



# Trabajo de Fin de Grado

---

*Estudio de la influencia de la resolución espacial en la simulación de fenómenos meteorológicos extremos en Tenerife*

---

**Autor:** Ángel David Suárez Bonilla

**Tutores:** Dr. Albano González Fernández  
Dr. Juan Carlos Pérez Darías

Grado en Física curso 2019 - 2020

# Índice

<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>Caso de estudio</b>	<b>6</b>
<b>Modelo WRF (Weather Research and Forecasting)</b>	<b>10</b>
<b>Metodología</b>	<b>12</b>
Análisis	12
Preparación del WRF	16
<b>Resultados</b>	<b>19</b>
Microfísica	19
Dominios	22
“Time Step”	24
Fecha y hora de inicio	25
<b>Discusiones</b>	<b>29</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>31</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>34</b>

# 1. Abstract

*The Canary Islands are characterized by having a mild and dry climate throughout the year, however, rainfall is more abundant than expected due to the relief of the islands. Furthermore, under specific meteorological circumstances, the orography of the islands produces an amplifying effect, causing severe local precipitation events. The importance of predicting these events is key for aeronautical navigation, agriculture, sports and, especially, the prevention of natural disasters. Specifically, this work will study the heavy rains that took place in Santa Cruz de Tenerife in 2002 and caused floods throughout the capital, losses worth millions of euros and the death of eight people. Furthermore, the AEMET was not able to predict the magnitude of these precipitations, so the population was not alerted.*

*Likewise, the AEMET carried out a subsequent study in which they tried to reproduce these precipitations by analyzing in depth the wind and pressure fields and the convective structures. In addition, they carried out some simulations modifying the resolution to try to improve the results. However, due to the complexity of the phenomenon and the scarcity of data, they did not succeed.*

*In this work, the same day will be analyzed with the WRF model to try to replicate these atmospheric conditions. For this, several simulations will be carried out using different parameters to determine which set of them provides results closest to the event that occurred on the island of Tenerife.*

## 2. Introducción

*Since ancient times, humanity has developed a great interest in predicting the weather due to the great utility that this supposes, both for agriculture and to anticipate adverse phenomena. Since then, the meteorology has evolved considerably and allows us to forecast the weather for the next few days or warn of the arrival of copious storms. Specifically, in this work the WRF (Weather Research and Forecasting) weather forecast model will be used to try to reproduce the torrential rains occurred in Santa Cruz de Tenerife on March 31, 2002.*

La Meteorología es la ciencia que estudia los fenómenos atmosféricos, las leyes que los gobiernan y las consecuencias que éstos puedan ocasionar. Este término proviene del científico y filósofo griego Aristóteles, más concretamente de su obra titulada Meteorologica, (340 a.C.) en la cual plasma sus conocimientos acerca de procesos que tienen lugar en la naturaleza como son: el ciclo del agua, granizo, lluvia, los cometas, etc. El vocablo meteorología deriva de las palabras del griego antiguo meteoron, el cual se refiere a objetos altos en el cielo, y logos, que significa estudio.

Esta disciplina ha sido de vital importancia en el pasado y lo sigue siendo actualmente en el mundo en el que vivimos, ya que no solo nos permite anticipar situaciones de alto riesgo para prevenir a la población, sino que también es de gran utilidad para la industria de las energías renovables, la agricultura o la pesca, entre otras muchas cosas. Si bien es cierto que las Islas Canarias gozan de un clima estable casi todo el año, con temperaturas suaves y escasas precipitaciones, sigue siendo algo fundamental el estudio meteorológico en este archipiélago. Además, la situación no es tan predecible como cabría esperar en un principio, dado que la localización geográfica en la que se encuentran las islas hace que su escarpado relieve montañoso interactúe constantemente con las masas de aire que alcanzan las islas. Cuando el efecto del relieve se une a condiciones sinópticas que favorecen la inestabilidad atmosférica, las lluvias pueden llegar a ser copiosas. Asimismo, como el tamaño de estas islas es relativamente pequeño, el estudio meteorológico de las mismas debe realizarse a una resolución muy alta.

En la actualidad existe un amplio número de herramientas que se pueden utilizar para estudiar y predecir el estado de la atmósfera, en nuestro caso nos hemos decantado por el modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) (University Corporation for Atmospheric Research, 2020), el cual se trata de un modelo numérico mesoescalar. El desarrollo de esta herramienta comenzó en los años 90 y en él tomaron parte distintas organizaciones americanas como el NCAR (Centro Nacional para la Investigación Atmosférica) o la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) entre otras. Como características principales, posee dos núcleos distintos para realizar las simulaciones, tiene además un sistema de asimilación de datos y permite introducir información actualizada sobre el terreno y su relieve. Esta última propiedad es de gran utilidad para este estudio ya que, como hemos dicho anteriormente, la morfología de las Islas Canarias es de vital importancia para encontrar una explicación a muchos de los fenómenos que se producen en las mismas.

Concretamente, el objetivo de este estudio es el de utilizar el software WRF para realizar un análisis de la riada ocasionada en Santa Cruz el 31 de marzo de 2002, en la que se registraron un total de 224 litros por metro cuadrado entre las 16:00 y las 18:30 de ese mismo día. Este suceso causó mayores daños de lo esperado, ya que la Agencia Estatal de Meteorología avisó únicamente de chubascos débiles y no fue capaz de predecir la magnitud de estas lluvias torrenciales. Como consecuencias de este temporal se produjo el fallecimiento de 8 personas, 250 viviendas quedaron afectadas y se ocasionaron pérdidas valoradas en unos 90 millones de euros. Es por ello por lo que es vital analizar en profundidad dicho evento con el fin de comprender su naturaleza y conseguir ser capaces de predecir los que ocurran en un futuro, para, de este modo, evitar una catástrofe de tal magnitud.

Por su lado, la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) ya realizó un estudio (Elizaga Rodríguez et al., 2003) bastante exhaustivo sobre este fenómeno en marzo de 2003. En él abordan el problema tanto a nivel sinóptico como mesoescalar, además de emplear herramientas como el radar de Canarias y simulaciones numéricas con distintos grados de resolución. Analizando el entorno próximo a Canarias a escala sinóptica llegan a la conclusión de que la inestabilidad que sufrían las islas durante ese periodo podría deberse a distintos factores que actuaron de manera conjunta, entre los que se encontraban: un jet-stream (máximo de viento relativo) a niveles altos sobre la isla de Tenerife, un embolsamiento frío en altura, una cizalladura de viento que llegaba hasta los 500 hPa, etc. Todo esto, agravado por el característico relieve de Anaga, contribuyó a la creación de un entorno que favoreció el desarrollo de las

estructuras convectivas que se formaron en torno a la capital tinerfeña. Dichas estructuras fueron las responsables de que se produjeran las lluvias torrenciales que afectaron a gran parte de la población de la ciudad.

Asimismo, a partir de su estudio a nivel mesoescalar, se induce que los principales responsables de este suceso fueron la aparición de una baja presión centrada al norte de la isla y la orografía propia del terreno, que en conjunto hicieron que la evolución del flujo en superficie provocara la aparición de actividad convectiva en la zona. Además, estas células convectivas tuvieron un efecto de retroalimentación que generó nuevas células, haciendo que toda esta actividad quedara altamente focalizada en la misma zona.

Por otro lado, la AEMET también llevó a cabo distintas simulaciones numéricas de la catástrofe con 0.2 y 0.1 grados de resolución horizontal, unos 22 y 11 km, respectivamente, con el fin de comprobar si al aumentar la resolución del modelo original, la cual es de 0.5 grados, eran capaces de mejorar las predicciones a las que se había llegado un año atrás. Para la realización de estos experimentos hicieron uso de HIRLAM (High Resolution Limited Area Model), un modelo numérico empleado, al igual que el WRF, para tratar de predecir los fenómenos que ocurrirán en la atmósfera y poder así anticiparse a ellos y reaccionar a tiempo. Este sistema ha sido desarrollado a través de un consorcio de su mismo nombre y al cual pertenecen los países escandinavos, Islandia, Estonia, Lituania, Holanda, Irlanda y España, este último interviene en los proyectos a través de la Agencia Estatal de Meteorología. Tras analizar los resultados de estas simulaciones encontraron que la más aproximada a lo sucedido originalmente fue una de las realizadas con resolución de 0.2 grados, aunque en ella se obtuvo un exceso de precipitación debido a que los datos iniciales usados provienen del modelo a 0.5 grados de resolución, lo cual obliga a hacer una interpolación de los datos. Si bien es cierto que el campo de viento que se consigue tiene un mayor detalle, dado que reproduce el terreno con mayor grado de minuciosidad, la AEMET asegura que un aumento en la resolución (por ejemplo: 0.1 grados) no mejora los resultados, al menos, si esto no se acompaña de un mayor número de observaciones en la que apoyarse para desarrollar el modelo.

### 3. Caso de estudio

*This section will analyze how the phenomenon that we are studying affected the population. During two and a half hours, more than 200 liters per square meter were collected and affected the metropolitan area of the northeast of Tenerife. It produced damages valued at several million euros and eight deaths.*

Como se ha mencionado anteriormente, el caso que se desea analizar es el fenómeno meteorológico que ocurrió en Santa Cruz de Tenerife el 31 de marzo de 2002, y que fue el causante de graves inundaciones que arrasaron la capital y dejaron a su paso numerosos daños. Según la Agencia Estatal de Meteorología, la cual no fue capaz de predecir la catástrofe, comunicó que se recogieron 204.1 litros por metro cuadrado durante las dos horas y media que duró la fase más intensa de la tormenta. Desde entonces, este día posee el récord de precipitaciones en una hora a nivel nacional: 162.7 L/m<sup>2</sup>.

Este aluvión concentrado produjo una gran cantidad de daños en la capital, lo cual quedó reflejado en los artículos de prensa de los días siguientes. Entre ellos cabe señalar las impresionantes imágenes de las portadas del 1 y 2 de abril del “Diario de Avisos”, en las cuales podemos ver como una de las calles quedó prácticamente destrozada y el estado lamentable en el que quedaron algunos edificios de la ciudad. Asimismo, “El Día” publicó la imagen de una guagua que quedó sumergida casi por completo en la riada, además se vieron tan afectados por el temporal que se vieron obligados a reducir el número de páginas ese día.

