



---

**Universidad de Valladolid**

Facultad de Ciencias

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

Grado en Física

**Aplicación del modelo WRF a predicción meteorológica**

*Autor: Álvaro Abad Santiago*

*Tutor/es: María Luisa Sánchez Gómez*



# Agradecimientos

A María Luisa y a José-Luis por darme la oportunidad  
de realizar este trabajo con ellos.  
También a mis amigos y familiares que de una u otra manera  
me han ayudado a realizar este proyecto.

# Resumen

Tras realizar una simulación meteorológica a modo de predicción de la Península Ibérica y las Islas Baleares con el sistema WRF, se tratará de estudiar cómo de bueno es este sistema para su uso en predicción. Para ello, vamos a simular los años 2008, 2009 y 2010; y comparar la simulación con lo que ocurrió en realidad.

Para ello dispondremos de los datos meteorológicos reales, obtenidos gracias al servicio AEMET OpenData, en el cual hemos tratado de escoger estaciones que estuviesen repartidas de forma homogénea por todo el territorio de estudio y que, además, AEMET proporcionase al menos un 85 por ciento de los datos.

El objetivo final es comparar los datos simulados con los reales y ver cómo varían estos en función de la estación, el tipo de terreno, la geografía de la zona u otros posibles factores.

# Abstract

After performing a meteorological simulation as a prediction of the Iberian Peninsula and the Balearic Islands with the WRF system, we will try to study how good this system is for its use in prediction. To do this, we are going to simulate the years 2008, 2009 and 2010 and compare the simulation with what actually happened.

For this, we will have the real meteorological data, obtained thanks to the AEMET OpenData service, in which we have tried to choose stations that were distributed homogeneously throughout the study territory and that, in addition, AEMET provided at least 85 percent of the total data.

The final objective is to compare the simulated data with the real ones and see how they vary depending on the season, the type of terrain, the geography of the area or other possible factors.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. Objetivo</b>	<b>3</b>
<b>3. Descripción teórica</b>	<b>4</b>
3.1. Análisis estadístico de los datos . . . . .	4
3.2. Indicadores de dispersión . . . . .	4
<b>4. Descripción experimental</b>	<b>5</b>
4.1. Modelo WRF . . . . .	5
4.2. Descripción de las estaciones meteorológicas . . . . .	7
<b>5. Procedimiento</b>	<b>9</b>
<b>6. Análisis de los resultados</b>	<b>10</b>
6.1. Temperatura media mensual . . . . .	11
6.1.1. Zona interior . . . . .	11
6.1.2. Zona costera . . . . .	12
6.1.3. Zona intermedia . . . . .	16
6.2. Temperatura mínima media . . . . .	24
6.2.1. Zona interior . . . . .	25
6.2.2. Zona costera . . . . .	25
6.2.3. Zona intermedia . . . . .	26
6.3. Temperatura máxima media . . . . .	26
6.3.1. Zona interior . . . . .	26
6.3.2. Zona costera . . . . .	26
6.3.3. Zona intermedia . . . . .	27
<b>7. Comentario sobre los resultados y estadística más detallada</b>	<b>27</b>
7.1. Valladolid . . . . .	28
<b>8. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>33</b>
<b>9. Bibliografía y referencias</b>	<b>35</b>

# 1. Introducción

Desde siempre y a día de hoy la meteorología es un factor clave en la forma de vida de nuestra sociedad. No sólo en lo referente a que ponernos mañana dependiendo si hace frío o calor. La agricultura, y por lo tanto la subsistencia humana, depende de la climatología a largo plazo y de la meteorología a corto plazo. Además, aunque el ser humano ha logrado en cierta manera adaptarse a los cambios en el tiempo, seguimos estando a su completa merced frente a grandes temporales, huracanes, cambios bruscos de temperatura, virulentas tormentas, periodos relativamente largos de sequía, temperaturas extremas o lluvias muy caudalosas en franjas muy cortas de tiempo. Dado que no somos capaces de controlar dichos sucesos, ser capaces de predecirlos con suficiente tiempo como para intentar tomar las medidas oportunas para mitigar los posibles daños o consecuencias es algo esencial.

A día de hoy, la agencia estatal de meteorología española (AEMET) basa sus predicciones meteorológicas en los modelos HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) y HARMONIE. Este segundo está basado en HIRLAM, pero admite cálculos para resoluciones de unos pocos kilómetros. Estos modelos, que permiten una predicción muy fiable a 5 días vista, son sistemas de predicción numérica. Esto significa que son un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen las leyes físicas que rigen el comportamiento de la atmósfera y que son resueltas mediante métodos numéricos. Estos modelos están incluidos dentro del consorcio SRNWP (Coordination on Short-Range Numerical Weather Prediction Programme), un grupo de 31 países europeos que trabajan en conjunto para mejorar los sistemas de predicción meteorológicos.

Así mismo, estas predicciones dependen enormemente de lo que se quiera predecir. La temperatura es algo que ya se tiene bien controlado, sin embargo las tormentas de verano y la dirección/velocidad del viento es algo cuya predicción cuesta.

Además, el terreno en el cual se realiza la simulación es también de vital importancia. No es lo mismo realizar una simulación en el territorio de Castilla y León o en la gran estepa rusa, que son grandes terrenos mayoritariamente llanos; que hacerlo en toda la península ibérica o en Suiza, donde los sistemas montañosos están repartidos por todo el lugar, y se alternan con grandes valles.

## 2. Objetivo

Estudiar los datos de temperatura obtenidos en la predicción comparándolos con lo ocurrido realmente para ver como de bueno es el sistema WRF con motor ARW a la hora de realizar este tipo de estudios. Así mismo, una vez analizados los resultados, proponer vías de futuro para mejorar estas cuentas, solventar posibles errores en las mismas y proponer nuevas vías de estudio para posibles trabajos.

### 3. Descripción teórica

#### 3.1. Análisis estadístico de los datos

Durante el estudio de los datos, compararemos las temperaturas medias mensuales para diferentes lugares. Así, durante el procedimiento experimental, usaremos las siguientes expresiones:

- Media aritmética: Es el valor promedio de un conjunto de números finitos.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i) \quad (1)$$

- Cuartiles: Son los tres valores que dividen una serie de n datos ordenados en cuatro partes iguales.

- Primer cuartil:

$$Q_1 = \frac{n+1}{4} \quad (2)$$

- Segundo cuartil: Valor que ocupa la posición central de los datos.

- Tercer cuartil:

$$Q_3 = \frac{3(n+1)}{4} \quad (3)$$

- Mediana: Representa el valor de la variable que ocupa la posición central de una serie de datos ordenados. Es equivalente al segundo cuartil.
- Diagrama de caja y bigotes: Es un método estandarizado de representación gráfica de una serie de valores a través de sus cuartiles. En él se pueden ver de forma clara los cuartiles de los datos y posibles valores extremos o atípicos en el conjunto de los mismos.

#### 3.2. Indicadores de dispersión

Estos valores son los parámetros estadísticos que determinan como de cercanos o lejanos son los valores centrales respecto de la media aritmética. También indican la variabilidad de los datos.

- Desviación estándar: Representa el grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n (x_i^2) - n * \bar{x}^2)} \quad (4)$$

## 4. Descripción experimental

### 4.1. Modelo WRF

El modelo WRF es un sistema libre de cálculo numérico para simulación atmosférica. Fue diseñado y ahora mismo está siendo desarrollado principalmente por el NCAR (National Center for Atmospheric Research), la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y la AFWA (Air Force Weather Agency); todas ellas entidades de Estados Unidos. Con más de 23.000 usuarios registrados en más de 150 países, este modelo es tremendamente útil tanto en investigación como en predicción meteorológica.

Este modelo ofrece dos motores de cálculo a la hora de resolver numéricamente las ecuaciones que rigen los procesos atmosféricos: el NMM-WRF (Nonhydrostatic Mesoscale Model) y el ARW-WRF (Advanced Research WRF). Ambos tratan de resolver numéricamente las ecuaciones de Euler (dinámica de fluidos), para el caso de un sistema totalmente compresible no hidrostático, con integraciones temporales de 3º orden Runge-Kutta y operadores de advección de 2º-5º orden.

Ambos motores son equivalentes e igual de eficientes y exactos para la mayoría de los cálculos, como la parametrización de atmósferas, investigación, predicciones meteorológicas numéricas (NWP)...

Sin embargo, si queremos mayor precisión en los datos, como en procesos de downscaling, o tener en cuenta posibles componentes o reacciones químicas (por ejemplo, humos/vapores industriales, contaminación, gases volcánicos...) es necesario utilizar el motor ARW, pues el NMM supone casos ideales en este aspecto, es decir, sin reactividad en la atmósfera.

El proceso por el cual funciona el WRF es el que se muestra en el siguiente esquema:

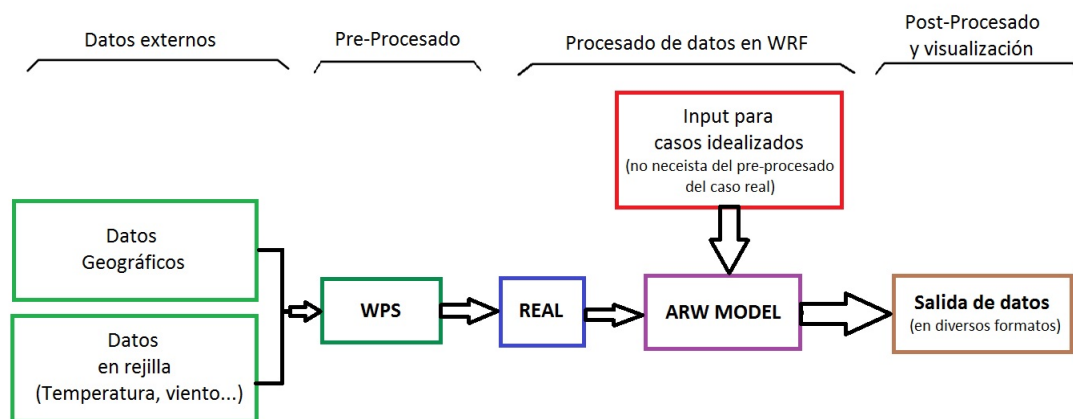


Figura 1: Esquema de funcionamiento del modelo WRF

En primer lugar se selecciona un dominio para la simulación. Esto es seleccionar, geográficamente, la zona donde se van a realizar las cuentas. Puede ser una zona acotada (por ejemplo, algún continente o región) o bien el globo terráqueo entero. Ahora, una vez definido el dominio, es necesario introducir los datos reales con los que comenzar la simulación. Para ello necesitamos 2 clases diferentes: Por una parte, necesitamos unas condiciones iniciales para realizar la simulación, y por otra necesitamos datos dependientes del tiempo durante el cual queremos realizarla. Es decir, si queremos realizar una simulación durante el mes de enero necesitamos que nuestro dominio tenga datos de entrada dependientes del tiempo para los días del mes de enero, por ejemplo cada 6 horas. Esto se debe a que nuestro dominio, cuando no se simula el planeta entero, actúa como sistema abierto y necesitamos unas condiciones de contorno cada X tiempo para resolver numéricamente las ecuaciones. Esto, en cambio, no es necesario cuando el dominio es el globo terráqueo entero, pues éste actúa como un sistema cerrado y él mismo se auto-impone dichas condiciones de contorno. Obviamente, cuanto más dure la simulación a partir del



último dato real, más tenderán a diverger las ecuaciones y menos precisa será la simulación. Sin embargo, esto nos permite simular globalmente los días futuros y, con los datos obtenidos cada X tiempo, introducirlos como datos de entrada dependientes del tiempo para un dominio menor y realizar las NWP.

Por otro lado, teniendo dichos datos dependientes del tiempo de otras fuentes (ya sean estaciones meteorológicas, satélites, otras simulaciones...), el WRF permite realizar re-análisis de fechas del pasado para obtener nuevos datos, realizar downscaling... Así, a día de hoy se están consiguiendo datos y cálculos meteorológicos para tiempos pasados (por ejemplo).

Además, el WRF permite realizar, dentro de los dominios, subdominios en los cuales obtienes datos de salida con una mayor resolución, pero a un coste de tiempo de cálculos mayor.

