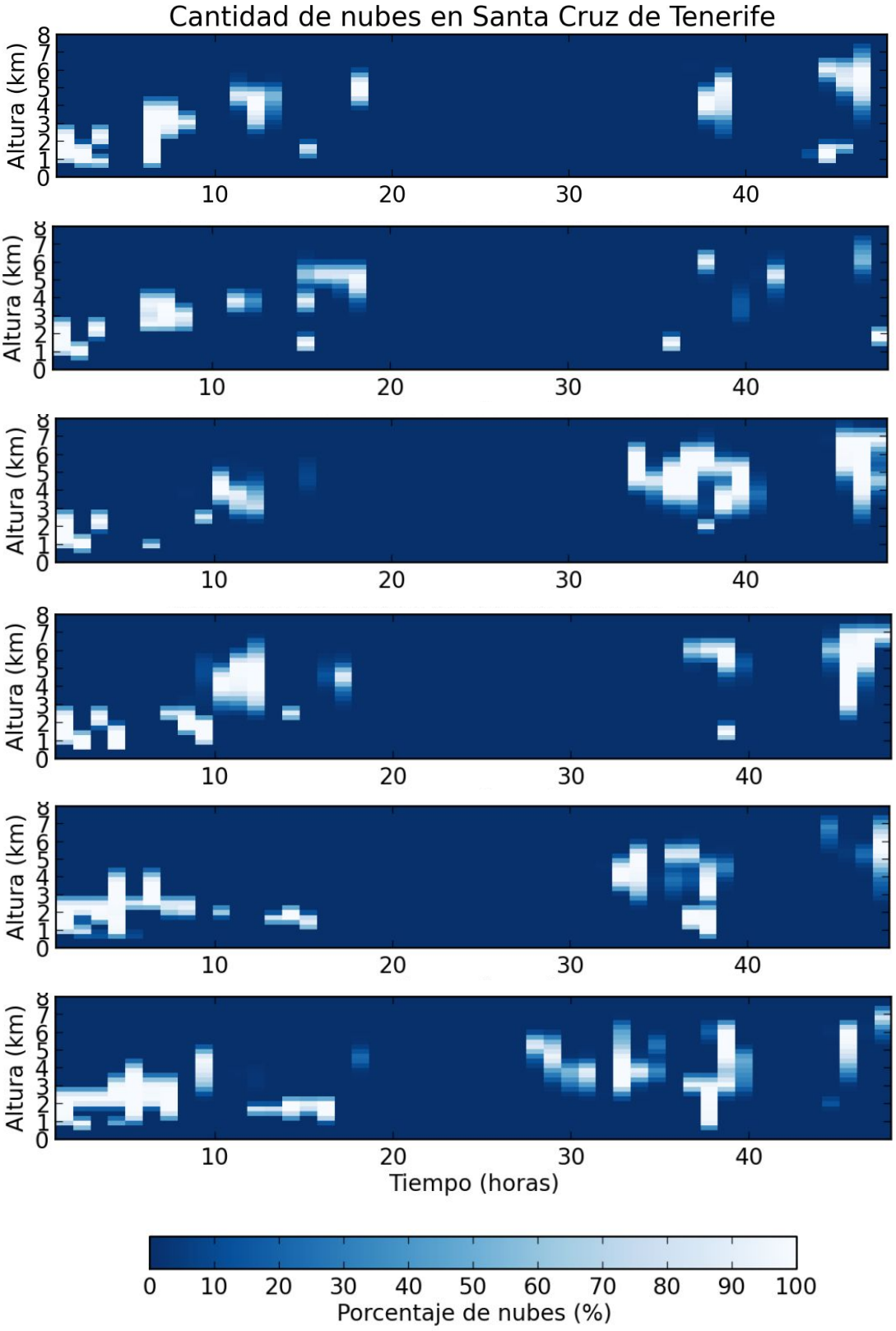


*Figura 23. Representación de la evolución de las nubes en la atmósfera sobre Santa Cruz de Tenerife usando la parametrizaciones ordenadas de arriba a abajo: WSM6CAM,* WSM6RRTMG, ThomCAM, ThomRRTMG, WDM6CAM, WDM6RRTM.