# Diario de Avisos

DECANO DE LA PRENSA DE CANARIAS

Santa Cruz de Tenerife, Lunes, 1 de mayo de 2002

## Drama sin precedentes

Una gran tromba de agua causa cuatro muertes en Santa Cruz y otro en La Laguna

La gran tromba de agua provocó grandes inundaciones en las calles y obligó a evacuar edificios, así como a habilitar el Recinto Ferial como refugio

Unos 30 personas han sido ingresadas en los hospitales, mientras un gran parte de la capital no había agua ni electricidad

**SANTA CRUZ.** Cuatro personas murieron por culpa de una gran tromba de agua que cayó durante la noche y obligó a evacuar edificios, así como a habilitar el Recinto Ferial como refugio. Unos 30 personas han sido ingresadas en los hospitales, mientras un gran parte de la capital no había agua ni electricidad.



**REACTIVACIÓN.** Después de 10 días de paralización en las zonas afectadas por la tormenta, se reanuda el suministro de agua y electricidad en la zona de Santa Cruz de Tenerife.

**FUTBOL.** El torneo continúa y los partidos de la categoría de fútbol se reanuda en la zona de Santa Cruz de Tenerife.

# Diario de Avisos

DECANO DE LA PRENSA DE CANARIAS

Santa Cruz de Tenerife, Martes, 2 de mayo de 2002

## Se busca a 10 desaparecidos

El 1-1-2 busca a varios campesinos y a vecinos de zonas de Anaga y San Andrés

El número oficial de víctimas se eleva a veinty tres desaparecidos, mientras un centenar de personas han resultado heridas

El Gobierno declara tres días de luto en Canarias y el ministro Lucas promete ayudas económicas para las familias afectadas

**SANTA CRUZ.** Las labores de búsqueda de personas que resultaron desaparecidas por culpa de la gran tromba de agua que cayó durante la noche en Santa Cruz de Tenerife y en La Laguna, se reanuda este martes. El 1-1-2 busca a varios campesinos y a vecinos de zonas de Anaga y San Andrés.



**REACTIVACIÓN.** Después de 10 días de paralización en las zonas afectadas por la tormenta, se reanuda el suministro de agua y electricidad en la zona de Santa Cruz de Tenerife.

**FUTBOL.** El torneo continúa y los partidos de la categoría de fútbol se reanuda en la zona de Santa Cruz de Tenerife.

Figura 1. Titulares de los días posteriores a la catástrofe. (Diario de Avisos, 2002; El Día, 2002).

El efecto que tuvo la tormenta sobre la población fue inconmensurable, debido en parte a que fue imposible predecirlo (Marzol Jaén, V., 2002). En primer lugar, como las estaciones de suministro eléctrico sufrieron graves inundaciones, se produjeron varios cortes de luz. Esto no solo afectó a los vecinos de la zona, sino que además impidió que el servicio de emergencias 112 pudiera realizar su trabajo correctamente. Además, las autopistas que conectan con la capital sufrieron retenciones durante varias horas y el suministro de agua potable también se vio afectado durante varios días.

En la capital se vieron afectadas unas 200 familias, que perdieron sus casas y tuvieron que ser desalojadas de las mismas, y un total de 1500 personas solicitaron ayudas para poder paliar los daños de sus propiedades. Por otro lado, en la calle colapsó el sistema de alcantarillado, haciendo que se desbordaran las aguas fecales y anegaran la vía. A causa de todos estos desperfectos, el Gobierno de Canarias valoró las pérdidas ocasionadas en unos 90 millones. Sin embargo, lo peor fue la muerte de 8 personas que incluían niños y personas mayores (Plasencia, M., 2012).



**Figura 2. Superior izq.:** coches arrastrados en una calle del centro de Santa Cruz. **Superior dcha.:** calle llena de escombros en el barrio de María Jiménez. **Inferior izq.:** limpieza de escombros en San Andrés. **Inferior dcha.:** reparación del cauce del barranco en María Jiménez. (Toledo, 2017).

En los días posteriores comenzaron a realizarse las labores de emergencia y limpieza que se extendieron durante semanas. Sobre todo, el esfuerzo se concentró en la limpieza de los cauces de los barrancos, los cuales habían acumulado una gran cantidad de desechos, por miedo a que se produjeran de nuevo unas lluvias tan intensas que hicieran que se desbordaran. Por supuesto, los vecinos de cada barrio se sumaron a la limpieza de las calles, retirando escombros, lodo y muebles destrozados por el agua.

A pesar de parecer un hecho aislado, la ciudad ha sufrido temporales varias veces a lo largo de los años, como la riada provocada por un ciclón tropical el 2 de febrero de 2010 que dejó la ciudad anegada tras descargar  $200 \text{ L/m}^2$ , lo cual la dejó en una situación bastante parecida a la del caso de estudio. Otro fenómeno que dejó huella en la capital fue el ocurrido en la Navidad de 1999 (Arranz Lozano, M., 2006), ya que durante una semana se produjeron intensas lluvias que produjeron cortes de

electricidad y daños por valor de 5 millones de euros, o también el temporal de mayo de 1944 que dejó la ciudad inundada y tres víctimas mortales.

Por todo lo anterior se hace patente la necesidad de estudiar el fenómeno de 2002, que no solo causó cuantiosas pérdidas materiales por valor de varios millones de euros, sino que también provocó la muerte de 8 personas. Además, la AEMET no fue capaz de anticiparse a las circunstancias, lo que nos hace pensar que la situación podría haberse evitado si la población hubiera sido alertada a tiempo. Por lo tanto, comprender las condiciones de ese día e intentar replicar los resultados es una prioridad que nos ayudaría a anticiparnos a estos temporales y, por lo tanto, mantener a salvo a los habitantes.

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

*The WRF model was created in the 1990s and is currently used by many researchers around the world. This system analyzes the phenomena that happen at the mesoscale level and is made up of two cores, ARW and NMM, which focus on carrying out specific tasks.*

El modelo WRF es un modelo numérico mesoescalar, lo que quiere decir que se dedica a la predicción de fenómenos cuyas superficies de acción se encuentran dentro de la mesoescala (entre los 2 y los 1000 km). Para conseguir esto lo que hace el software es dividir la zona de estudio en una cuadrícula y resolver numéricamente las ecuaciones que modelizan la atmósfera en cada una de ellas, obteniendo como resultado su estado en un instante posterior. Luego se repite esta tarea para conseguir averiguar cuáles serán las condiciones meteorológicas en la fecha y hora deseadas. Sin embargo, esta tarea es sumamente compleja debido a que, como sistema dinámico determinista, la atmósfera es tremendamente sensible a las condiciones iniciales, lo que lo convierte en un sistema caótico. Esto quiere decir que, partiendo de dos estados iniciales muy parecidos, la situación final a la que llega cada uno después de un tiempo arbitrario puede ser totalmente distinta.

Este sistema cuenta con dos núcleos dinámicos, el ARW (Advanced Research WRF) y el NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). El NCAR (National Center for Atmospheric) se encarga del desarrollo y el mantenimiento del primero, mientras que la NCEP (National Centers for Environmental Prediction) se ocupa del segundo. Esto permite al WRF desarrollar tareas como la investigación de la física de la atmósfera y su parametrización, la predicción meteorológica numérica en tiempo real o la elaboración de simulaciones a ultra-alta resolución entre otros. Además, también nos permite llevar a cabo análisis de pronóstico retrospectivo, lo cual resulta de gran utilidad para este estudio.

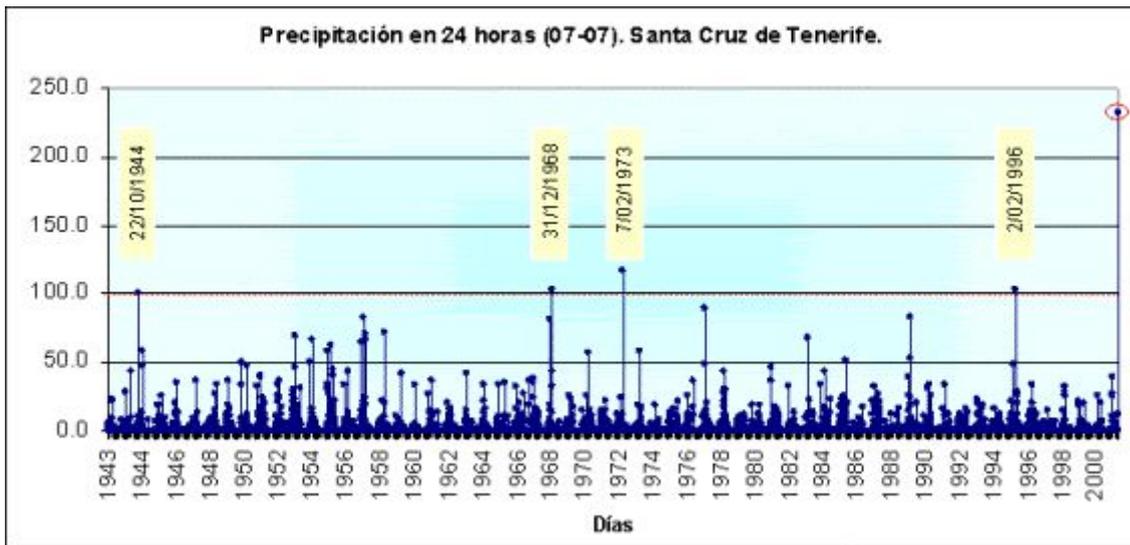
Asimismo, este modelo supone una clara ventaja sobre los demás cuando se utiliza sobre zonas de especial relieve topográfico y condiciones atmosféricas extremas, ya que tiene en consideración los efectos que la superficie terrestre puede producir sobre los fenómenos meteorológicos de dicha zona. Gracias a esta gran versatilidad y su propuesta de código abierto, su uso se ha extendido a más de 150 países y 25.000 usuarios que ayudan en su desarrollo mediante sus contribuciones (Powers, J., 2014).