En WRF el proceso a seguir es el siguiente: Primero se obtienen los datos externos y se convierten a un lenguaje propio para realizar las cuentas. Por separado se tratan los datos meteorológicos o numéricos dependientes del tiempo, y por otro los geográficos; que luego se unifican en un único archivo dónde cada dato meteorológico lleva asociadas unas coordenadas y unas características geográficas. Después, ese archivo se pasa por el pre-procesado de datos, los cuales, además de tener cada uno una etiqueta de coordenada, son interpolados, en los ejes X,Y,Z, normalizando la coordenada vertical a la presión hidrostática (eta). Ahora, con esos datos temporales ya correctamente situados y calibrados, se ejecuta el procesado de los mismos, que va resolviendo numéricamente las ecuaciones de Euler para los periodos de tiempo intermedios entre las condiciones de contorno, obteniendo los datos que se quieren.

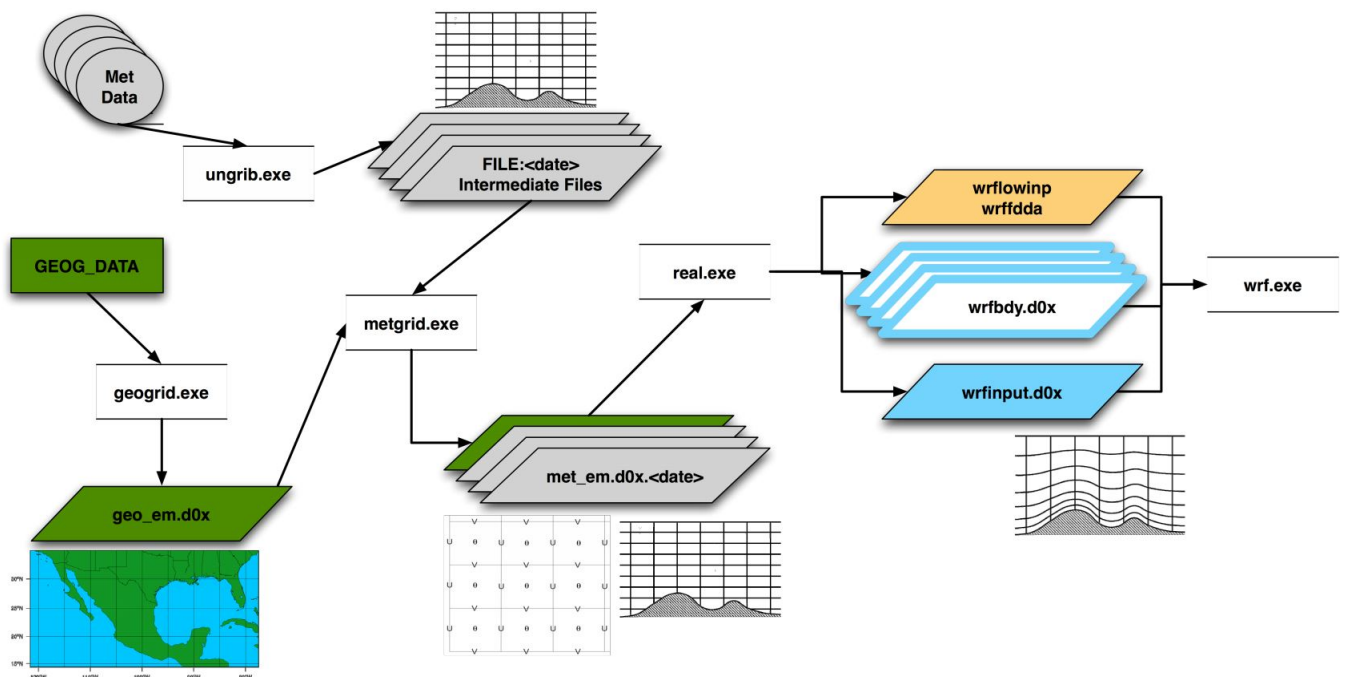


Figura 2: Esquema del procesamiento de datos del WRF

## 4.2. Descripción de las estaciones meteorológicas

De las estaciones meteorológicas que se han seleccionado para comparar los datos simulados vamos a obtener toda una serie de datos meteorológicos mensuales. De ellos, nosotros vamos a utilizar en este trabajo las medias mensuales de las temperaturas: la temperatura media, la temperatura mínima media y la temperatura máxima media.

Se han seleccionado estaciones que cubren de manera más o menos homogénea todo el territorio peninsular y las Islas Baleares, escogiendo aquellas que nos dan la mayor cantidad de datos posibles. El acceso a estos datos está proporcionado por AEMET Open Data.

Las estaciones las caracterizamos por su indicador climatológico (el código por el cual las clasifica AEMET), su altura sobre el nivel del mar (ASNМ) y sus coordenadas.

Más adelante veremos si la geografía del lugar donde está situada la estación afecta a la simulación y, si es así, de qué manera en función del entorno.

A la hora de buscar las estaciones se ha tratado de buscar aquellas que provean datos, pues el servicio de AEMET Open Data es notablemente mejorable. Así, buscando eso y la homogeneidad de distribución de las estaciones en todo el territorio, finalmente se han seleccionado:



*Figura 3: Mapa con la posición geográfica aproximada de las estaciones*



Localización	Ind. climatológico	ASNM (m)	Coord. geográficas	Coord. Decimales
A Coruña	1387	58	43° 21' 57" N 8° 25' 17" W	43.365833, -8.421389
Madrid Ciudad Universitaria	3194U	664	40° 27' 6" N 3° 43' 27" W	40.4516667, -3.72416666
Puerto de Palma de Mallorca	B228	3	39° 33' 12" N 2° 37' 31" E	39.553333, 2.62527777
Murcia	7178I	61	38° 0' 7" N 1° 10' 15" W	38.0019444, -1.17083333
Santander	1111X	52	43° 29' 28" N 3° 48' 2" W	43.4911111, -3.8005555
Aeropuerto de Zaragoza	9434	249	41° 39' 38" N 1° 0' 15" W	41.6605556, -1.00416666
Chinchilla del Monte (Albacete)	8177A	880	38° 56' 9" N 1° 39' 36" W	38.9358333, -1.66
Tarifa (Cádiz)	6001	32	36° 0' 50" N 5° 35' 56" W	36.0138889, -5.598888
La Molina (Girona)	9585	1703	42° 19' 57" N 1° 56' 22" E	42.3325, 1.9394444
Cazalla de la Sierra (Sevilla)	5704B	550	37° 55' 35" N 5° 46' 11" W	37.9263889, -5.76972222
Trujillo (Cáceres)	3463X	503	39° 28' 57" N 5° 51' 15" W	39.4825, -5.85416666
Autilla del Pino (Palencia)	2400E	874	41° 59' 44" N 4° 36' 10" W	41.9955556, -4.6027777
Pobra de Trives (Ourense)	1631E	840	42° 20' 22" N 7° 16' 57" W	42.3394444, -7.2825
Zumarraga (Gipuzkoa)	1037Y	28	43° 18' 8" N 2° 15' 4" W	43.3022222, -2.251111
Vinaròs (Castellón)	8523X	111	40° 33' 15" N 0° 25' 47" E	40.5541667, 0.42972222
Bunyola (Mallorca)	B248	1030	39° 44' 06" N 2° 42' 47" E	39.735, 2.7075
Aeropuerto de Ibiza	B954	6	38° 52' 35" N 1° 23' 4" E	38.8763889, 1.384444
Abla (Almería)	6302A	869	37° 8' 29" N 2° 46' 47" O	37.1413889, -2.77972222
Arroyo del Ojanco (Jaén)	5181D	580	38° 18' 23" N 2° 53' 23" O	38.3063889, -2.88972222
Vitigudino (Salamanca)	2916A	796	41° 0' 41" N 6° 26' 16" O	41.0113889, -6.437777
Cañizares (Cuenca)	3044X	928	40° 31' 49" N 2° 9' 0" O	40.5302778, -2.15
Palacios de la Sierra (Burgos)	2298	1080	41° 57' 35" N 3° 7' 54" O	41.9597222, -3.1316666
Cabo Peñas (Asturias)	1210X	100	43° 39' 21" N 5° 50' 55" O	43.6558333, -5.84861111
Valencia	8416Y	11	39° 28' 50" N 0° 21' 59" O	39.4805556, -0.36638888
Areyns de Mar (Barcelona)	0252D	74	41° 35' 15" N 2° 32' 24" E	41.5875, 2.54
Ciudad Real	4121	628	38° 59' 21" N 3° 55' 13" O	38.9891667, -3.92027777
Valladolid	2422	735	41° 38' 27" N 4° 45' 16" O	41.6408333,- 4.754444
Oviedo	1249X	336	43° 21' 12" N 5° 52' 27" O	43.3533333,- 5.87416667

Figura 4: Tabla con los datos específicos de cada estación

## 5. Procedimiento

En primer lugar vamos a escoger nuestra zona de estudio. Como ya se ha dicho, el objetivo de este trabajo es comparar NWP sobre el territorio español con lo que realmente sucedió. Para ello, definimos nuestro dominio de estudio. Como ya vimos en el apartado de introducción, para hacer que el modelo WRF funcione en dominios acotados es necesario aportarle condiciones de contorno durante el tiempo que dure la simulación.

Nuestro objetivo es predecir a dos días vista, por lo que tenemos dos opciones: La primera es coger datos reales cada 6 horas y con ellos generar esas condiciones dependientes del tiempo que precisa el WRF para funcionar. Este método lo descartamos, pues, aunque es bastante más rápido, realmente lo que hacemos es “trucar” la predicción, pues si forzamos a que cada 6 horas el WRF lleve las cuentas hacia los valores que acontecieron realmente, estamos forzando a que los resultados nos den lo que nos deberían dar.

En lugar de eso lo que se ha realizado es, primero una simulación global (donde no son necesarias las condiciones de contorno dependientes del tiempo) y, con condiciones iniciales reales, dejar que se simulen los 2 días siguientes y, tomando estos datos simulados globalmente como “condiciones de contorno dependientes del tiempo”, realizar un re-análisis ya en nuestro dominio de estudio, para obtener el downscaling y poder determinar, comparando con las estaciones como de precisa es la simulación. La zona de estudio va a ser la Península Ibérica y las Islas Baleares. Para ello, definiremos nuestra zona acotada de tal forma que la península quede lo suficientemente alejada de los bordes del dominio para evitar que las condiciones de contorno afecten a la zona de estudio, pero a la vez tratando de que la simulación se realice de tal forma que la península sea la zona principal de nuestra simulación. Así, definimos nuestro dominio como un rectángulo de vértices en las coordenadas: (31.7896N, -16.932648E); (47.8644N, -16.932648E) ; (31.7896N, 11.474629O) y (47.8644N, 11.474629O)



*Figura 5: Dominio de la simulación*

Para realizar la simulación global lo que se ha hecho es tomar datos de la web de libre acceso de la NOAA sobre las condiciones iniciales de la simulación en WRF para todo el globo, y se han tomado cada 48 horas. Así, se inicia la simulación con unas condiciones iniciales reales (es decir, valores reales del día de inicio) y se deja que el programa simule y “prediga” durante 48 horas. Pasadas esas 48 horas, el programa reinicia la simulación, toma nuevamente datos reales y “predice” otras 48 horas. Así, programando estos reinicios, se van simulando año tras año de forma automática.

De esta manera como datos de salida obtenemos los valores predictivos atmosféricos para todo el globo, datos que se han ido escribiendo en archivos a intervalos de 6 horas, de forma que ahora tenemos nuestras condiciones de contorno temporales, listas para ser usadas como datos de entrada en una nueva simulación, ahora sólo con el dominio definido para el downscaling a la península y Baleares.

En primer lugar se han realizado todas las simulaciones globales, y una vez obtenidos todos los datos temporales de los años en cuestión, se ha realizado el downscaling en el dominio menor. Así, para este trabajo, se ha decidido simular predicciones meteorológicas para la península ibérica entera, entre los años 2008 y 2010, con una resolución de datos de  $0.289987^\circ$  en latitud ( $24.02\text{Km}$ ) y  $0.28705^\circ$  en longitud ( $31.95\text{Km}$ ), obteniendo datos meteorológicos cada 2 horas.