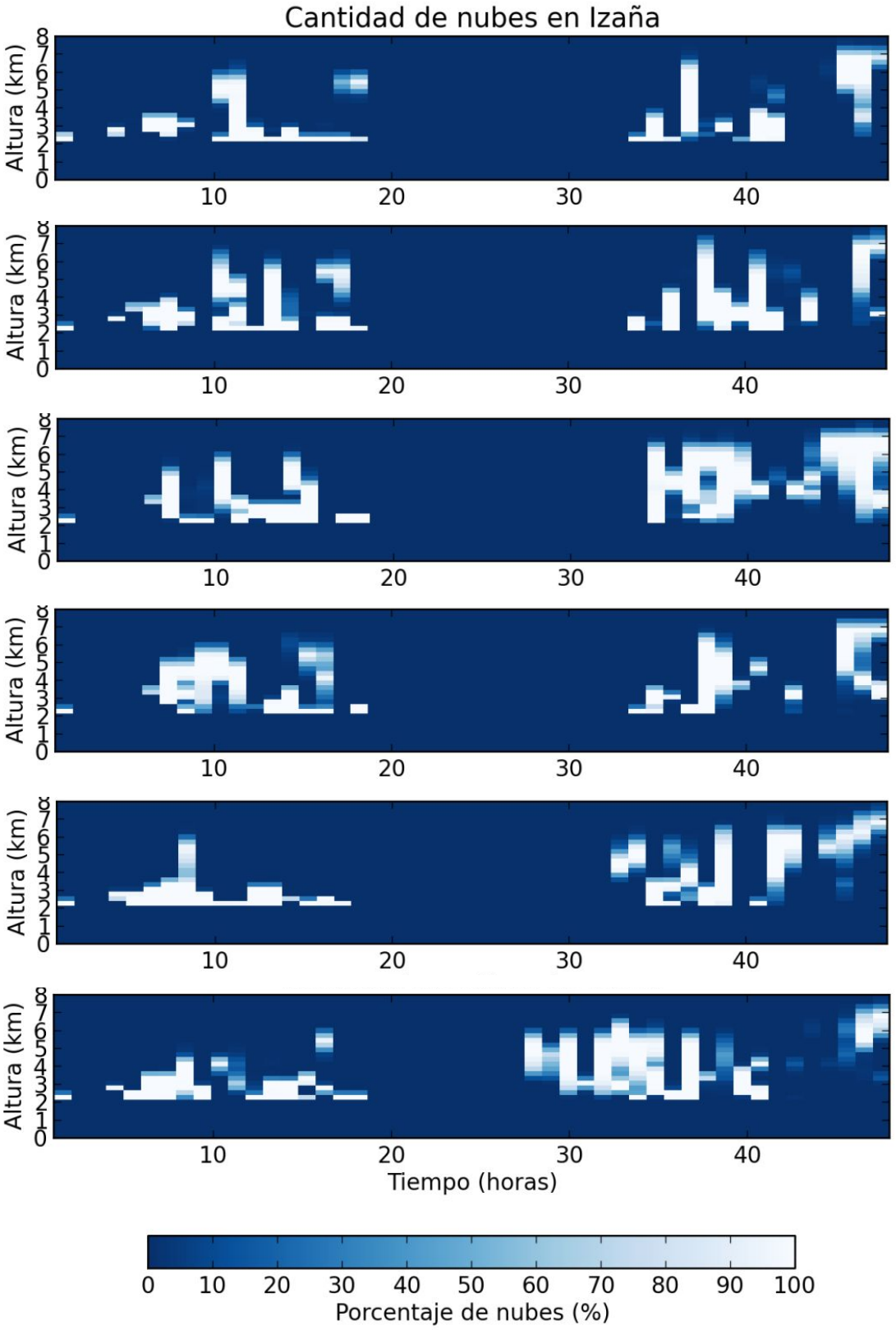


*Figura 24. Representación de la evolución de las nubes en la atmósfera sobre Izaña usando la parametrizaciones ordenadas de arriba a abajo: WSM6CAM,* WSM6RRTMG, ThomCAM, ThomRRTMG, WDM6CAM, WDM6RRTM.