## 5. Metodología

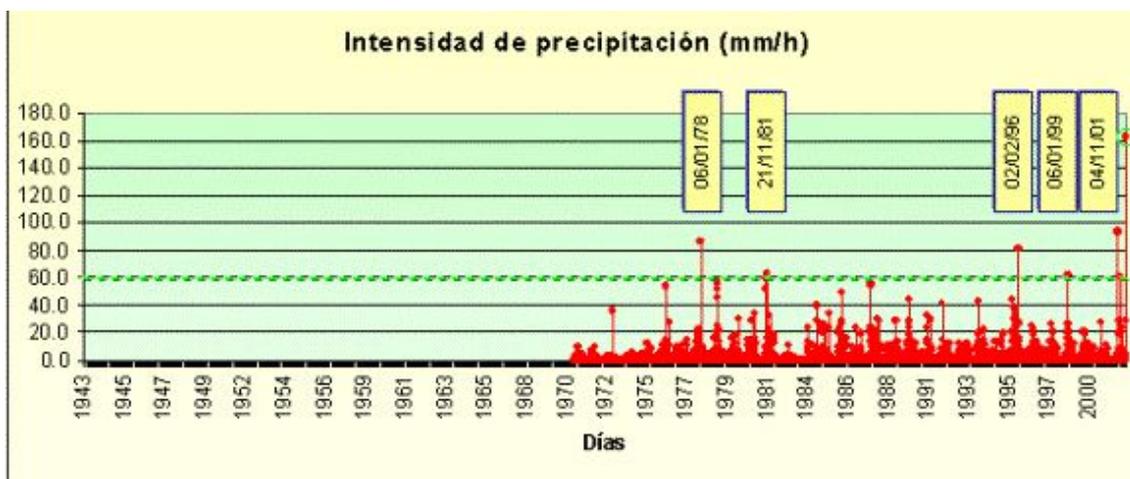
*Despite the fact that the climate of the Canary Islands is stable, in 2002 a very intense and unpredictable phenomenon occurred in the capital of Tenerife. In two and a half hours, 204.1 mm of water fell and the rainfall record since 1943 was broken. To try to replicate what happened, the WRF is configured using its preprocessing tools (geogrid, ungrib, metgrid and real) and several simulations are carried out with different configurations to find out which provides the closest results to the observations, using analysis data from that days as input and boundary conditions.*

### 5.1. Análisis

Si bien es cierto que las lluvias en Canarias se producen de manera irregular, el hecho que sucedió en marzo de 2002 fue algo excepcional. Entre las 07:00 UTC del 31 de marzo y las 07:00 UTC del 1 de abril, se recogieron 232.6 mm, de los cuales 204.1 se registraron en apenas 2 horas y media, superando la media anual que, por ese entonces, se encontraba en 214 mm. Además, la magnitud de las precipitaciones alcanzó un valor máximo de 162.7 mm/h a las 17:00 (Elizaga Rodríguez et al., 2003). Esto lo convirtió en el fenómeno de precipitación más importante ocurrido en Santa Cruz de Tenerife, tanto por la cantidad de agua recogida en 24 horas (Figura 3), como por intensidad en 1 hora (Figura 4).

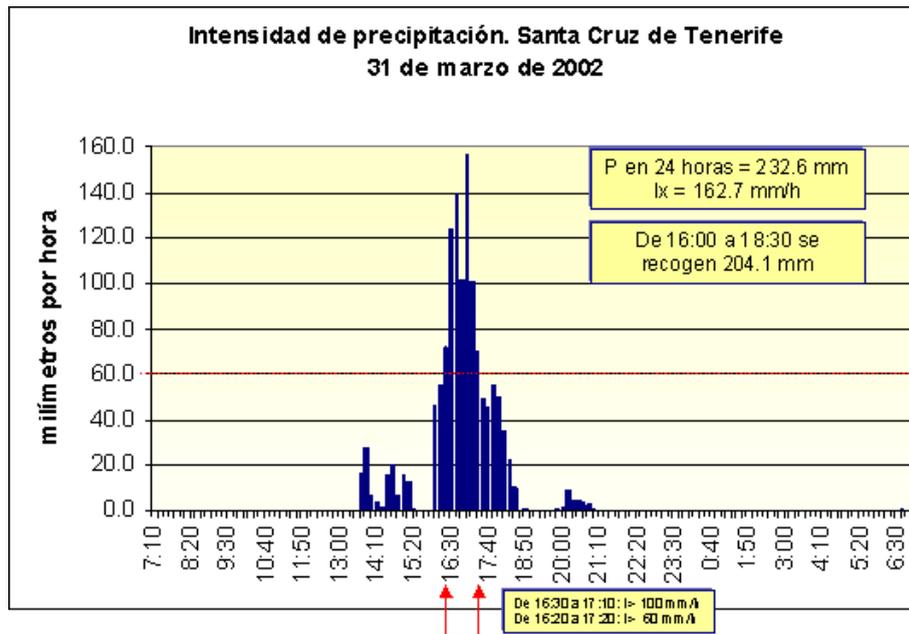


**Figura 3.** Precipitaciones durante 24 horas en Santa Cruz de Tenerife, desde 1943 hasta la fecha en cuestión. (Elizaga Rodríguez et al., 2003).



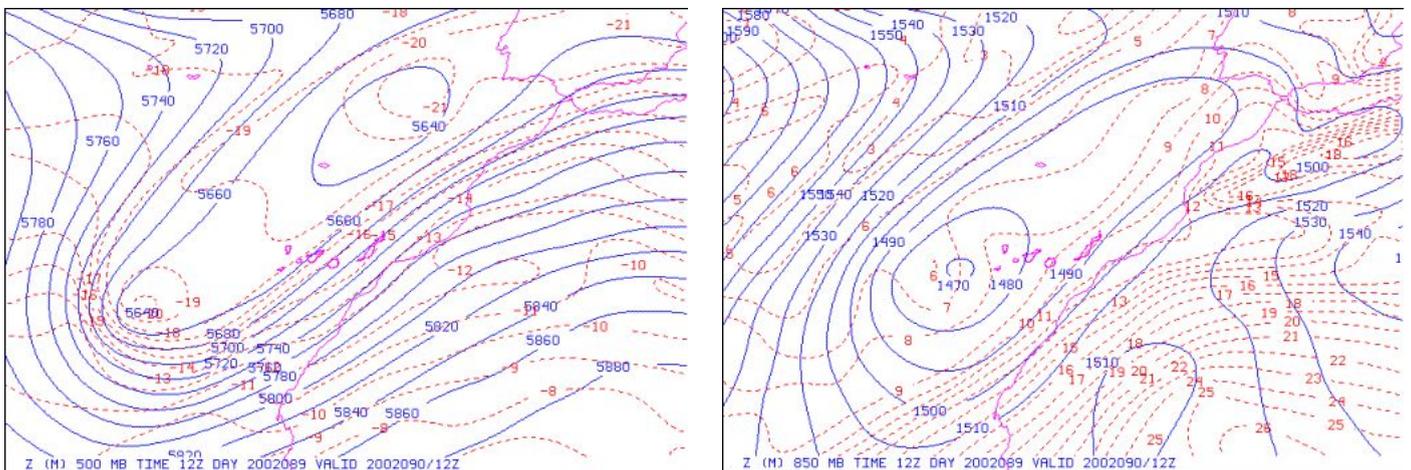
**Figura 4.** Máximos de precipitaciones por hora en Santa Cruz de Tenerife, desde 1970 hasta la fecha en cuestión. (Elizaga Rodríguez et al., 2003).

El 31 de marzo a las 13:40 (UTC) comienza a llover sobre la ciudad de manera moderada, pero según avanza la tarde las lluvias empiezan a intensificarse, tal y como se puede observar en la siguiente imagen. Tanto es así, que desde las 16:20 a las 17:20 UTC el ratio de precipitaciones supera los 60 mm/h, y entre las 16:10 y 17:10 UTC, los 100 mm/h. A partir de las 17:30 UTC el evento pierde intensidad, pero continúa siendo importante hasta las 18:10 UTC.



**Figura 5.** Evolución del fenómeno meteorológico de Santa Cruz de Tenerife el 31 de marzo de 2002. (Elizaga Rodríguez et al., 2003).

En lo que respecta a las presiones de la zona, a un nivel de 500 hPa (equivalente a unos 5500 m) (Figura 6 izq.), se puede observar una DANA (depresión aislada en niveles altos) muy alargada con dos núcleos. Uno de ellos situado al suroeste del archipiélago canario y el otro al noreste, sobre Madeira. La temperatura mínima del primero es de  $-20^{\circ}\text{C}$  y la del segundo de  $-21^{\circ}\text{C}$ , mientras que la de Tenerife, a esta altitud, ronda los  $-18^{\circ}\text{C}$ . Este hecho es fundamental para comprender la inestabilidad a la que estaba sometida la isla.



**Figura 6.** Izquierda: mapa de presiones sobre las islas a 500 hPa. Derecha: mapa de presiones sobre las islas a 800 hPa. (Elizaga Rodríguez et al., 2003).

A una altura de 850 hPa ( aproximadamente 1500 m) (figura 6 dcha.) nos encontramos con una borrasca (zona de bajas presiones) localizada al oeste del archipiélago. Asimismo, también cabe destacar la diferencia de temperatura existente entre África y el océano, lo que hace que las masas de aire que se sitúan al este y sureste de las islas sean mucho más cálidas y secas que las del oeste y suroeste.

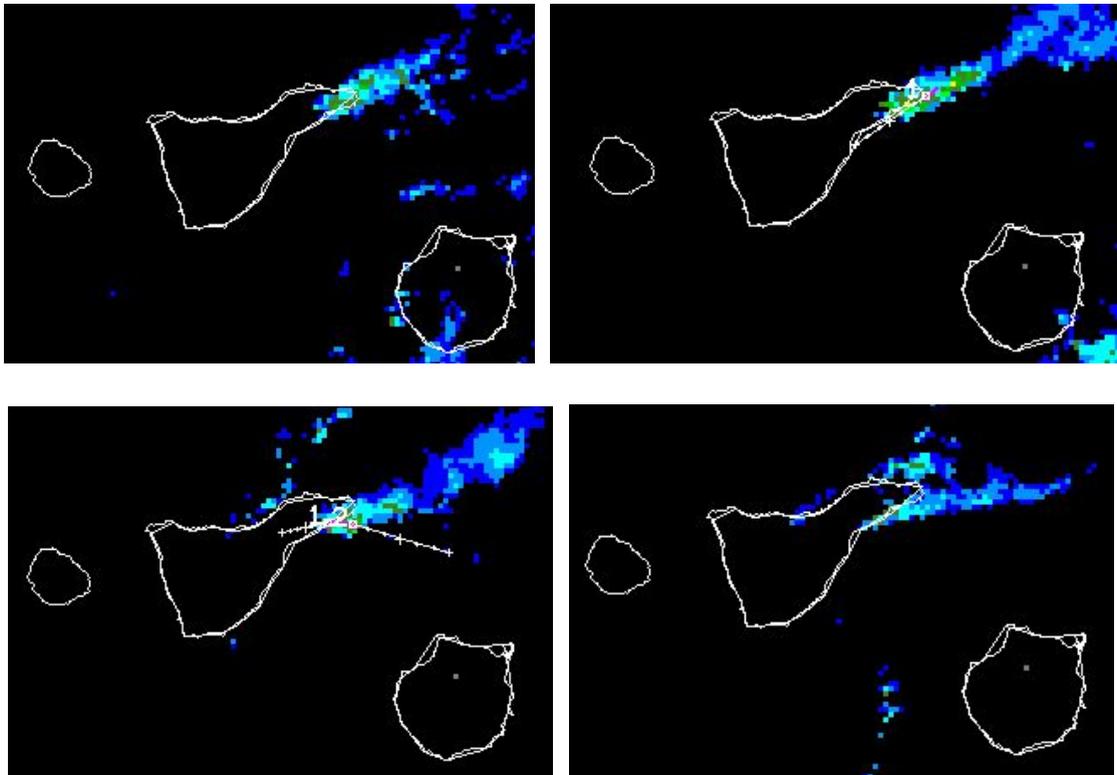
Por otro lado, la inestabilidad producida en el perfil vertical, el campo de vientos y el relieve de la isla, ayudaron a generar y mantener zonas de convergencia que fueron las causantes de los desarrollos convectivos en el extremo oriental de la isla.