Con el fin de verificar el modelo, se van a comparar los datos obtenidos en la simulación con los datos reales de las estaciones. Después, se hará un análisis estadístico de los mismos.

## 6. Análisis de los resultados

Dados los resultados obtenidos, analizaremos por separado y en detalle dividiendo los datos en 3 zonas distintas: la zona de costa, la zona de interior, y lo que llamaremos la zona intermedia.

Llamaremos zona de interior a aquella que está lo suficientemente lejos del mar como para que este no afecte en nada a la simulación; zona costera a la misma costa y sus inmediaciones; y la zona intermedia al espacio comprendido entre la costa y  $120\text{km}$  hacia el interior (donde comienza la zona de interior).

Empezamos estudiando la zona interior. Las estaciones que corresponden a esta franja de estudio son: Autilla del Pino (Palencia), Valladolid, Aeropuerto de Zaragoza, Palacios de la Sierra (Burgos), Vitigudino (Salamanca), Ciudad Universitaria de Madrid, Cañizares (Cuenca), Trujillo (Cáceres), Ciudad Real y Arroyo del Ojanco (Jaén).

Las estaciones que corresponden a la zona intermedia son: Murcia, Abta (Almería), Pobra de Trives (Ourense), Cazalla de la Sierra (Sevilla), Oviedo (Asturias), La Molina (Girona), Cabo de Peñas (Asturias).

Y, finalmente, las estaciones correspondientes a la zona costera son: La Coruña, Santander, Zumarraga (Gipuzkoa), Arenys del Mar (Barcelona), Puerto de Palma de Mallorca, Aeropuerto de Ibiza, Vinaròs (Castellón), Valencia y Tarifa (Cádiz).

El motivo de esta separación es debido a que, al analizar los datos obtenidos en la simulación, los parámetros estaban mal obtenidos en la zona costera. Tras analizar el fallo, se descubrió que esto se debía a una mala programación del WRF a la hora de escribir los resultados. En lugar de la temperatura media de un determinado lugar, esta salida nos saca la temperatura media sumada con el incremento de la temperatura del mar respecto a la media del año anterior. Así, en la misma zona costera, restando ese incremento solventamos el problema y en el interior, en zonas lo suficientemente alejadas del mar, ese efecto es totalmente inexistente. Sin embargo, hay una franja de terreno entre la zona de interior pura y la costa, donde ese efecto pasa de ser máximo a mínimo. Estudiando y caracterizando cómo va disminuyendo este efecto según nos adentramos en tierra podremos también

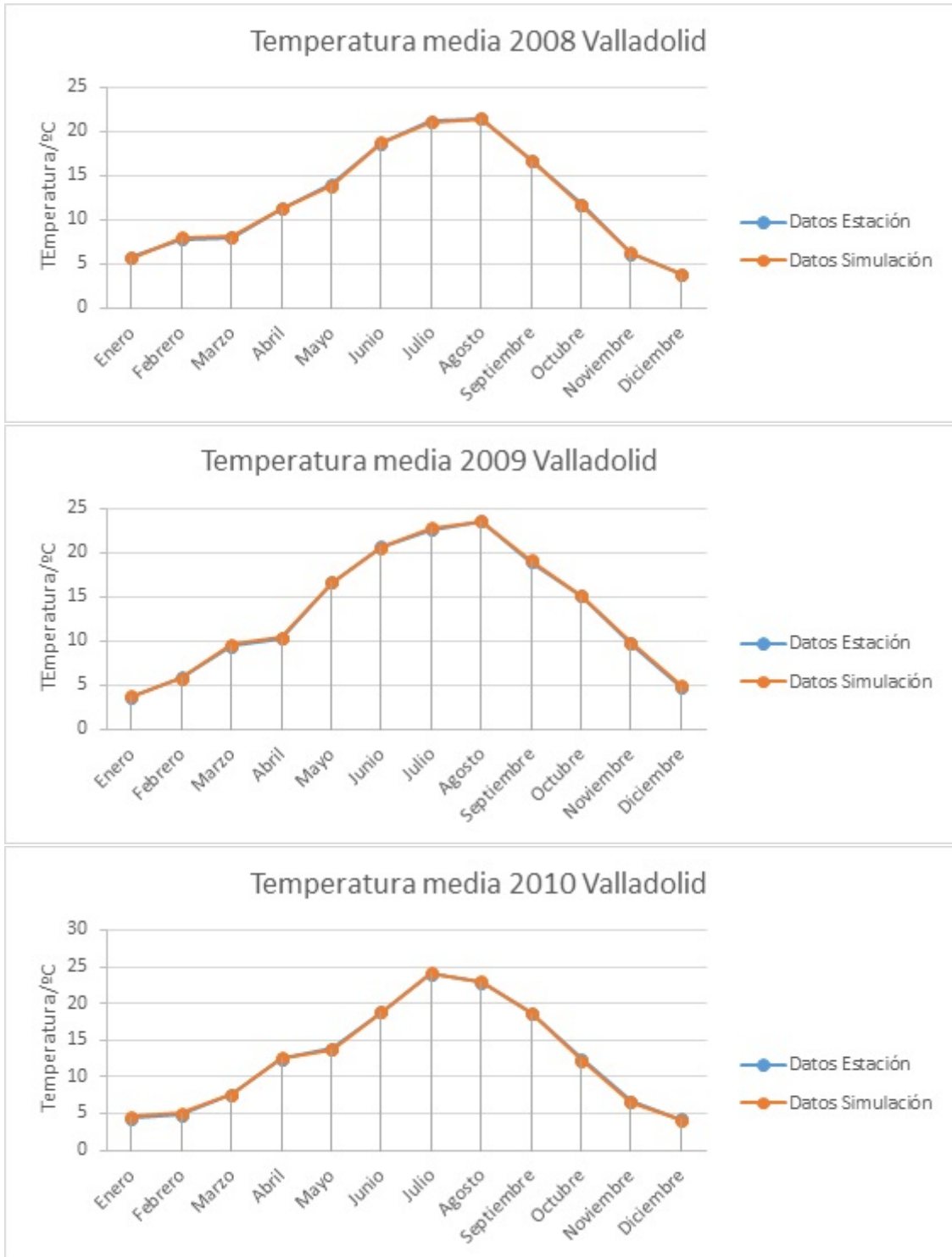


eliminarlo y así obtener los datos buscados.

## 6.1. Temperatura media mensual

### 6.1.1. Zona interior

Para la zona de interior los resultados son buenos en general. Como ejemplo, la siguiente gráfica muestra las medias mensuales de las temperaturas medias mensuales en Valladolid:



Figuras 6, 7 y 8: Temperaturas medias mensuales de Valladolid

En las gráficas de Valladolid se puede ver el comportamiento de las máximas de una región de climas extremos. La estación se encuentra en el interior de la ciudad, entre el barrio de Parquesol y

las Cortes de Castilla y León. Estamos ante una zona llana, lejos de grandes montañas, con el río Pisuerga a escasos 800 metros de la estación.

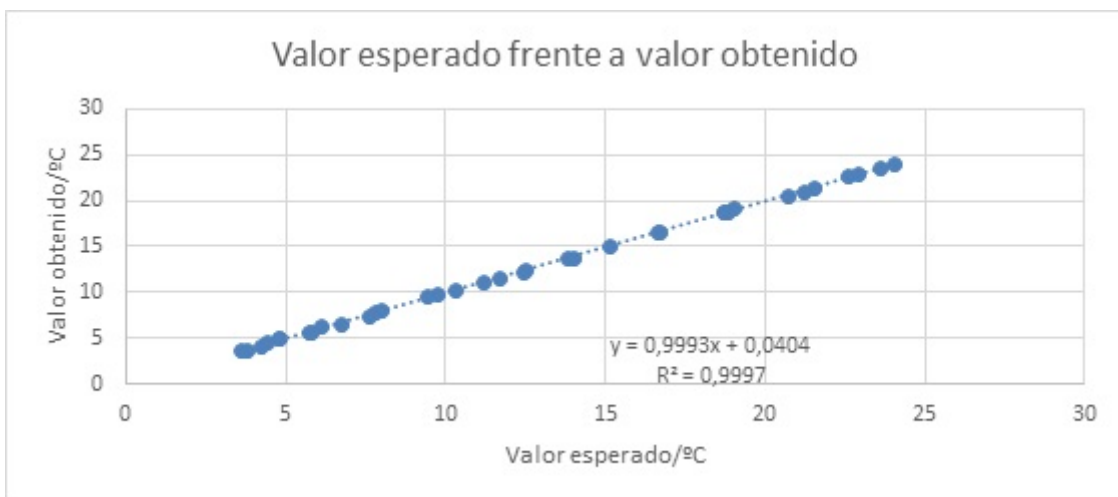


Figura 9: Ajuste lineal de los datos para Valladolid

Si procedemos de igual manera para todas las estaciones en la zona de interior, realizamos el ajuste para todos ellos, y representamos los valores obtenidos frente a los esperados, obtenemos que:

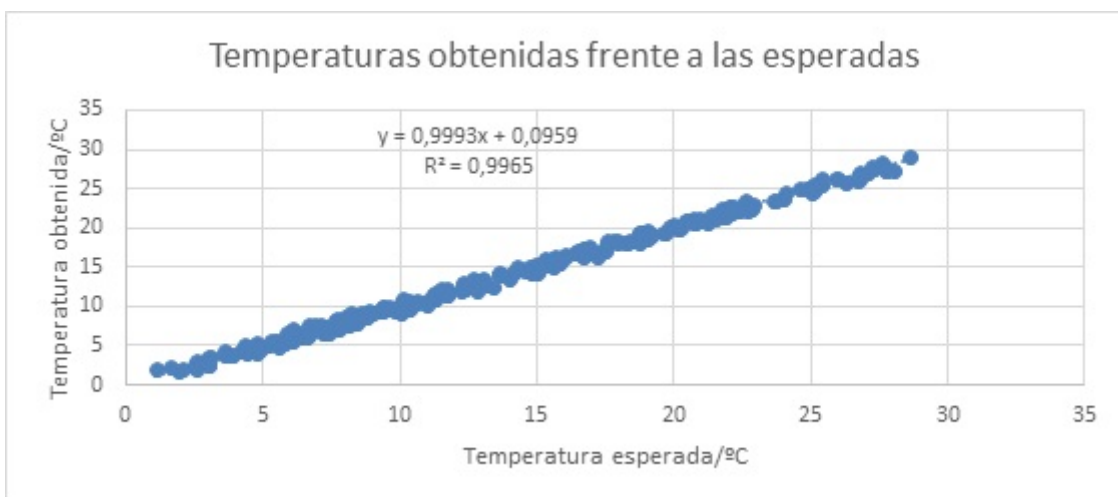


Figura 10: Ajuste lineal de los datos para la zona interior

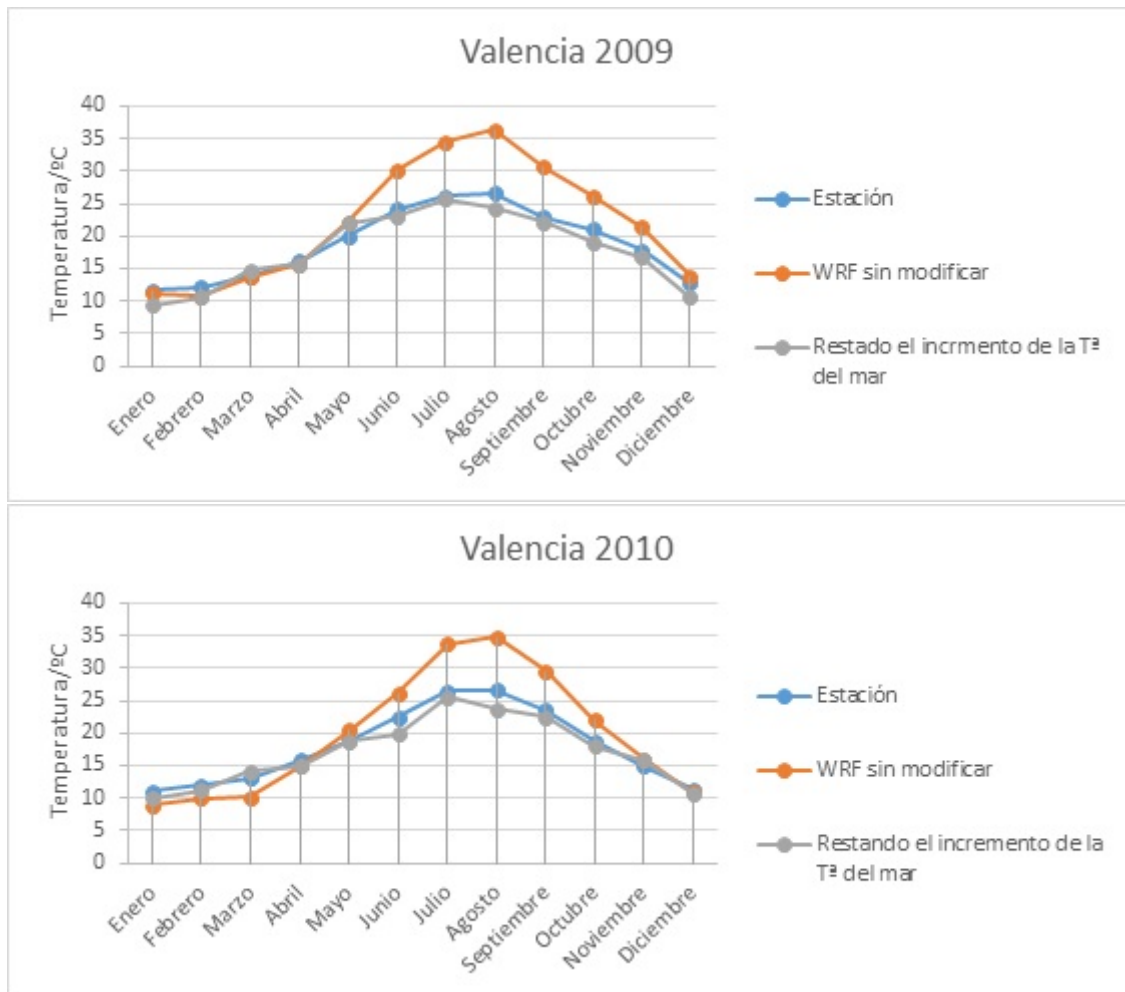
Analizando el ajuste, podemos ver que la simulación en general ha dado buenos resultados. Si tomamos el valor del ajuste en el corte del eje de ordenadas, vemos que tenemos una desviación media de 0,1°C con respecto a los valores reales.

### 6.1.2. Zona costera

Aquí vamos a hacer una nueva diferenciación: Mar Mediterráneo y Mar Atlántico, debido a los resultados que se obtienen. En primer lugar, al analizar los datos obtenidos directamente de la simulación, las gráficas obtenidas distaban mucho de representar un trabajo bien hecho. Como se muestra en las gráficas a continuación, las curvas de temperatura media mensual de la simulación y lo acontecido distaban mucho la una de la otra. Al final, tras mirar a ver cuál podía ser el fallo, y a prueba y error, se llegó a la conclusión de que el output de temperatura no era tal. El WRF, al escribir los datos de salida, en vez de poner sólo la temperatura media (como debería) pone, en su lugar, el valor de (temperatura + incremento de la temperatura de la superficie del mar con respecto a la media del año anterior). Así, aunque de manera tosca, se realizaron una serie de pruebas para confirmar esta teoría. Cogiendo la temperatura media del mar mediterráneo y del atlántico norte; y buscando las temperaturas medias mensuales de los mares en las zonas de costa oportunas, se restó ese valor a los

obtenidos del WRF, y resultó en que los valores ya se ajustaban más a lo esperado.

Por ejemplo:



Figuras 11 y 12: Representaciones de la temperatura media mensual para Valencia

En vista de estos resultados se decidió buscar una base de datos de temperaturas en superficie del mar. No fue posible obtener las de nuestra simulación, ya que al no tener en principio interés este valor para el trabajo y con el fin de ahorrar tiempo en la simulación, dicho valor no se fue escribiendo en los archivos de salida. Así, se decidió usar la base de datos de temperatura en superficie del mar del National Centers for Environmental Information (NCEI), perteneciente al National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Esta base de datos proporciona la temperatura cada hora, en archivos repartidos diariamente. Tomando esos valores, podemos realizar las medias diarias, mensuales y anuales necesarias para corregir nuestros datos.

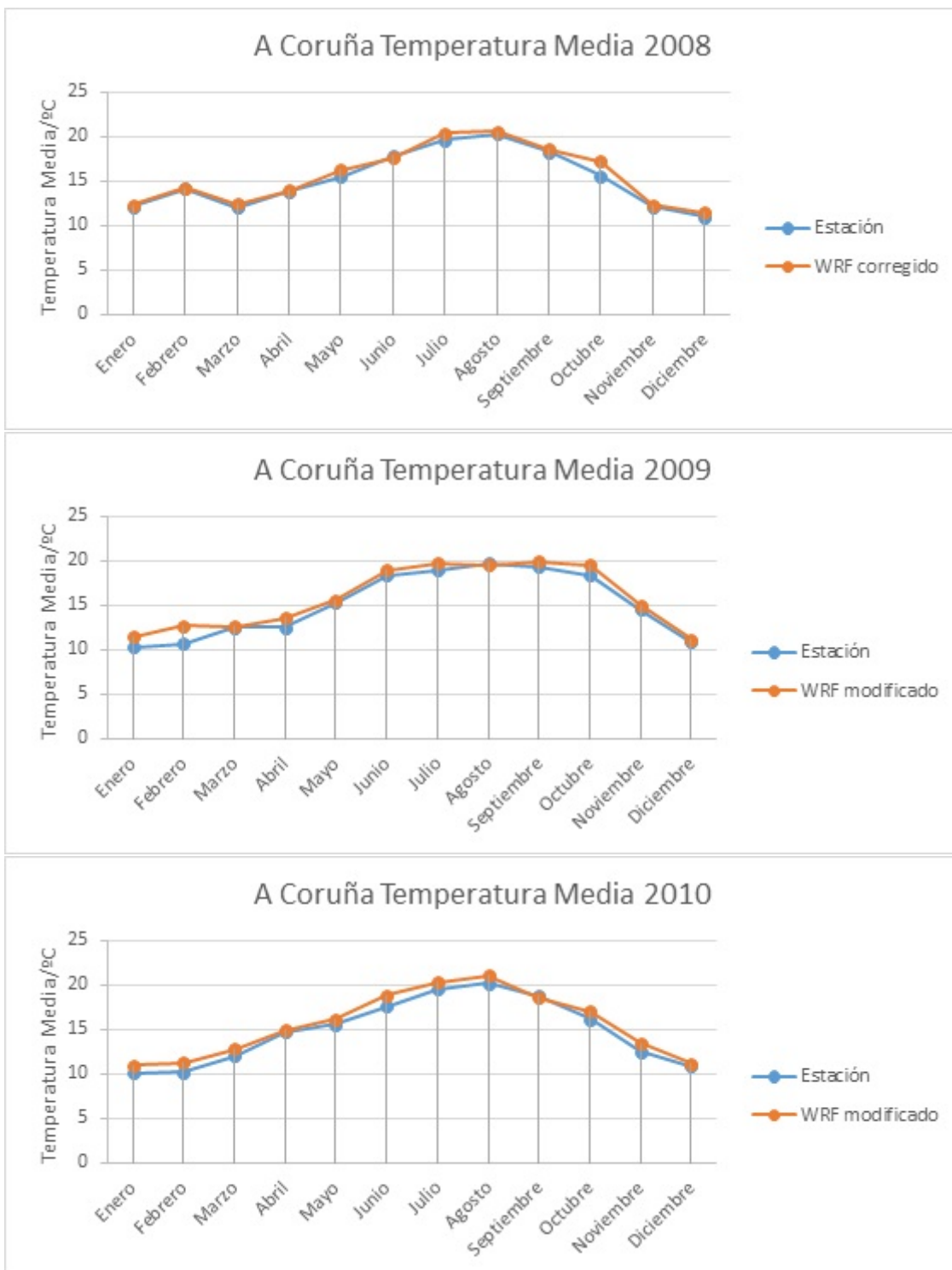
Esto va a presentar dos inconvenientes: El primero es que la resolución de datos del NCEI para la temperatura en superficie del mar es mucho menor que la de nuestra simulación y, aunque el mar no varía mucho su temperatura, el píxel de datos del cual nosotros obtenemos la media no nos da el valor de la temperatura en la misma costa, sino que será una media de todos los puntos geográficos que contiene ese píxel (costa + mar interior). Además, dada la menor resolución, obtener la temperatura de un píxel en la costa valenciana no es posible, sino que Valencia se encuentra unida a baleares y, por tanto, hay que coger la temperatura del mar entre la zona del norte de las islas y la costa sur de Francia.

Por otro lado, dichas temperaturas no son las propias de la simulación, por lo que habrá un error añadido a la hora de restar las temperaturas. Lo idóneo sería coger las propias temperaturas del WRF, pero al no tenerlas y cogerlas de una fuente externa hay un error mayor.



Al realizar todas las cuentas, obtenemos que las zonas de costa atlántica tienen un error sistemático que hace que la temperatura de la simulación sea siempre mayor que la real; mientras que en el mediterráneo ocurre justo al contrario, la temperatura simulada siempre es menor que la real.

Para el caso Atlántico, como ejemplo vemos la estación de A Coruña:



Figuras 13, 14 y 15: Representación de la temperatura media mensual en A Coruña

Y en conjunto todas las estaciones que están situadas en cualquier punto de la costa atlántica:

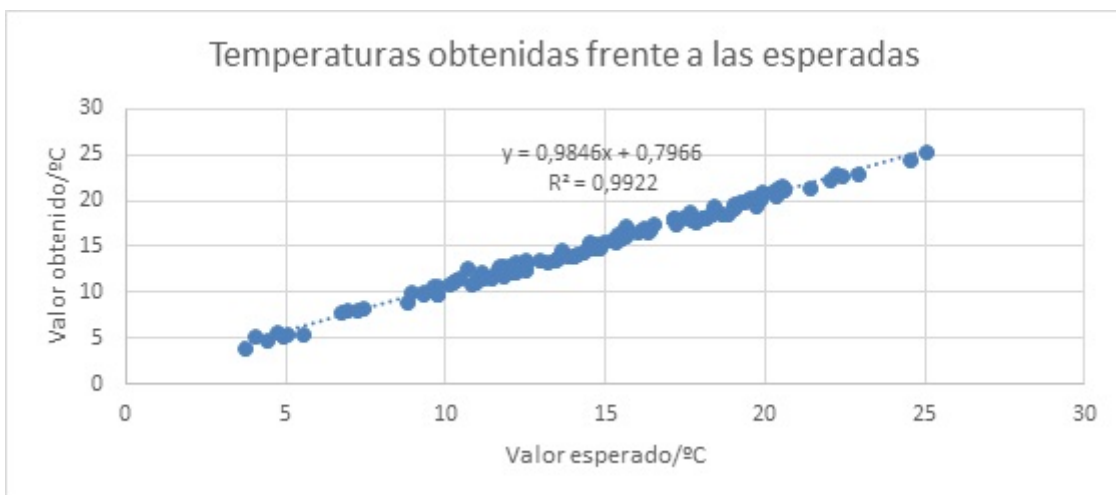
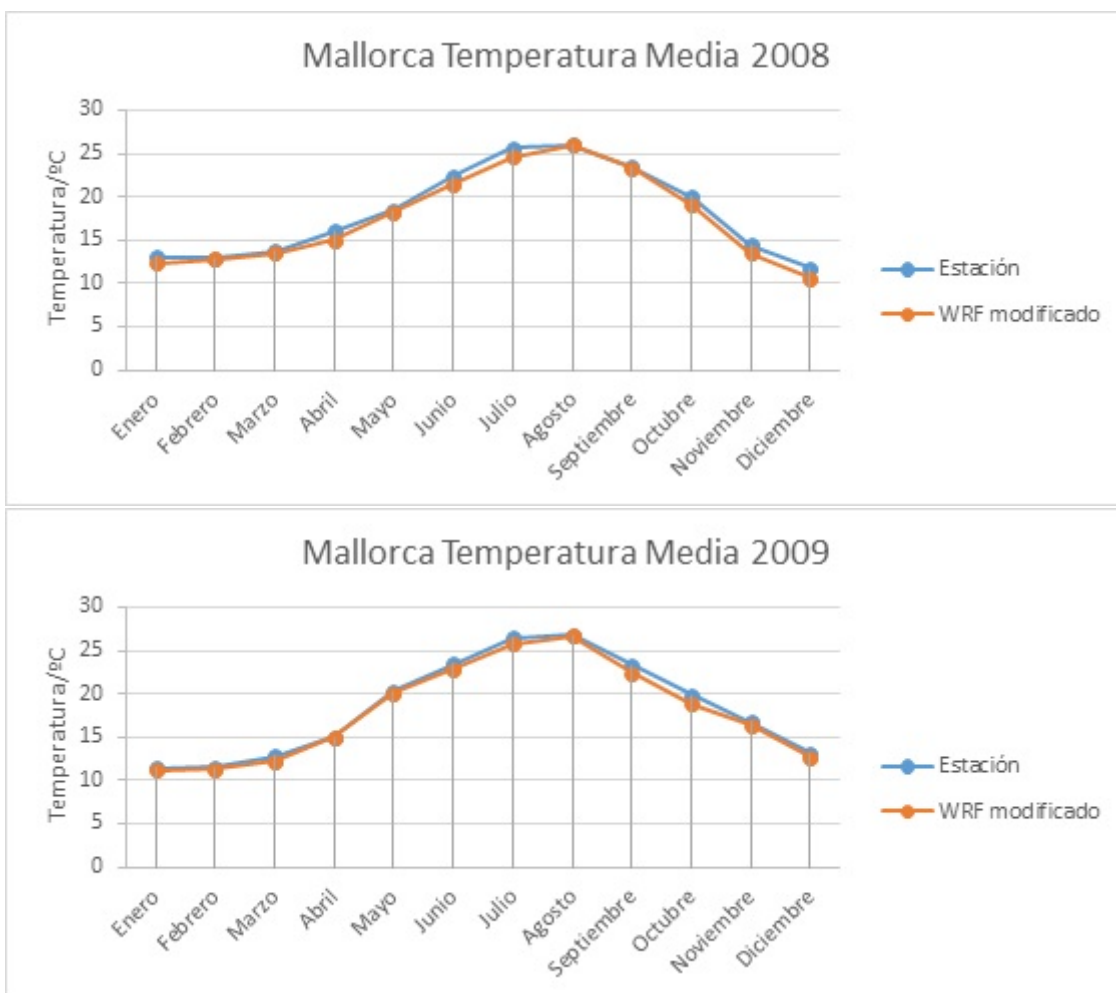
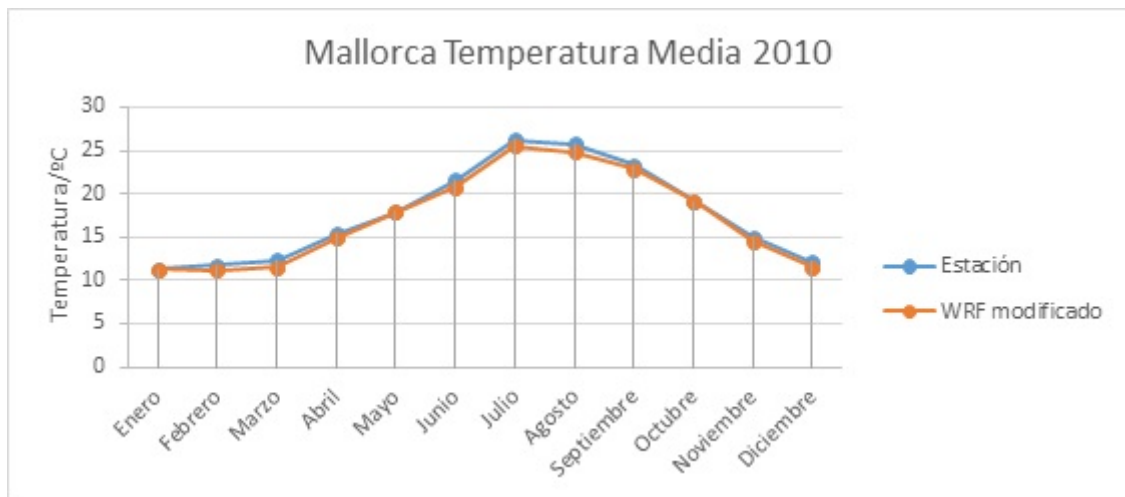


Figura 16: Ajuste lineal de los resultados para la costa atlántica

Para el caso mediterráneo, como ejemplo vemos el puerto de Palma de Mallorca:





Figuras 17, 18 y 19: Representación de la temperatura media mensual en Mallorca

Y en conjunto para todas las estaciones que están situadas en la costa mediterránea:

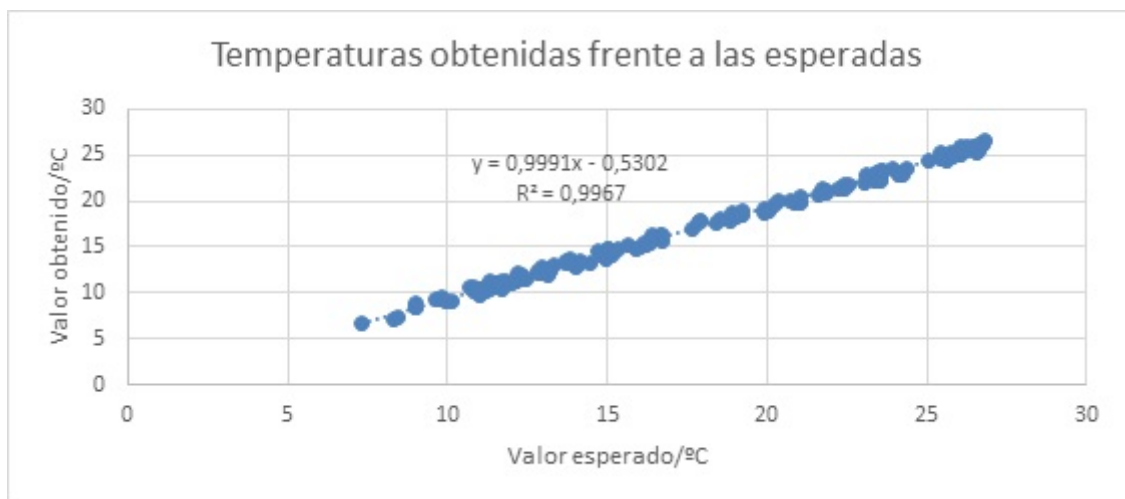


Figura 20: Ajuste lineal para las temperaturas de la costa mediterránea

### 6.1.3. Zona intermedia

Para la zona intermedia hemos realizado un estudio donde evaluamos el error en la medida de la temperatura en función a la distancia en línea recta al punto de costa más cercano. Para ello, cogemos los valores del WRF sin modificar, y buscaremos puntos desde la misma costa (error máximo) hasta puntos situados a unos 120Km de la costa, donde el error es mínimo. Dado que el error depende enormemente del mes, como se pudo ver en las gráficas al presentar el problema, en vez de representar directamente los valores de temperatura, vamos a representar qué porcentaje de error hay en función de la distancia. Esto es, a distancia 0Km el error será del 100 por cien (donde ese error es el explicado ya) y a los 120Km (donde ya no hay error entre el WRF y las estaciones) será del 0 por cien. Ese porcentaje de error es constante en función de la distancia. En un mes donde justo la temperatura media del mar coincida con la del año anterior, el error es 0 para cualquier distancia, sin embargo, para meses en los que no es así, el porcentaje de error es constante con la distancia. Para cada estación y cada mes, se coge la temperatura obtenida del WRF en la estación, los valores de temperatura de la estación y el incremento de la temperatura del mar con respecto del año anterior. Suponiendo que el incremento de la temperatura del mar es el 100 por cien del error, se calcula a qué porcentaje corresponde la diferencia de temperaturas del WRF y de la estación, y esto se representa en función de la distancia.

Realizando este proceso se obtiene que las estaciones siguientes quedan distantes del mar una distancia de:

- Murcia: 39Km
- Abia (Almería): 43Km
- Pobra de Trives (Ourense): 120Km
- Cazalla de la Sierra (Sevilla): 120Km
- Oviedo (Asturias): 25Km
- La Molina (Girona): 95Km
- Cabo Peñas (Asturias): 5Km

En primer lugar vemos que el porcentaje de error depende únicamente de la distancia. Para ello tomaremos el caso de la estación de Santander, en el mar Cantábrico, comparado con la estación de Oviedo (cuya estación está a 25Km de la costa); y el caso de la estación de Ibiza, en el Mediterráneo, con la estación de Murcia, a 39Km de la costa.

Para el Mar Cantábrico:

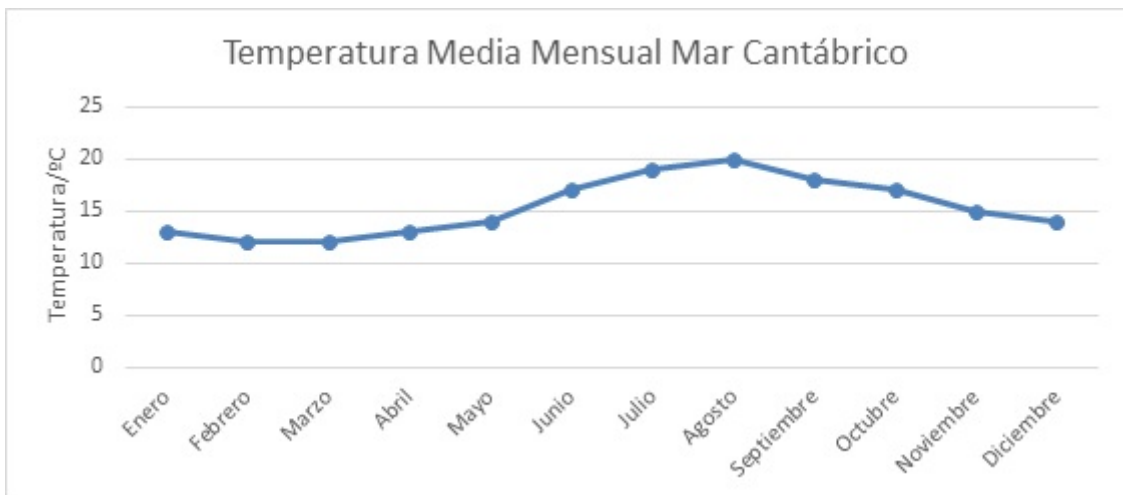


Figura 21: Temperatura media del mar cantábrico en la costa

Temperatura media anual en la superficie del agua: 15.33°C

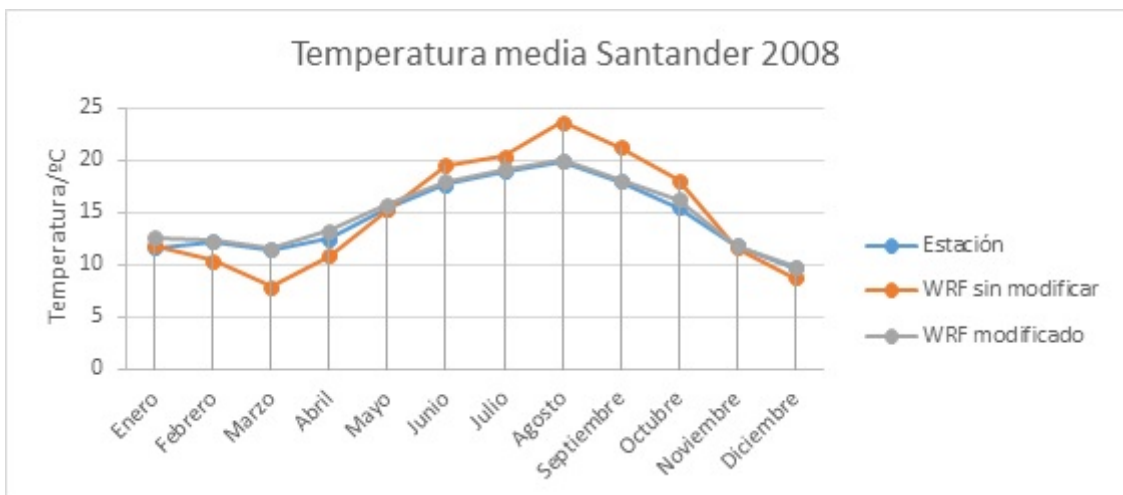


Figura 22: Temperaturas en Santander

<u>Año</u>	<u>Mes</u>	<u>Dato Estación</u>	<u>WRF Sin Modificar</u>	<u>Incremento temperatura mar</u>	<u>WRF Modificado</u>
<b>2008</b>	<u>Enero</u>	11.6	10.59631	-2.33333	12.57453
	<u>Febrero</u>	12.2	11.73291	-3.33333	12.30756
	<u>Marzo</u>	11.4	11.46745	-3.33333	11.54718
	<u>Abril</u>	12.5	11.08604	-2.33333	13.22053
	<u>Mayo</u>	15.4	15.4737	-1.33333	15.76552
	<u>Junio</u>	17.7	19.64244	1.66667	18.01178
	<u>Julio</u>	19	19.78455	3.66667	19.16625
	<u>Agosto</u>	19.9	20.92495	4.66667	20.04674
	<u>Septiembre</u>	18	19.0482	2.66667	18.06163
	<u>Octubre</u>	15.5	17.17513	1.66667	16.26973
	<u>Noviembre</u>	11.8	11.70052	-0.33333	11.84442
	<u>Diciembre</u>	9.7	9.77481	-1.33333	9.781933