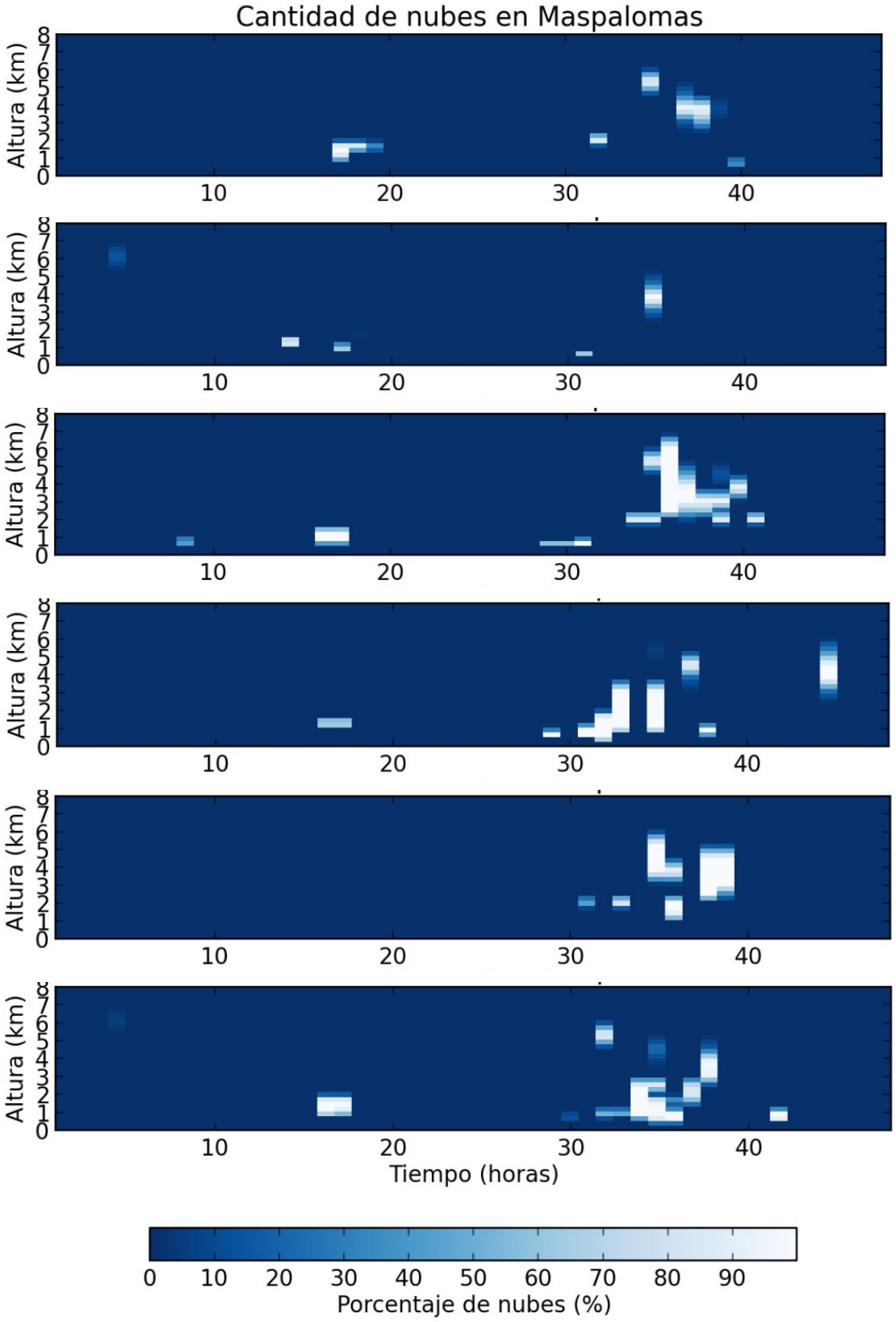


*Figura 25. Representación de la evolución de las nubes en la atmósfera sobre Maspalomas usando la parametrizaciones ordenadas de arriba a abajo: WSM6CAM,* WSM6RRTMG, ThomCAM, ThomRRTMG, WDM6CAM, WDM6RRTM.

## 3.2. Análisis de resultados.

En primer lugar se observa que en la mayoría de las simulaciones realizadas, sobre todo cuando existen condiciones de cielo despejado, se ha obtenido una mayor irradiancia de la que se ha recibido, lo cual se debe a que WRF es un modelo que sobrestima la radiación. Además en el caso de que tengamos presencia de aerosoles en la atmósfera que dispersen la radiación, provocando que llegue menos irradiancia a la superficie, los errores que se cometerán serán mayores debido a que no se ha incorporado el módulo WRF-Chem que tiene en cuenta este fenómeno.