El elemento iniciador que liberó toda la inestabilidad atmosférica y fue el precursor de las precipitaciones que cayeron sobre la isla fue una corriente de aire estrecha muy fuerte y localizada en las capas altas de la atmósfera (jet stream). Por el contrario, la disipación del temporal se debió al giro de los vientos del SW al W y luego al NW, lo cual hizo que los fenómenos convectivos desaparecieran y remitieran las lluvias.

Analizando las imágenes obtenidas mediante el radar (Figura 7) situado en la isla de Gran Canaria se aprecia cómo estas estructuras convectivas, causantes de las imponentes precipitaciones, permanecen cuasiestacionarias y ancladas sobre la zona de estudio. Este comportamiento destaca por lo anómalo, ya que debido al flujo existente estas estructuras deberían haber continuado con su evolución hacia el mar, lo que hace indicar que el fenómeno se haya debido a una combinación de inestabilidad atmosférica y efectos locales.

En la figura 7 se puede ver la evolución cronológica de las estructuras convectivas. En ellas se puede observar cómo, antes de comenzar el periodo de máxima actividad (15:00 UTC), las estructuras se sitúan en la zona que ocuparían durante el tiempo que duraron las precipitaciones. También se ve como aumenta la reflectividad desde los 40-45 dBZ hasta los 56 dBZ (16:00 UTC), lo que es un indicativo del aumento de intensidad de las precipitaciones en ese área. Como se puede ver en la figura 7 (inferior derecha), a partir de las 18:00 UTC las estructuras

convectivas comienzan a disiparse y la actividad disminuye considerablemente (Elizaga Rodríguez et al., 2003).



**Figura 7.** Imágenes del fenómeno tomadas desde el radar de Gran Canaria. **Sup. izq.:** 15:00 UTC. **Sup. dcha.:** 16:00 UTC. **Inf. izq.:** 17:00 UTC. **Inf. dcha.:** 18:00 UTC (Elizaga Rodríguez et al., 2003).

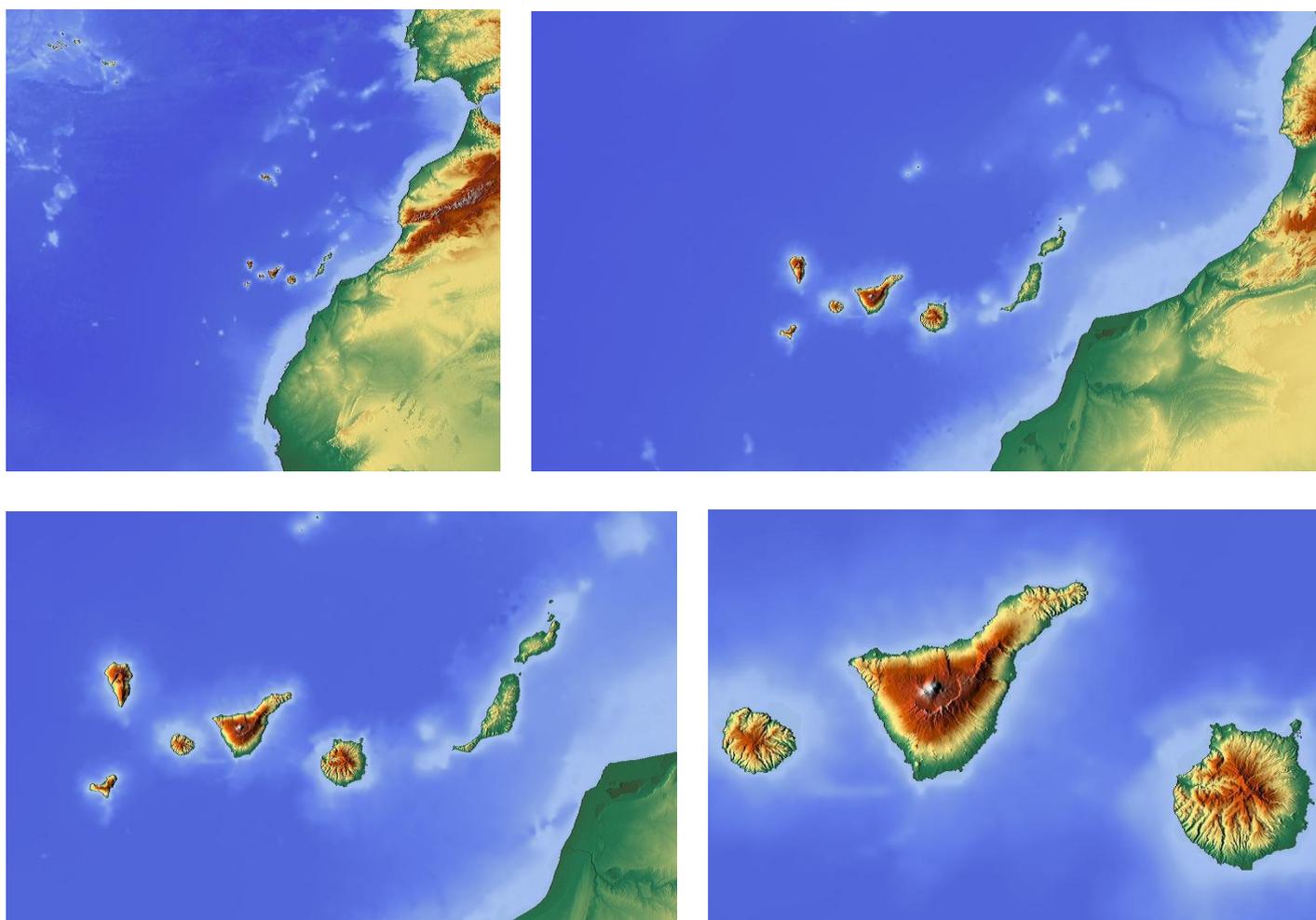
## 5.2. Preparación del WRF

En primer lugar, antes de ejecutar el modelo WRF, es necesario hacer un pre-procesamiento mediante un paquete de tres programas llamado WPS (WRF Preprocessing System):

- Geogrid: su propósito es definir los dominios de simulación e interpolar datos del terreno: altura, tipo de suelo, vegetación, etc.
- Ungrib: extrae los campos meteorológicos de los archivos .grib que servirán como condiciones iniciales y de contorno para el dominio de simulación.

- Metgrid: interpola horizontalmente los campos meteorológicos extraídos por ungrid a las cuadrículas generadas por geogrid.

De este modo, empleando geogrid, se definieron los dominios escogidos para llevar a cabo las simulaciones. En la siguiente imagen se pueden observar los cuatro dominios anidados que se utilizaron. Cuanto menor sea el dominio mayores son la resolución espacial y temporal, es decir, hay un mayor número de celdas en las que resolver las ecuaciones de Navier Stokes y además se resuelven cada menos tiempo. La relación de resolución espacial y temporal entre dominios anidados es 1/3, como se sugiere en la documentación de WRF. Las resoluciones espaciales son 27, 9, 3 y 1 km, respectivamente.

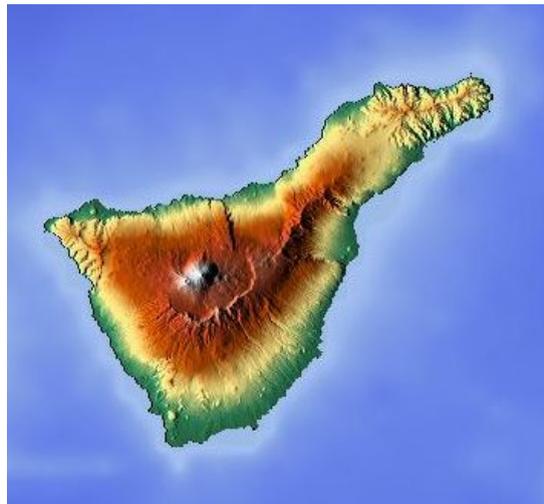


**Figura 8.** Esquema de los dominios anidados que se han utilizado en las simulaciones. **Superior izq.:** Dominio 1. **Superior dcha.:** Dominio 2. **Inferior izq.:** Dominio 3. **Inferior dcha.:** Dominio 4.

Utilizando estos dominios se realizaron varias simulaciones cambiando la parametrización de la microfísica que utilizaba el modelo para determinar cuál de ellas se adaptaba mejor al problema. Esta parametrización modeliza la formación y evolución de los diferentes hidrometeoros dadas las condiciones termodinámicas de la celda correspondiente de la rejilla. Las escogidas fueron las siguientes:

- Esquema Thompson
- Esquema WDM5
- Esquema WDM6

Posteriormente se definió un dominio extra más pequeño centrado en la isla de Tenerife. En este dominio las resoluciones espacial (333 m) y temporal son mayores, por lo que se ganaría precisión en la resolución del problema. Sin embargo, el tiempo de computación también aumenta significativamente.