Figura 23: Tabla con los valores de las diferentes temperaturas

Ahora vamos a ver qué ocurre con la temperatura en Oviedo:

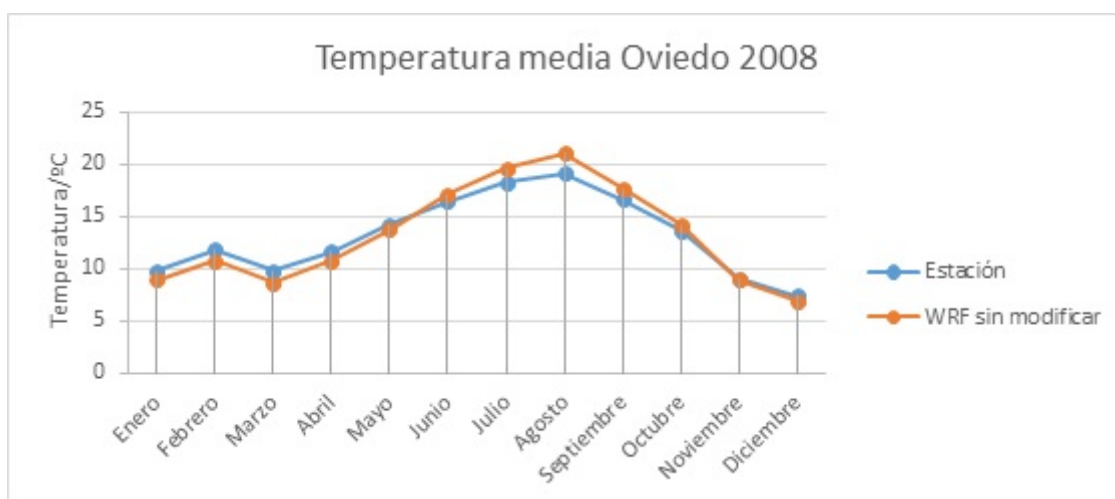


Figura 24: Temperatura en Oviedo

Vemos como, aunque con menos impacto, el error sigue el mismo patrón que en Santander. En los meses de invierno el WRF queda por debajo de lo que sucedió realmente, y en verano por encima.

Si estudiamos el comportamiento de ese error, respecto al valor que hay en la misma costa, vemos que ese error, en Oviedo, e independientemente del mes, es de aproximadamente un 32 por ciento del incremento de la temperatura del mar con respecto a la media de la misma:

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Dato Estacion</b>	<b>WRF sin modificar</b>	<b>Error</b>	<b>Incremento Temperatura Mar</b>	<b>Error %</b>
<b>2008</b>	<u>Enero</u>	9.8	8.968451	-0.83155	-2.33333	35.63782
	<u>Febrero</u>	11.8	10.74726	-1.05274	-3.33333	31.58231
	<u>Marzo</u>	9.8	8.627388	-1.17261	-3.33333	35.17836
	<u>Abril</u>	11.6	10.79439	-0.80561	-2.33333	34.52634
	<u>Mayo</u>	14.2	13.78566	-0.41434	-1.33333	31.0754
	<u>Junio</u>	16.5	17.08842	0.588417	1.666667	35.305
	<u>Julio</u>	18.3	19.61435	1.314346	3.666667	35.84579
	<u>Agosto</u>	19.2	21.066	1.866001	4.666667	39.98574
	<u>Septiembre</u>	16.6	17.67761	1.077612	2.666667	40.41045
	<u>Octubre</u>	13.7	14.24371	0.543713	1.666667	32.6228
	<u>Noviembre</u>	9	8.895737	-0.10426	-0.33333	31.27884
	<u>Diciembre</u>	7.4	6.904339	-0.49566	-1.33333	37.17458
					<b>Error Medio</b>	<b>35.05195</b>

Figura 25: Tabla de error en la simulación para Oviedo

Aplicando esa corrección, es decir, modificando los valores obtenidos del WRF en un 35,05 por ciento del incremento de la temperatura del mar, obtenemos que la gráfica de Oviedo nos queda:

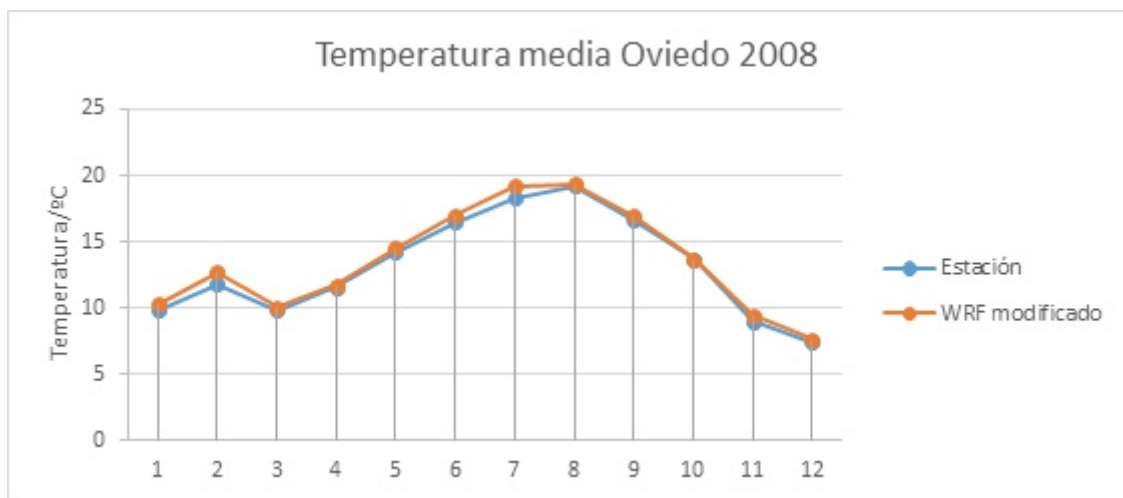


Figura 26: Representación de las temperaturas corregidas en Oviedo

Ahora vamos a realizar este mismo proceso, pero para el Mar Mediterráneo. En primer lugar calculamos en la costa la corrección de la temperatura:



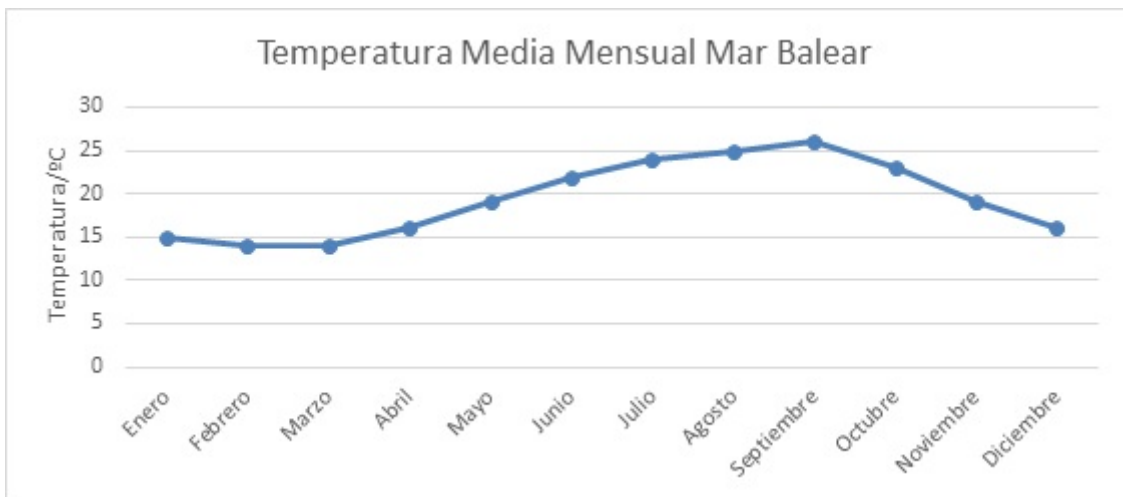


Figura 27: Temperatura del mar balear

Temperatura media anual en la superficie del agua: 19.41°C

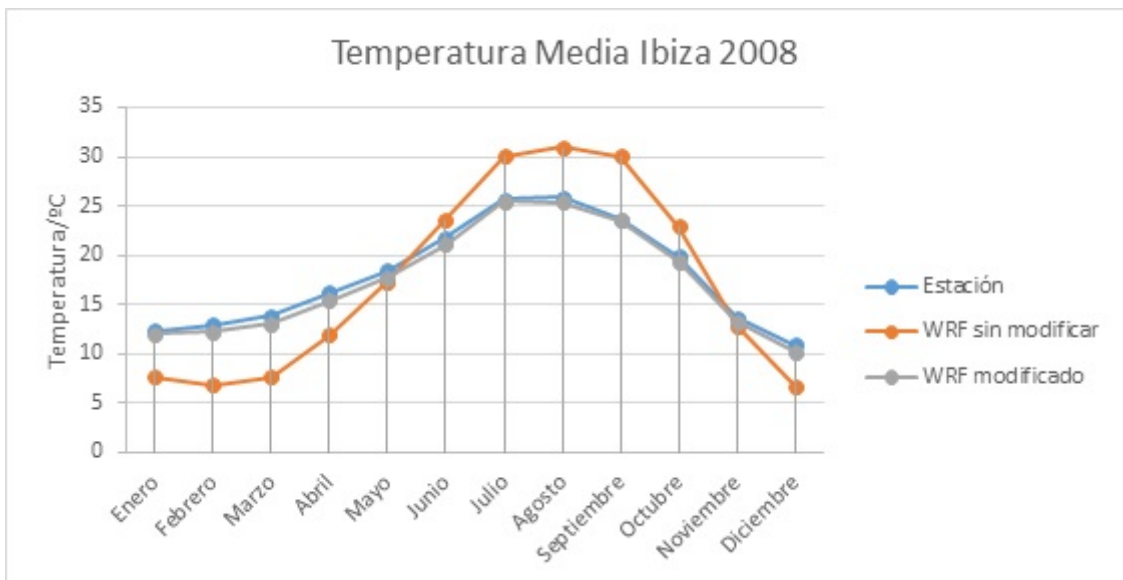


Figura 28: Representación de las temperaturas para Ibiza

<u>Año</u>	<u>Mes</u>	<u>Dato estación</u>	<u>WRF sin modificar</u>	<u>Incremento temperatura mar</u>	<u>WRF Modificado</u>
2008	<u>Enero</u>	12.3	7.648151	-4.41667	12.06482
	<u>Febrero</u>	12.9	6.804034	-5.41667	12.2207
	<u>Marzo</u>	13.9	7.660113	-5.41667	13.07678
	<u>Abril</u>	16.2	11.95909	-3.41667	15.37576
	<u>Mayo</u>	18.4	17.30956	-0.41667	17.72622
	<u>Junio</u>	21.8	23.627	2.583333	21.04367
	<u>Julio</u>	25.7	30.07605	4.583333	25.49271
	<u>Agosto</u>	25.9	30.99921	5.583333	25.41587
	<u>Septiembre</u>	23.6	30.07738	6.583333	23.49404
	<u>Octubre</u>	19.9	22.93726	3.583333	19.35393
	<u>Noviembre</u>	13.7	12.84663	-0.41667	13.2633
	<u>Diciembre</u>	10.9	6.73467	-3.41667	10.15134