Se ha observado también que en condiciones similares, los errores cometidos en Izaña han sido menores que en Santa Cruz de Tenerife. Esto es debido a que al encontrarse a mayor altitud la estación de Izaña, la irradiancia que llega a su superficie tiene que recorrer menos atmósfera que la irradiancia que llega a Santa Cruz, con lo que hay menos margen en el primer caso a cometer errores. Además, debido a la digitalización del terreno en el modelo, el nodo de simulación más cercano a la estación de Izaña considera una altitud de la superficie de 1903 m, más bajo que la altura real de la estación, 2371 m. Esto hace que la irradiancia calculada sea menor que la esperada a un punto de mayor altitud, corrigiendo en parte la sobreestimación sistemática del modelo.

En el caso de que haya presencia de nubes en la atmósfera, se ha comprobado que en función de las parametrizaciones elegidas, se obtienen predicciones más o menos certeras. A pesar de que con sólo cuatro casos de estudio puede resultar insuficiente determinar qué parametrización resulta más apropiada para predecir la radiación en Canarias, se ha podido observar que al menos en nuestro estudio, la parametrización que menos errores ha obtenido es WSM6RRTMG , seguida con cierta distancia por ThomCam. El resto, presenta errores superiores a estas dos parametrizaciones, si bien prácticamente casi todos los escenarios analizados presentan errores inferiores al límite del 40% mencionado por otros autores [6].

Finalmente se ha podido analizar la influencia de las distintas parametrizaciones en la formación de nubes que predice el modelo y se ha comprobado que éstas no dependerán solamente de la parametrización de microfísica sino también de la parametrización relativa a la radiación.

# 4. Conclusiones.

*Finally, this section will address a series of general considerations related to how to improve the atmospheric model, by reducing the errors that have been obtained in the predictions of radiation in the Canary Islands, or how to continue this study, as it is an open work subject to possible improvements or extensions by the scientific community.*

Finalmente, resulta conveniente hacer una serie de consideraciones generales a modo de reflexión final.

En primer lugar, como se comentó anteriormente, con sólo cuatro casos de estudio resulta insuficiente realizar reflexiones más profundas a la hora de tratar de determinar qué parametrización física funciona mejor en cuanto a las predicciones para la radiación en superficie en las islas Canarias, en concreto en Tenerife y Gran Canaria. Sin embargo, debido a las limitaciones de tiempo, formato de este trabajo y disponibilidad de los datos observacionales, resulta imposible realizar una serie histórica más larga, con el fin de tener muchos más casos a analizar, hecho que hubiera sido conveniente. Debido a ello, se han escogido distintos días para simular el modelo con diferentes condiciones meteorológicas, con el fin de estudiar cómo influye cada escenario a la hora de predecir la radiación solar.

En consecuencia, éste no es un trabajo cerrado, pues estará siempre sujeto a posibles mejoras, ampliaciones de estudio, o sugerencias, las cuales serán siempre de utilidad.

Una posible aplicación de este trabajo distinta a la inicialmente prevista podría ser la elaboración de mapas de radiación acumulada en Canarias durante uno o varios años, así como la comparación de la irradiancia que se recibe en cada punto del archipiélago para determinar si ésta presenta grandes variaciones o por el contrario se mantiene constante año a año. Estos mapas de radiación, en el caso de que se determinase que la radiación acumulada año a año es similar, podrían resultar de gran utilidad a empresas que quisieran determinar cuál sería el emplazamiento idóneo para la instalación de futuros paneles fotovoltaicos, así como tener la capacidad de prever cuanta potencia se podrá generar cada año en función de en qué zona se encuentren instalados dichos paneles.

A lo largo del trabajo se han intentado también reducir los errores en las predicciones de la radiación, para lo cual se proponen las siguientes cuestiones:

Para reducir el error bajo la presencia de aerosoles, resulta conveniente incorporar WRF-Chem al modelo, el cual no se ha utilizado debido a las limitaciones de tiempo y formato de este trabajo mencionadas con anterioridad.

Otra opción, no excluyente de la anterior es la conocida como efecto cartera, la cual consiste en agrupar la generación de varios sistemas fotovoltaicos como si constituyesen un único sistema, de tal manera que la energía generada por el conjunto, consecuencia de las irradiancias simuladas en los distintos emplazamientos, sea más previsible que la de cada sistema individualmente. [6]

Por último, otra posible solución que ayude a las empresas suministradoras de energía resulta en combinar los sistemas fotovoltaicos con sistemas de almacenamiento, conocidos como baterías eléctricas. Esto consiste en usar el sistema de almacenamiento como una reserva en la que se inyectará energía cuando esta sea excedentaria y del cual se extraerá energía cuando sea deficitaria.