**Figura 9.** Dominio 5 de la simulación.

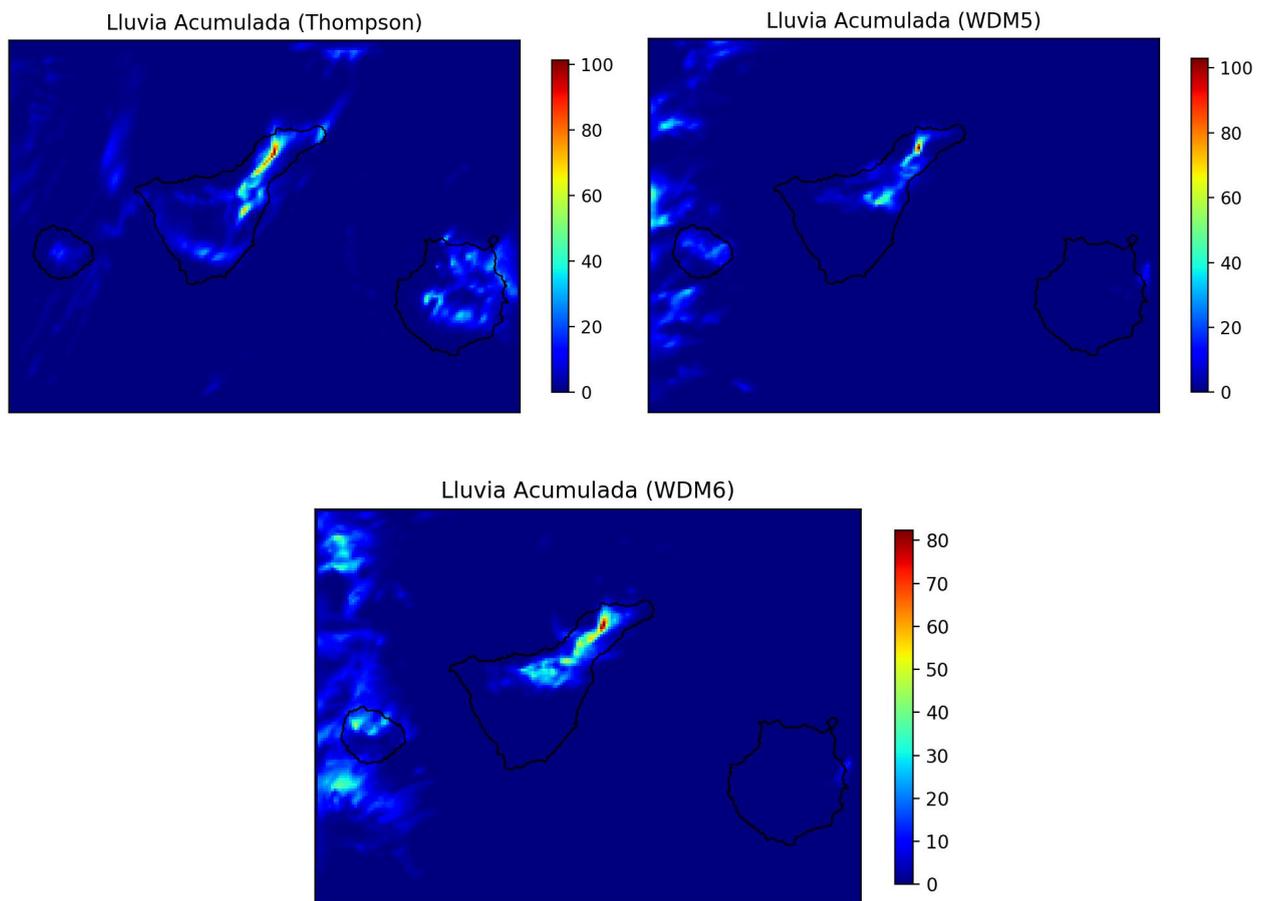
Asimismo, también se realizaron pruebas disminuyendo el “time step” de la simulación, lo cual acorta el lapso de tiempo entre una resolución y la siguiente. Por último se modificó la hora de inicio de la simulación para comprobar si este factor afectaba apreciablemente al resultado.

## 6. Resultados

*This section shows the results obtained when carrying out the different simulations discussed above. These have been classified in three groups according to the parameterization of the microphysics, the number of domains, the time step and the starting time of the simulation.*

### 6.1. Microfísica

A continuación (figura 10) se presentan los resultados de las simulaciones cuya única diferencia es la parametrización de la microfísica, la cual se encarga de definir el comportamiento de los procesos, relacionados con los hidrometeoros, que tienen lugar a muy pequeña escala en la atmósfera. Para este experimento se han escogido tres modelos distintos: Thompson, WDM5 y WDM6. En dichas imágenes se muestra la cantidad de lluvia acumulada durante todo el proceso, comenzando a las 00:00 del 30 de marzo y finalizando a las 23:59 del 31. De esta manera, al iniciar la simulación con tanta antelación, permitimos que las variables atmosféricas se establezcan y alcancen un equilibrio físico. A este periodo se le conoce como “spin-up” y para este tipo de variables suele ser de unas pocas horas. Durante estas 48 horas de simulación, se resuelven las ecuaciones cada 5 s (en el cuarto dominio) en cada una de las celdas definidas en el pre-procesamiento.



**Figura 10.** Resultados de distintas simulaciones al cambiar la microfísica.

Como se puede apreciar, las tres imágenes muestran precipitaciones abundantes en el noreste de la isla, tal y como cabría esperar. Sin embargo, el resultado de la microfísica WDM5 muestra una zona de actividad pluviométrica pequeña, en comparación con las otras dos.

Asimismo, las microfísicas de Thompson y WDM6 tienen un aspecto similar y abarcan una mayor superficie, lo cual se asemeja, en parte, con el fenómeno sucedido en 2002. No obstante, las estructuras convectivas que dieron paso a las lluvias torrenciales se centraron y anclaron más hacia el Este, provocando que toda la actividad se concentrase sobre la zona metropolitana de Santa Cruz.

En la figura 11 se representa la gráfica comparativa de los tres métodos para analizar el efecto en función del tiempo, representando la lluvia acumulada en un píxel centrado en la región de estudio (Santa Cruz de Tenerife). El instante inicial de esta

gráfica hace referencia a las 00:00 del 30 de marzo, es decir, un día antes del fenómeno de estudio.

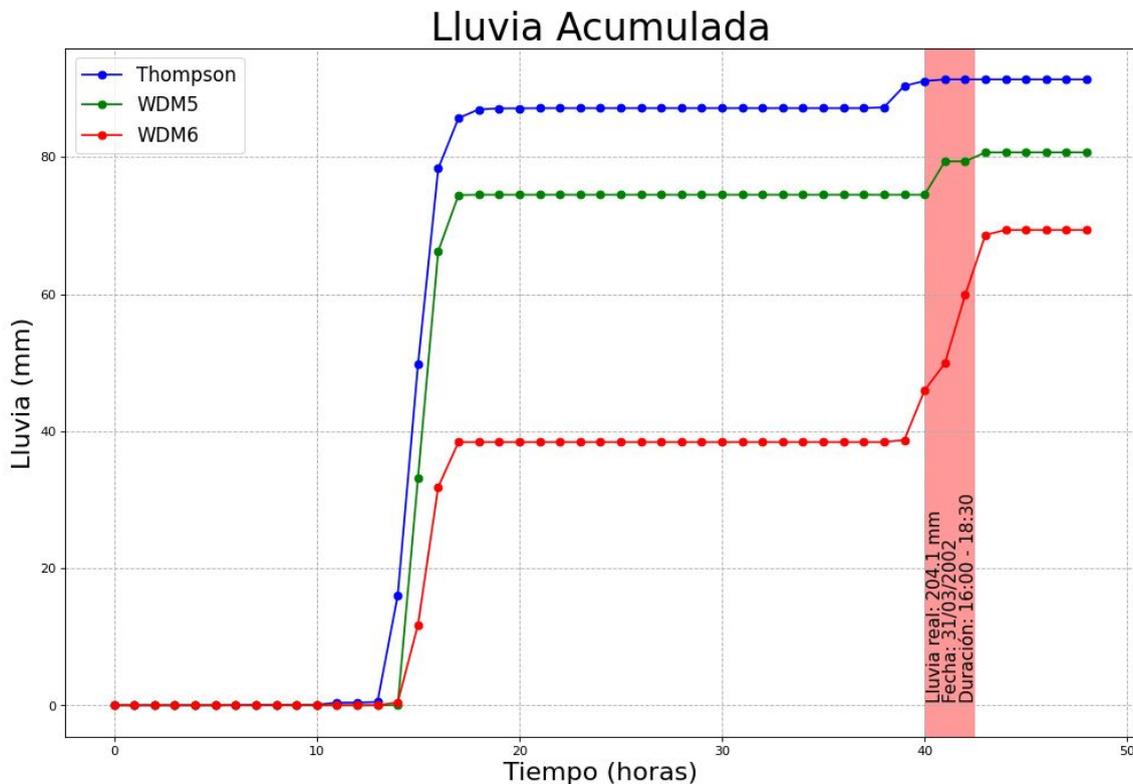


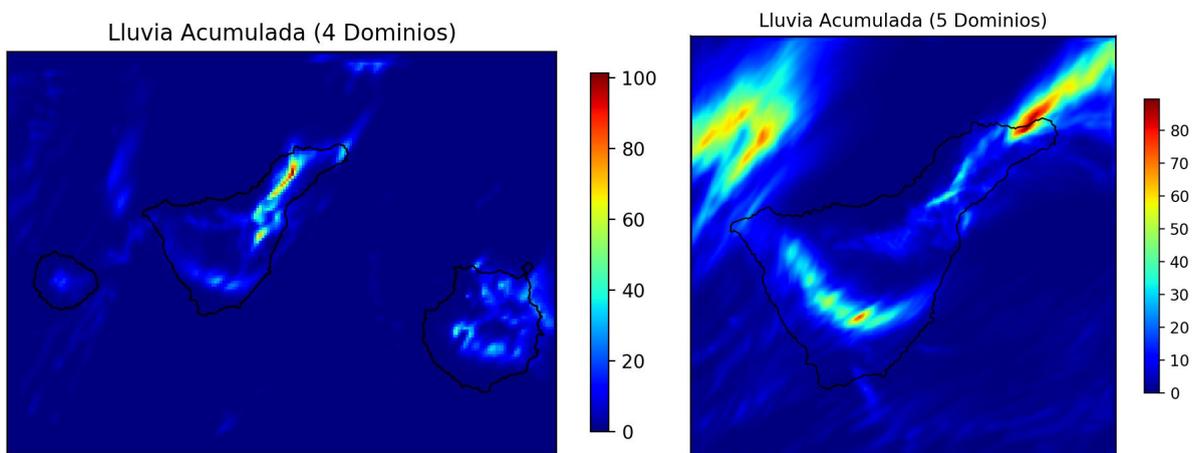
Figura 11. Evolución temporal de las precipitaciones expuestas en la figura 10.

En esta gráfica se puede ver cómo, a pesar de que la microfísica de Thompson y la WDM6 tienen ciertas similitudes espaciales, no coinciden en la cantidad de lluvia máxima que generan, ni en los periodos en los que esta se produce. En concreto, en la primera llueve durante cuatro horas (13:00 - 17:00) el día 30 hasta un máximo que alcanza los 90 mm, mientras que la segunda divide sus lluvias entre el 30 y el 31 y no llega a los 70 mm. En cuanto a la microfísica WDM5, no se observan grandes diferencias respecto a la parametrización de Thompson.

Cabe destacar que ninguna de estas parametrizaciones es capaz de reproducir las condiciones reales que se produjeron en 2002, las cuales se recalcan en la banda roja vertical que abarca desde las 16:00 hasta las 18:30 del 31 de marzo, superando en ese plazo los 200 litros por metro cuadrado.