Figura 29: Tabla con las diferentes temperaturas en el mar balear

Ahora veamos que ocurre con la temperatura en Murcia:

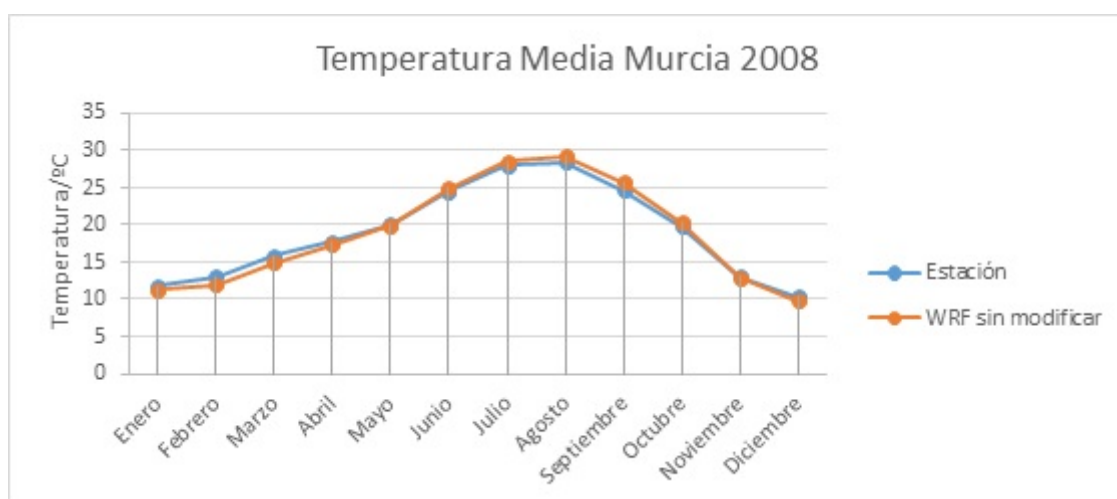


Figura 30: Representación de las temperaturas en Murcia

Nuevamente vemos que, aunque muy mitigado, la gráfica muestra un error con igual patrón. En invierno la temperatura obtenida en el WRF es menos que la real, y en verano mayor. Si estudiamos el comportamiento de ese error con respecto al error en la costa, vuelve a ocurrir lo mismo, ese error sólo depende de la distancia a la costa y, en este caso, al estar más lejos del mar, es de en torno al 14



<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Dato Estación</b>	<b>WRF sin modificar</b>	<b>Error</b>	<b>Incremento Temperatura Mar</b>	<b>Error %</b>
<b>2008</b>	<u>Enero</u>	11.8	11.25359	-0.54641	-4.41667	12.37147
	<u>Febrero</u>	13	11.95243	-1.04757	-5.41667	19.3398
	<u>Marzo</u>	15.9	14.92545	-0.97455	-5.41667	17.99174
	<u>Abril</u>	17.8	17.31869	-0.48131	-3.41667	14.08727
	<u>Mayo</u>	20	19.93359	-0.06641	-0.41667	15.93773
	<u>Junio</u>	24.5	24.87803	0.378027	2.583333	14.6333
	<u>Julio</u>	28	28.56702	0.567016	4.583333	12.37126
	<u>Agosto</u>	28.4	29.22752	0.827518	5.583333	14.82122
	<u>Septiembre</u>	24.7	25.7162	1.016203	6.583333	15.43599
	<u>Octubre</u>	19.8	20.3913	0.5913	3.583333	16.50141
	<u>Noviembre</u>	13	12.95318	-0.04682	-0.41667	11.23621
	<u>Diciembre</u>	10.4	9.832212	-0.56779	-3.41667	16.61818
					<b>Error Medio</b>	<b>15.11213</b>

Figura 31: Tabla con el error en Murcia

Aplicando esta corrección del 15,11 por ciento sobre el incremento de la temperatura del mar a los valores obtenidos del WRF obtenemos que:

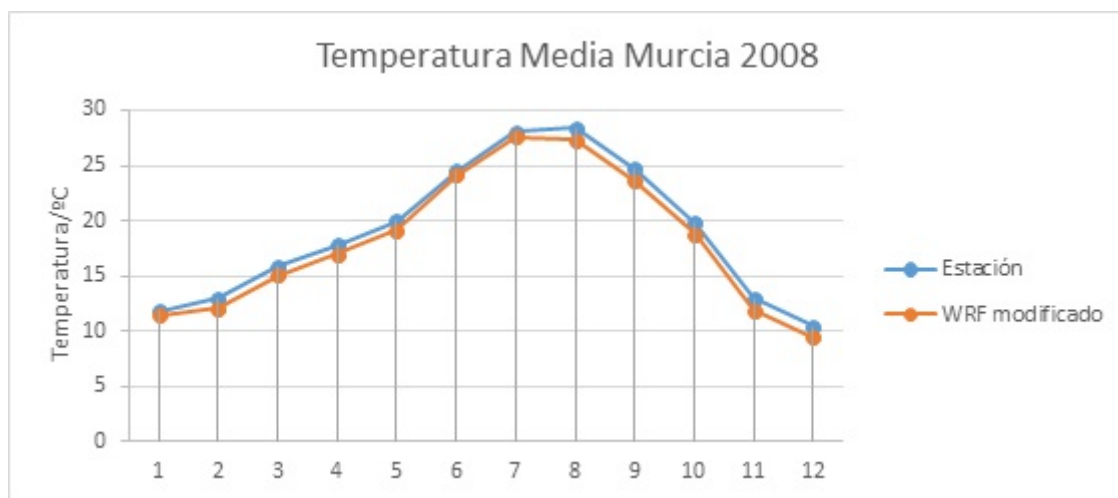


Figura 32: Representación de las temperaturas en Murcia

Para obtener otro valor más e intentar modelizar este error, se ha realizado también este mismo estudio sobre la estación del Cabo de Peñas (Asturias) a 5Km de la costa. Siguiendo el mismo procedimiento, y tomando los valores de temperatura marítima obtenidos para Santander:

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Dato estación</b>	<b>WRF sin modificar</b>	<b>Error</b>	<b>Incremento temperatura mar</b>	<b>Error %</b>
<b>2008</b>	<u>Enero</u>	11.4	9.145255	-2.25475	-2.33333	96.63194
	<u>Febrero</u>	11.5	8.303651	-3.19635	-3.33333	95.89046
	<u>Marzo</u>	10.5	7.450635	-3.04937	-3.33333	91.48096
	<u>Abril</u>	11.3	8.992556	-2.30744	-2.33333	98.89047
	<u>Mayo</u>	13.8	12.55467	-1.24533	-1.33333	93.40004
	<u>Junio</u>	16.2	17.80517	1.605168	1.666667	96.3101
	<u>Julio</u>	17.6	21.22594	3.625943	3.666667	98.88934
	<u>Agosto</u>	18.7	23.31218	4.612176	4.666667	98.83234
	<u>Septiembre</u>	16.8	19.39156	2.591564	2.666667	97.18365
	<u>Octubre</u>	-	18.50777	-	1.666667	-
	<u>Noviembre</u>	-	13.32537	-	-0.33333	-
	<u>Diciembre</u>	-	8.290278	-	-1.33333	-
<b>Error Medio</b>						96.38992

Figura 33: Tabla con los errores en el Cabo de Peñas

Y, aplicando esta corrección del 96.38 por ciento sobre la temperatura del mar:

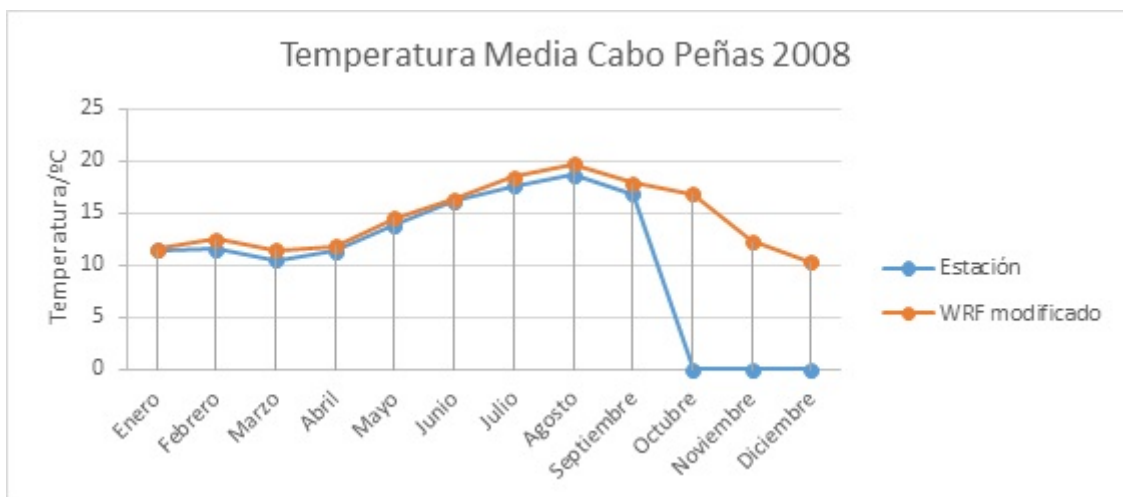


Figura 34: Representación de la temperatura en el Cabo de Peñas

Si repetimos este proceso para las distintas estaciones a distintas distancias de la costa, obtenemos el siguiente ajuste para el porcentaje de corrección en función de la distancia:

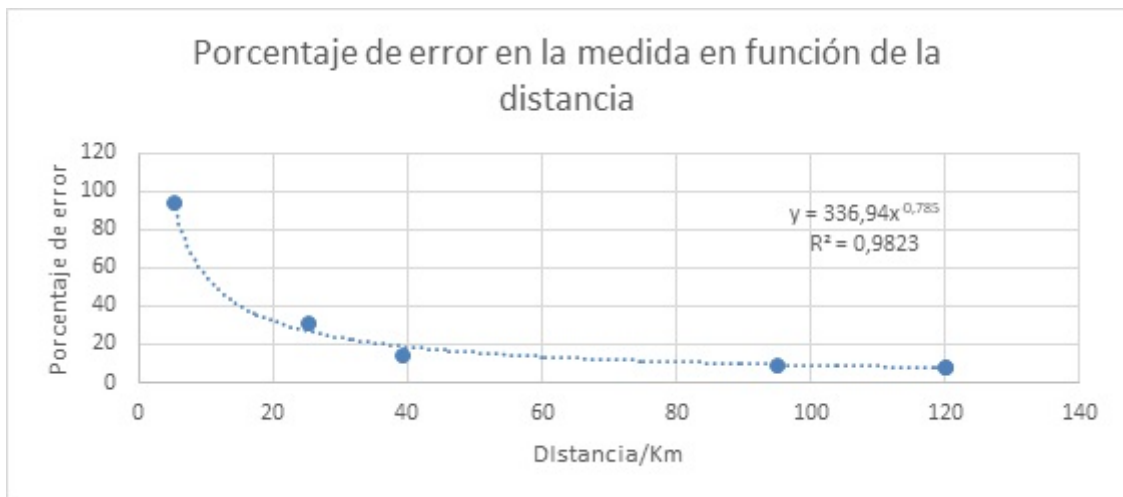


Figura 35: Representación del error asociado a la simulación en función de la distancia

Así se puede ver el comportamiento de este error en función de la distancia a la costa. Cuánto más cerca de ella mayor es el error asociado a la temperatura del agua, y cuanto más nos alejamos de la costa, menor. Cuando la distancia tiende a infinito, este error tiende a cero; pero dado que el error a partir de los 100Km es prácticamente despreciable (Un 5 por ciento de error, en la temperatura, es un error en las décimas de grado) y ya se puede asociar al error propio de los cálculos, y considerar despreciable el error asociado al mar.