Todas las simulaciones se han llevado a cabo en paralelo, utilizando 8 núcleos de un procesador. No obstante, normalmente en sistemas de altas prestaciones HPC (high performance computing) se usan muchos más núcleos al mismo tiempo, lo cual ayuda a reducir enormemente el tiempo computacional.

Hay que destacar también, que parte del contenido de este trabajo consistió en la familiarización con el modelo atmosférico WRF, con el objetivo de que una vez concluido este trabajo previo, el autor fuese capaz de conocer sus nociones más básicas y de poder realizar simulaciones en él de forma autónoma.

# Referencias.

[1] Instituto Canario de Estadística (ISTAC), Gobierno de Canarias. [Disponible: http://www.gobiernodecanarias.org/istac/temas_estadisticos/demografia/poblacion/]. Última actualización: 2018, Consultado: 06/2019.

[2] Red eléctrica de España S.A. [Disponible: https://www.ree.es/es/datos/generacion]. Última actualización: 2019, Consultado: 06/2019.

[3] Ocaña, L., Linares, A., Llarena, E., Montes, C., González, O., Molina, D.,...Cendagorta, M. (2017). A*daptation of a Crystalline Silicon Solar cell laboratory to produce Perovskite solar devices*. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S. A. (ITER), Tenerife, España.

[4] Ocaña, L., Quinto, C., Montes, C., Linares, A., Llarena, E., González, O.,...Cendagorta, M. (2016). *Screen Printing for Perovskite Solar Cells metallization*. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S. A. (ITER), Tenerife, España.

[5] Troccoli, A., Dubus. L. & Haupt, S. (Ed.). (2014). *Weather Matters for Energy*. Nueva York, Estados Unidos: Editorial Springer.

[6] Santos Burguete, C. (Ed.). (2018). *Física del caos en la predicción meteorológica*. *Historia y fundamentos de la meteorología, sistemas de predicción por conjuntos, predicción probabilista y aplicaciones, cambio climático y aspectos sociales*. Madrid, España: AEMET.

[7] National Center for Atmospheric Research (NCAR), WRF, *The Weather Research and Forecasting Model*, [Disponible: https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and- forecasting-model]. Última actualización: 2019, Consultado: 06/2019.

[8] Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.

[9] National Centers for Environmental Prediction (NCEP). *National Weather Service*. [Disponible:https: //www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/doc.php]. Última actualización: 2019, Consultado: 04/2019.

[10] Hong, S.–Y., and J.–O. J. Lim, 2006: The WRF single–moment 6–class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129–151.

[11] Thompson, Gregory, Paul R. Field, Roy M. Rasmussen, William D. Hall, 2008: Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 5095–5115.

[12] Lim, K.–S. S., and S.–Y. Hong, 2010: Development of an effective double–moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 1587–1612.

[13] Collins, William D., et al., 2004: Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0). NCAR Tech. Note NCAR/TN–464+STR. 214 pp.

[14] Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, 2008: Radiative forcing by long–lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, 113, D13103.

[15] Pérez, J. C. , J. P. Díaz, A. González, J. Expósito, F. Rivera-López, and D. Taima, 2104: Evaluation of WRF Parameterizations for Dynamical Downscaling in the Canary Islands. *Journal of Climate,* 27, 5611–5631.

[16] Expósito, F.J., A. González, J.C. Pérez, J.P. Díaz, and D. Taima, 2015: High-Resolution Future Projections of Temperature and Precipitation in the Canary Islands. *Journal of Climate*, 28, 7846–7856.

[17] Pérez, J.C., A. González, J. P. Díaz, F. J. Expósito, J. Felipe, 2019: Climate change impact on future photovoltaic resource potential in an orographically complex archipelago, the Canary Islands. *Renewable Energy*, 133, 749-759.

[18] Janjic, Zavisa I., 1994: The Step–Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945.

[19] Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca, 2004: Implementation and verification of the unified NOAH land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15.

[20] Kain, John S., 2004: The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170–181.

[21] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). *AEMET OpenData, Sistema para la difusión y reutilización de la información de AEMET.* [Disponible: http://www.aemet.es/es/portada]. Última actualización: 2019, Consultado: 04/2019.