## 6.2. Dominios

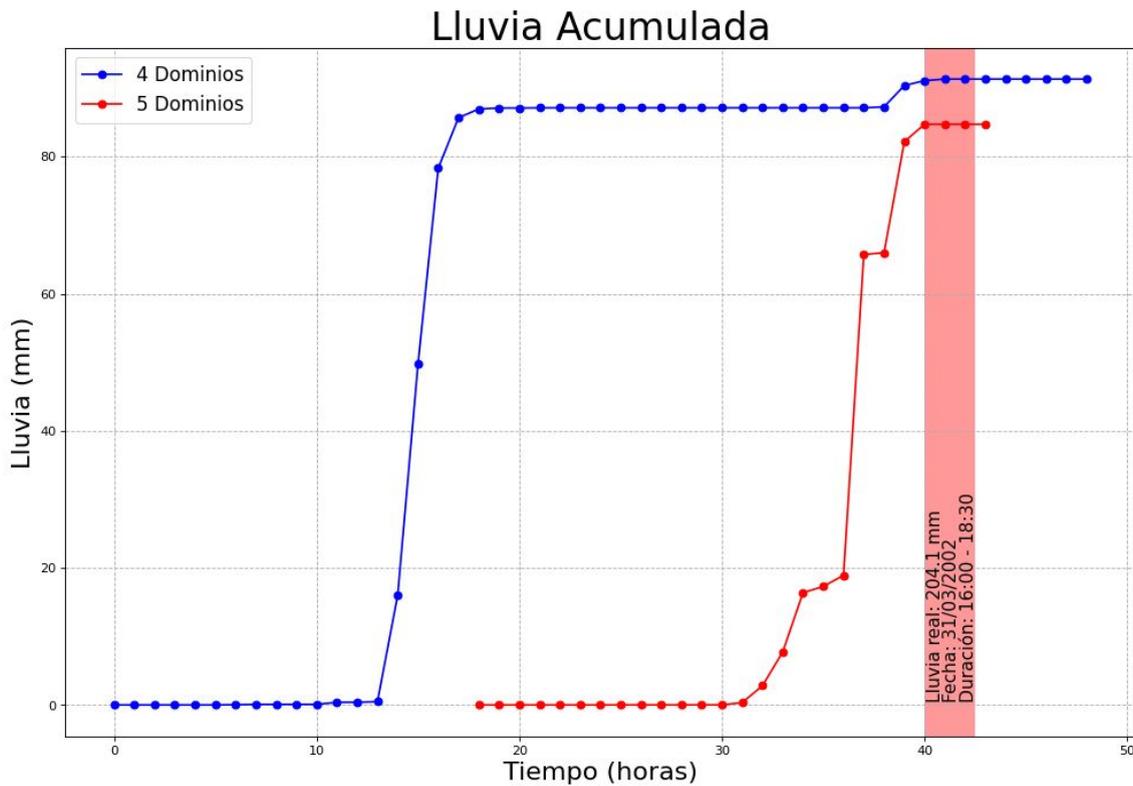
En la figura 12 se comparan las lluvias obtenidas por el modelo utilizando cuatro y cinco dominios respectivamente. Ambas se han realizado empleando la misma parametrización microfísica, Thompson, a fin de eliminarlo como factor variable.



**Figura 12.** Comparación entre las simulaciones de 4 y 5 dominios.

En este experimento, al definir un dominio extra centrado sobre la isla con mejores resoluciones espaciales y temporales, el centroide del fenómeno meteorológico se desplaza al NE, dejando una cola en la misma dirección, similar a la que se encuentra en las imágenes radar obtenidas por la AEMET al realizar su estudio. Asimismo, se observan dos áreas adicionales en las que se producen lluvias notables, sin llegar a ser tan abundantes, que no aparecen en la de 4 dominios.

En la gráfica de la figura 13 se representa la acumulación de la lluvia de ambas simulaciones por cada hora. Con motivo de minimizar el coste computacional la simulación que posee cinco dominios se inició a las 18:00 del 30 de marzo.



**Figura 13.** Evolución temporal de las precipitaciones expuestas en la figura 12.

En primer lugar, cabe destacar la similitud que existe entre ambos resultados en cuanto a la cantidad de agua recogida en 48 horas, aunque se produce en dos instantes distintos. La simulación llevada a cabo usando cuatro dominios, como se comentó anteriormente, tiene su máximo de actividad durante la tarde del 30 de marzo, mientras que la de 5, lo tiene durante el mediodía del día siguiente. Esto se debe, principalmente, a que la segunda inició sus cálculos a las 18:00 del día 30. El motivo de escoger esta hora posterior es el de disminuir el coste y tiempo de computación, dado que añadir un quinto dominio requiere una cantidad de cálculos mucho mayor.

No obstante, al igual que sucede con el experimento anterior, ninguna de esta selección de dominios anidados contribuye a reproducir las condiciones deseadas que se destacan en la franja roja.

### 6.3. “Time Step”

En este caso se exponen los resultados que se han extraído al modificar únicamente el “time step” de la simulación (figura 14). Al igual que en el caso anterior, se ha mantenido la microfísica Thompson. Se modifica el paso de 135 s a 54 s para el dominio exterior. En el dominio 4, el representado en la figura, se pasaría de un “time step” de 5 s, a resolver todas las ecuaciones cada 2 s.

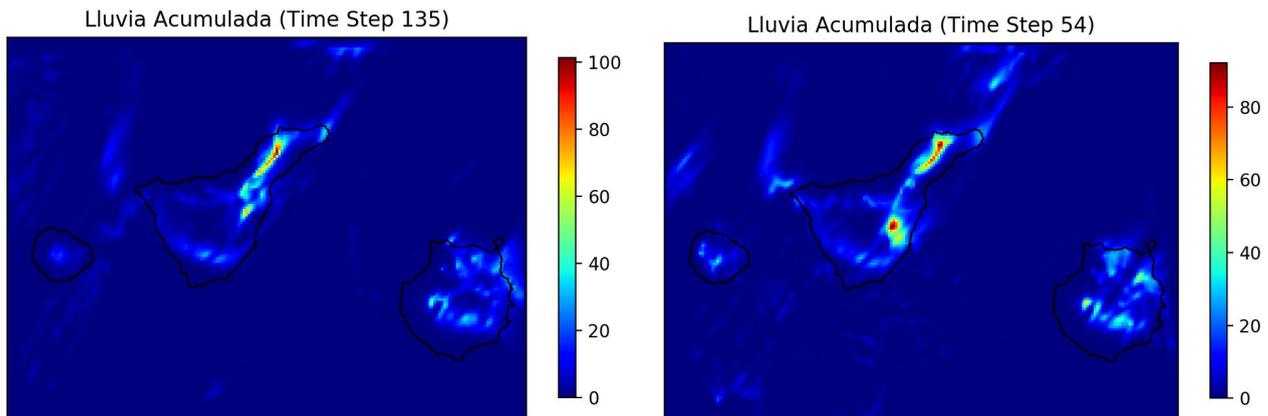
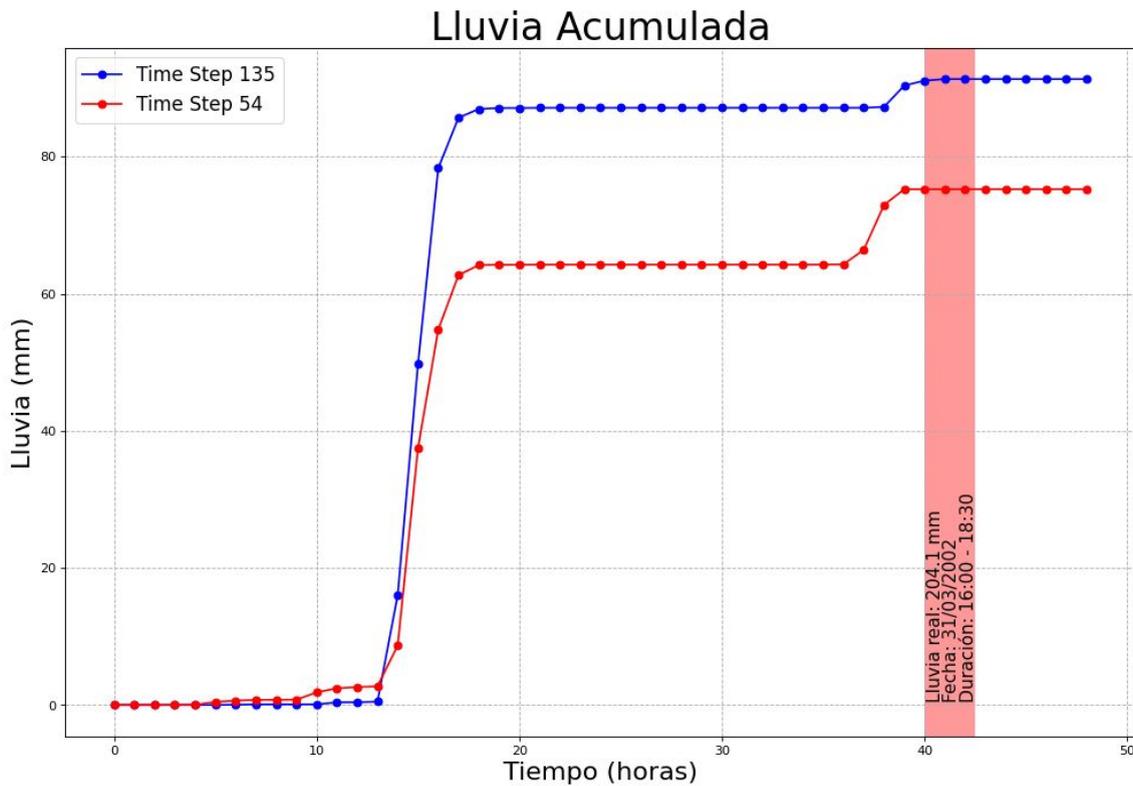


Figura 14. Resultados de las simulaciones al modificar el “time step”.

Esta vez, al modificar el “time step”, nos encontramos con que el fenómeno afecta a la misma zona de la isla, si bien es cierto que aparece otra inestabilidad localizada más al sur. Sin embargo, esta nueva zona carece de interés para el estudio, ya que se aleja demasiado de la capital tinerfeña.

A continuación, se presentan los resultados de lluvia acumulada hora tras hora para ambos casos.



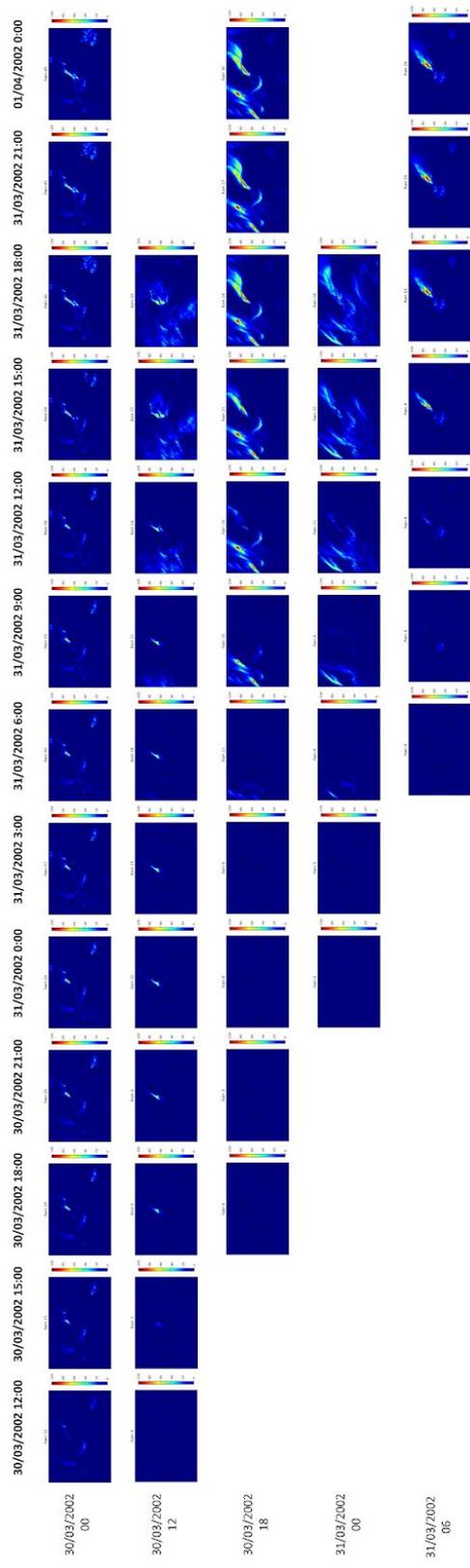
**Figura 15.** Evolución temporal de las precipitaciones expuestas en la figura 14.

Es obvio que, en lo que respecta a la gráfica de la figura 15, ambos experimentos son semejantes. No solo porque la cantidad de agua que aparece en los dos es similar, sino porque además su actividad se desarrolla en el mismo plazo de tiempo.

## 6.4. Fecha y hora de inicio

En este caso se han elaborado dos “collages” en los que se representan la lluvia acumulada y la medida cada tres horas respectivamente para las distintas simulaciones. Cada una de ellas inicia sus cálculos en un instante distinto, pero todas mantienen la microfísica de Thompson.

### Lluvia acumulada



### Lluvia cada 3 horas

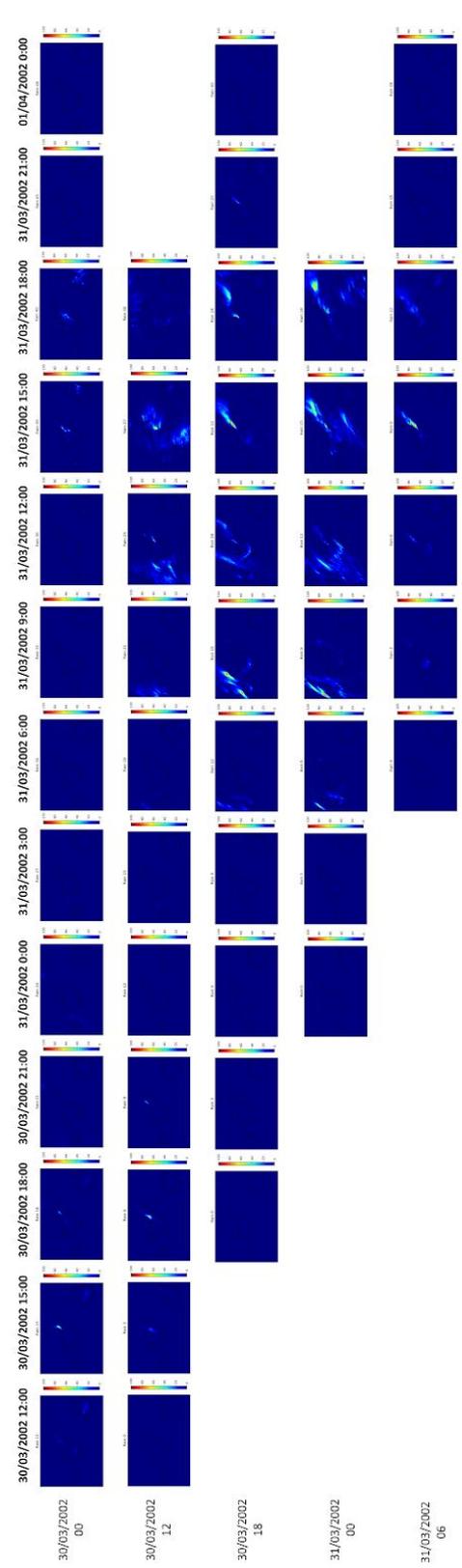


Figura 16. Collage (en formato vertical) elaborado con simulaciones que se inician en instantes diferentes. **Izquierda:** Lluvia acumulada. **Derecha:** Lluvia cada tres horas.

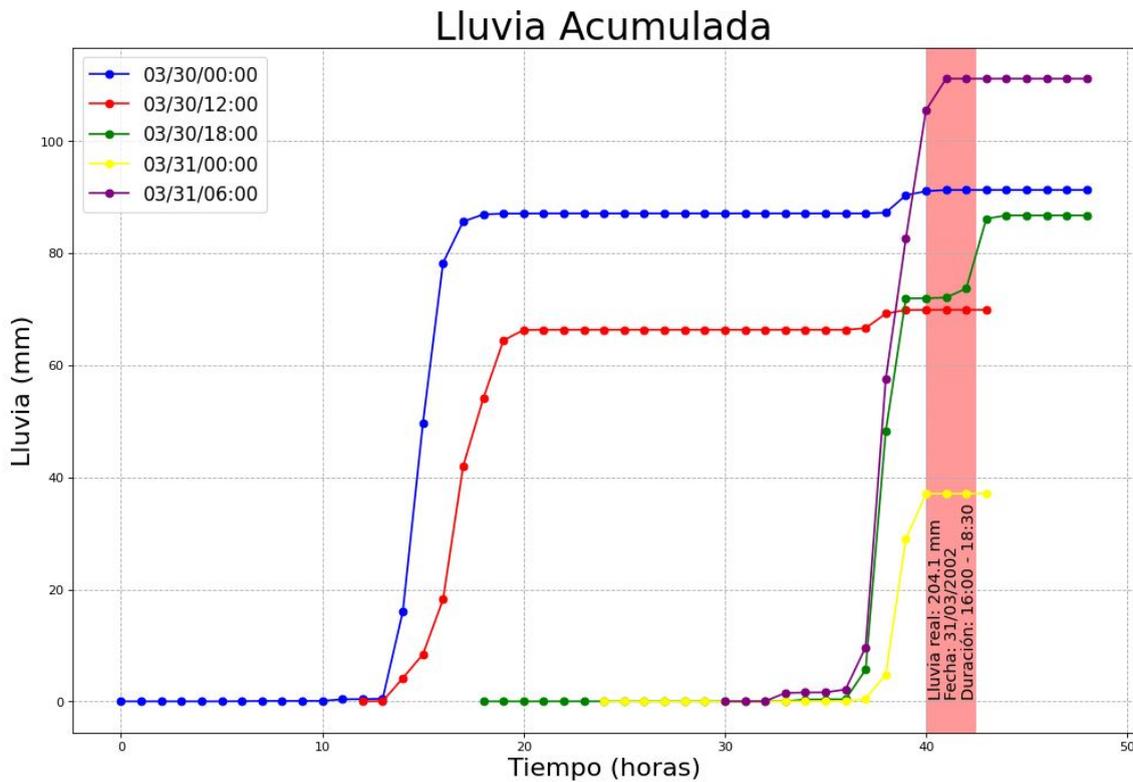
Debido al tamaño de las imágenes no es posible visualizarlas correctamente en este documento. Para una mejor visualización se puede acudir a los siguientes enlaces:

- [Lluvia Acumulada.png](#)
- [Lluvia cada 3 horas.png](#)

En esta ocasión, las estructuras finales que se forman son bastante distintas entre sí. Por ejemplo, la segunda y la cuarta son las que más se diferencian del resto y de la situación real. En concreto, en la simulación que se inicia a las 12:00 del día 30 el máximo de precipitaciones se ve desplazado hacia el Oeste, mientras que en la que comienza a las 00:00 del 31 no se aprecia ningún máximo relativo en torno al área metropolitana de la capital.

Por otro lado, si se comparan el resto de resultados se puede observar como sus precipitaciones se distribuyen en una franja que va de SO a NE, próxima a Santa Cruz. De estas tres, las que tienen un mayor parecido con la realidad, son la que inicia a las 18:00/30 y la que lo hace a las 6:00/31, si bien es cierto que esta última presenta una cola más alargada y distintos puntos en medio del océano en los que se producen precipitaciones importantes.

Finalmente, en la gráfica de la figura 17, como en el resto de apartados, se muestra la lluvia acumulada por hora de cada una de las simulaciones.



**Figura 17:** Evolución temporal de las precipitaciones expuestas en la figura 16.

En la figura se pueden ver claramente dos franjas temporales en las que se concentra la intensidad de las precipitaciones. La primera, entre las 13:00 y las 17:00 del 30/03, donde se concentran las lluvias de las primeras simulaciones y la segunda, entre las 12:00 y las 16:00 del 31/03, en la que se encuentra la mayor intensidad del resto.

Sin embargo, tal como se puede ver en la franja que representa el “caso” real, ninguna es capaz de reproducir el fenómeno, ni por intervalo de tiempo ni por cantidad de agua acumulada. Concretamente, el caso que más se parece a lo acontecido es el que comienza a las 6 de la mañana del día 31. Aún así, en este se puede ver como la cantidad de agua producida es aproximadamente la mitad de lo que llovió en Santa Cruz en 2002 y se simula 4 horas antes de lo debido.

## 7. Discusiones

*As can be seen in the previous sections, the results obtained cannot correctly reproduce the real meteorological conditions, since these simulations are not capable of simulating the time and the total amount of rain.*

Como se mostró en el apartado anterior, se han realizado varios experimentos para determinar cuál es la mejor configuración que reproduzca más fielmente las circunstancias extraordinarias que sucedieron. En cada prueba se desechan las parametrizaciones que más difieren del caso real y se continúa, al siguiente experimento, con la que tenga una mayor similitud.

En base a esto, a partir de los tres primeros pasos, se fijaron la microfísica, la cantidad de dominios óptima y el “*time step*”, que son parámetros que pueden modificar el resultado significativamente. La conclusión a la que se llega es que, entre las posibilidades estudiadas, la combinación de parámetros que mejor reproducen las condiciones observadas es usar la parametrización de Thompson para la microfísica, 4 dominios para realizar las simulaciones y un valor del “*time step*” de 135 segundos (un poco por debajo del valor máximo sugerido en los manuales del WRF).

Si bien es cierto que el uso de estas variables genera un producto mejor que los demás, este está lejos de ser perfecto. Si lo comparamos con los datos reales aportados por la AEMET, 204 mm en dos horas y media, la cantidad de agua simulada por nuestro modelo se queda en menos de la mitad. Asimismo, destaca el hecho de que esta lluvia se prevé unas 30 horas antes de lo debido, lo cual es un problema grave si se trata de prevenir a la población de un suceso tan extremo como el que se trata en este estudio. Estos hechos se pueden visualizar perfectamente en las figuras 10, 12 y 14.

Dado que resulta inviable tratar de reproducir la catástrofe de 2002 en base a modificar estos tres parámetros, y debido a que en todas las simulaciones salvo en una llueve con más de 24 horas de antelación, se decide llevar a cabo un cuarto

experimento en el que se modifica el instante en el que la simulación arranca, dejando el resto de variables constantes. De esta manera se intenta arrancar la simulación con unas condiciones iniciales más ajustadas al fenómeno que se estaba desarrollando.

Este último resultado se puede verificar en la figura 16. En ella se representa la lluvia acumulada de 5 simulaciones, tres que se inician el 30 y otras dos que lo hacen el propio día 31. De todas estas, la que mejor simula el fenómeno atmosférico que se pretende reproducir es la última, la que se lanza a las 6:00 del 31, ya que combina la mayor cantidad de lluvia que se ha conseguido generar en este estudio con la mayor proximidad temporal al hecho en cuestión. Si bien es cierto que es capaz de pronosticar con cierta exactitud el instante de mayor actividad (solamente se adelanta tres horas), la cantidad de agua que predice sigue siendo demasiado escasa, apenas la mitad de lo observado.

## 8. Conclusiones

*Although several simulations have been carried out with a fairly high spatial resolution and using different WRF configurations, the results are not entirely satisfactory. This could be expected, since the studies carried out by AEMET, after the event, also failed to simulate the observed precipitation. This suggests that the weather conditions that occurred that day are particularly difficult to simulate, which encourages the development of new studies, for example by improving topography information from other databases. Another way to enhance predictions is through data assimilation, improving the observational data in this area, for example through the installation of new radar systems, soundings,...*

En primer lugar, como ya se ha comentado en los apartados anteriores, los resultados que se han obtenido no han sido del todo satisfactorios. Es posible que realizando distintas combinaciones de parametrizaciones o modificando otras variables, que en este estudio no se han tenido en cuenta, fuera factible generar unas condiciones más idóneas que recreasen mejor las precipitaciones que cayeron en Santa Cruz.

Asimismo, la AEMET ya realizó un análisis del mismo suceso, publicado el 3 de marzo de 2003, en el que se llevan a cabo dos simulaciones extra empleando el modelo HIRLAM con una resolución de 0.2 y 0.1 grados de resolución horizontal respectivamente. No obstante, la conclusión a la que se llegó es que una resolución mayor, sin incremento del número de observaciones, no parece mejorar los resultados. Esto podría significar que tratar de prever este fenómeno con los datos y equipos de los que se disponían en 2002 sería una tarea muy complicada, casi imposible.

Además, las simulaciones muestran la alta dependencia de los resultados con la hora de inicio de dichas simulaciones. Aquellas que se inician desde el día 30, el anterior a las lluvias torrenciales, producen la mayor parte de la lluvia ese mismo día 30. Sólo aquellas que se inician más próximas al fenómeno observado, son capaces de proporcionar lluvia en un área similar en un horario parecido, con un adelanto de

unas dos horas. Por lo tanto, parece que el modelo mesoescalar, aunque simula las condiciones de inestabilidad de esos días, rápidamente se aparta de las condiciones que acaecieron realmente. Otra posibilidad a estudiar sería la de aplicar técnicas de *nudging* para que las variables de WRF siguieran un comportamiento más similar a lo aportado por el modelo global.

Una manera de intentar mejorar el alcance predictivo de estos sistemas es la de contar con una mayor cantidad de datos observacionales con la que trabajar, para utilizarlos dentro del proceso de asimilación de datos. Para ello es necesario aumentar la cantidad de estaciones meteorológicas que nos permita evitar la interpolación de datos para mejorar la resolución, ya que esto puede ocasionar errores en las predicciones. Otra mejora necesaria es la instalación de un radar adicional que ayude a mejorar la observación de las borrascas que llegan al archipiélago desde el oeste, dado que la sombra del Teide impide que el haz electromagnético del radar meteorológico ubicado en Gran Canaria (Pico de Los Moriscos) pueda captar las partículas que llegan por el oeste del Archipiélago (Herrera, R., 2012). Dicha obra se ha iniciado ya en Cruz de Gala (Buenavista del Norte) y está financiada por la AEMET con 2.5 millones de euros, aunque debido a varios obstáculos se prevé que este nuevo sistema de detección no esté operativo hasta 2021 (Pavés, V., 2019).

Además, todo este aumento en la cantidad de datos requerirá el uso de mejores equipos que sean capaces de procesar un gran número de cálculos en un tiempo limitado, de lo contrario estas medidas no surtirían ningún efecto.

Por otro lado, una manera de aprovechar el trabajo desarrollado en este estudio sería la de utilizar estas mismas parametrizaciones, y otras más, con distintos fenómenos adversos producidos en las islas y compararlos, a fin de determinar cuáles definen de manera más precisa cada uno de ellos. Esto podría ayudar, en el futuro, a predecir con mayor exactitud y antelación un suceso catastrófico.

Como se ha podido comprobar en este estudio, las simulaciones que tratan de replicar situaciones meteorológicas adversas en las islas requieren de unas condiciones muy específicas. Entre ellas están la de seleccionar unos dominios geográficos centrados sobre el archipiélago y el uso de una resolución lo suficientemente alta como para describir correctamente la orografía del terreno. Esto

último es de vital importancia, ya que gran parte de la climatología en Canarias, especialmente la lluvia, se debe al relieve de las islas.

Por último, cabe destacar que el inicio del trabajo consistió en el aprendizaje de las funciones básicas del WRF y las herramientas necesarias para analizar los resultados obtenidos. La finalidad era la de permitir al autor de este trabajo realizar e interpretar las simulaciones de manera independiente.

## 9. Bibliografía

University Corporation for Atmospheric Research, (10 de abril de 2020). WRF USERS PAGE. Recuperado de [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfv4.0/wrf\\_model.html](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfv4.0/wrf_model.html).

National Center for Atmospheric Research, (2020). Weather Research and Forecasting Model. Recuperado de <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>.

Grupo de Interacción Océano Atmósfera, (2017). Pronóstico Meteorológico. Recuperado de <http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteorologia/inf-wrf>  
*Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Ciudad de México.*

Elizaga Rodríguez, F., Rus Jiménez, C., Bustos, J. J., Marrero, C., Sanz Barajas, R., Calbet, X., Rípodas Agudo, P., Alejo Herrera, C.J., Martín León, F., Sanambrosio Beirán, J.I., Río Ladrón de Guevara, P. D. (1 de marzo de 2003). Situación de lluvias torrenciales en Santa Cruz de Tenerife (31 de marzo de 2002). *Agencia Estatal de Meteorología*. Recuperado de <http://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/1791>.

Diario de Avisos, (1 de abril de 2002). Drama sin precedentes, *Santa Cruz de Tenerife* [38868]. Recuperado de [http://hemeroteca.diariodeavisos.com/edicion\\_completa](http://hemeroteca.diariodeavisos.com/edicion_completa)

Diario de Avisos, (2 de abril de 2002). Se busca a 10 desaparecidos, *Santa Cruz de Tenerife* [38869]. Recuperado de [http://hemeroteca.diariodeavisos.com/edicion\\_completa](http://hemeroteca.diariodeavisos.com/edicion_completa)

El Día, (1 de abril de 2002). Tragedia en Santa Cruz. *Santa Cruz de Tenerife*.

Toledo, O. (2 de abril de 2017). 15 años de la peor tormenta de la historia reciente de Tenerife. *El País, Madrid*. Recuperado de [https://elpais.com/politica/2017/04/02/actualidad/1491158699\\_108620.html](https://elpais.com/politica/2017/04/02/actualidad/1491158699_108620.html).

Pavés, V. (10 de noviembre de 2019). La eterna espera por el radar meteorológico. *El Día, Santa Cruz de Tenerife*. Recuperado de <https://www.eldia.es/sociedad/2019/11/10/eterna-espera-radar-meteorologico/1023680.html>.

Ed. Santos Burguete, C., (2018). Física del caos en la predicción meteorológica. Historia y fundamentos de la meteorología, sistemas de predicción por conjuntos, predicción probabilística y aplicaciones, cambio climático y aspectos sociales. *Ministerio para la Transición Ecológica, Agencia Estatal de Meteorología, Madrid*.

Plasencia, M., (30 de marzo de 2012). La tragedia 10 años después. *Diario de Avisos, Santa Cruz de Tenerife*. Recuperado de <http://www.diariodeavisos.com/2012/03/la-tragedia-10-anos-despues/>.

Herrera, R. (22 de marzo de 2012). El Cabildo reclama dos radares meteorológicos para Tenerife. *Diario de Avisos, Santa Cruz de Tenerife*. Recuperado de <http://www.diariodeavisos.com/2012/03/el-cabildo-reclama-dos-radares-meteorologicos-para-tenerife/>.

Arranz Lozano, M., (2006). Riesgos Catastróficos en las Islas Canarias. Una Visión Geográfica. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense (Madrid)*, 26, 167-194.

Powers, J., (abril de 2014). Weather Research Forecasting Model. *Meteorological Technology International*, 30-33. <http://viewer.zmags.com/publication/c4f984ab#/c4f984ab/2>.

Marzol Jaén, V., (2002). Lluvias e inundaciones en la Ciudad de Santa Cruz de Tenerife. El agua y el clima. España: Publicaciones de la Sociedad Española de Climatología, 461-470.