Una vez modelizado esto, ya se puede, con los datos de nuestra simulación, obtener las temperaturas adecuadas en cada punto de la península. Así, para las estaciones en la zona intermedia, obtenemos que:

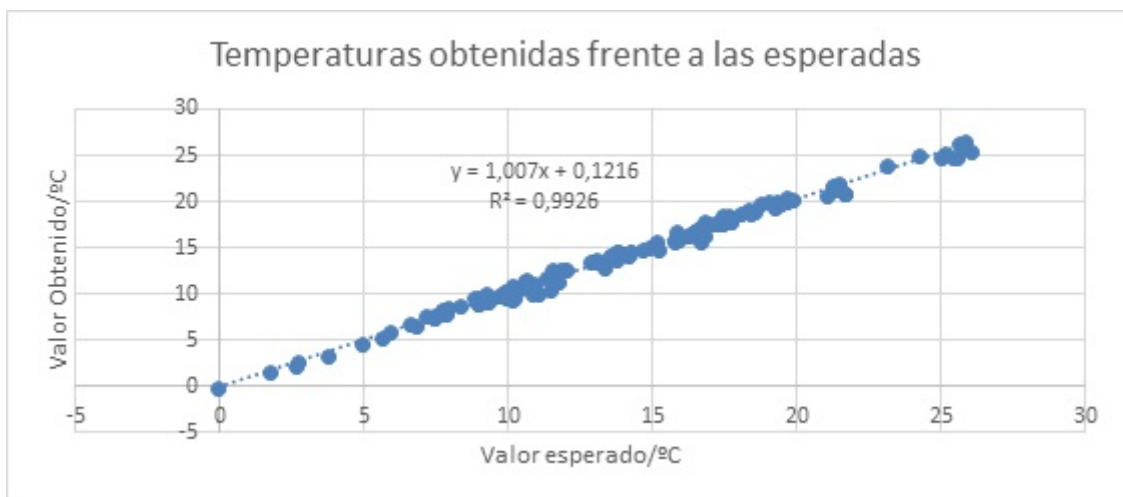


Figura 36: Ajuste lineal de las temperaturas para la zona intermedia

## 6.2. Temperatura mínima media

Siguiendo los mismos procedimientos que en el apartado anterior, se han calculado las temperaturas mínima y máxima medias. También separadas según las 3 regiones, y siguiendo el mismo patrón de error debido a la presencia del mar. Los resultados obtenidos son los siguientes:

### 6.2.1. Zona interior

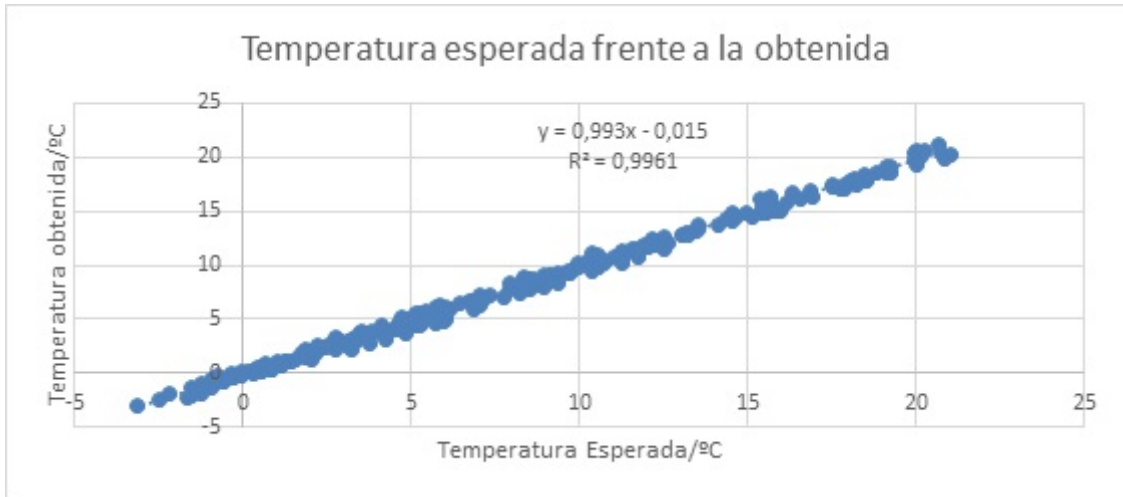


Figura 37: Ajuste lineal de las temperaturas mínimas medias para el interior

### 6.2.2. Zona costera

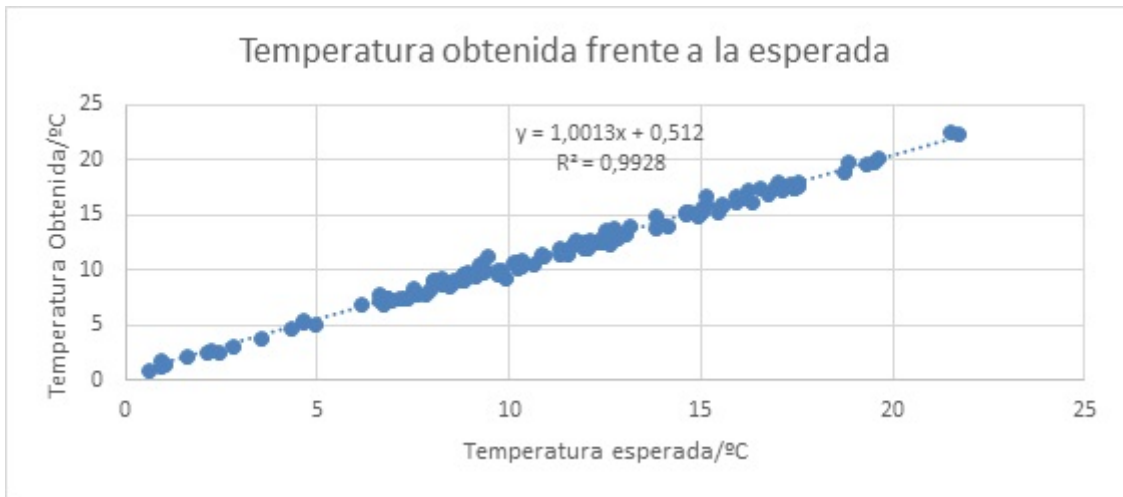


Figura 38: Ajuste lineal para la zona atlántica

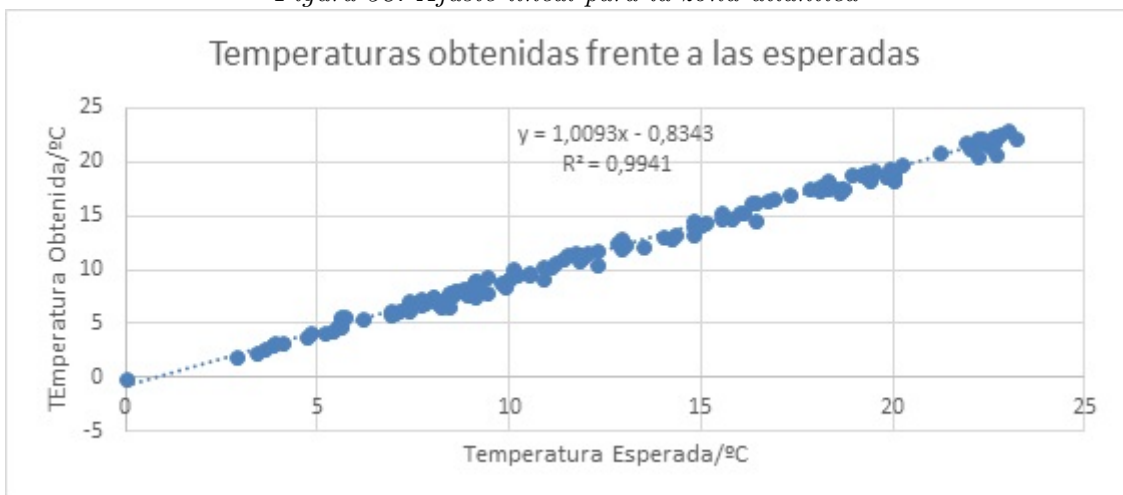


Figura 39: Ajuste lineal para la zona mediterránea

### 6.2.3. Zona intermedia

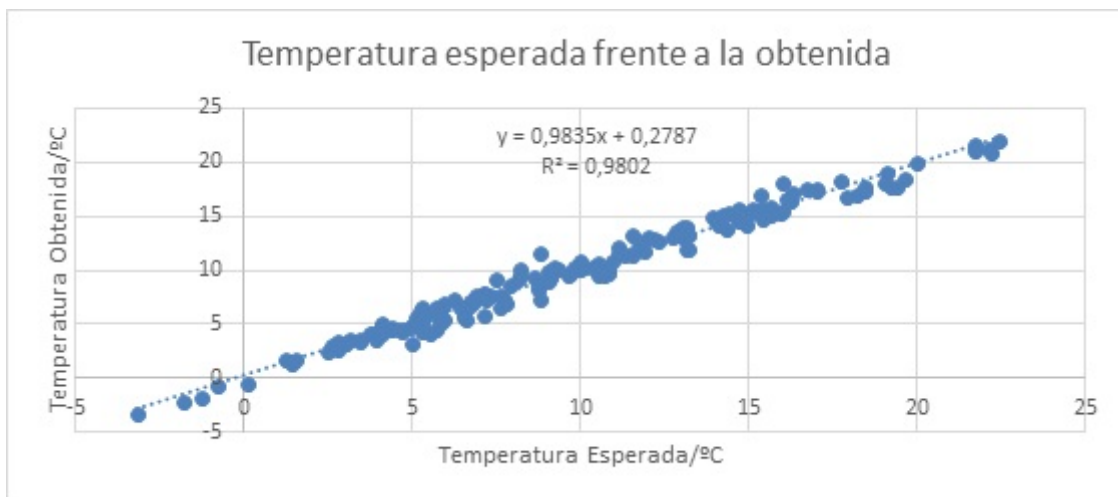


Figura 40: Ajuste lineal para la zona intermedia

### 6.3. Temperatura máxima media

#### 6.3.1. Zona interior

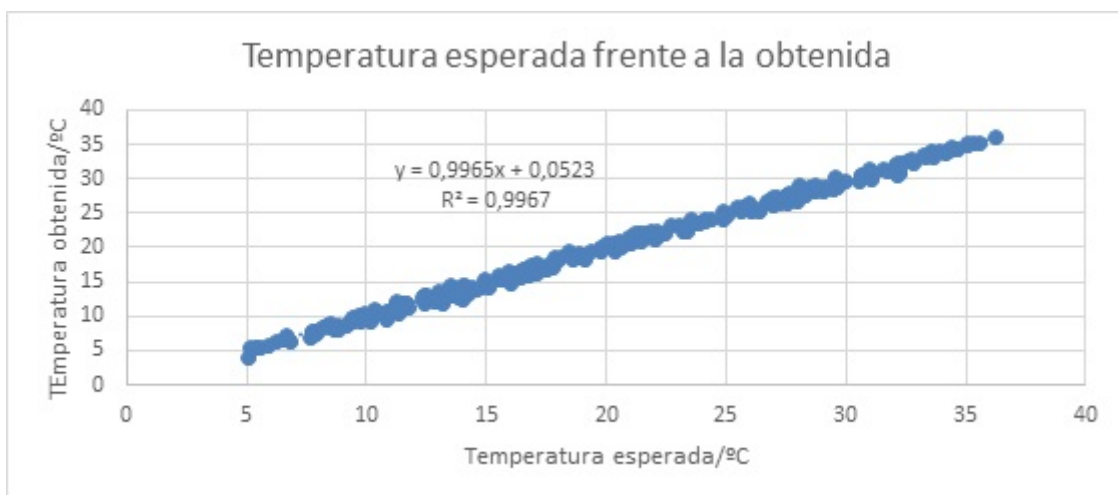


Figura 41: Ajuste lineal para la zona interior

#### 6.3.2. Zona costera

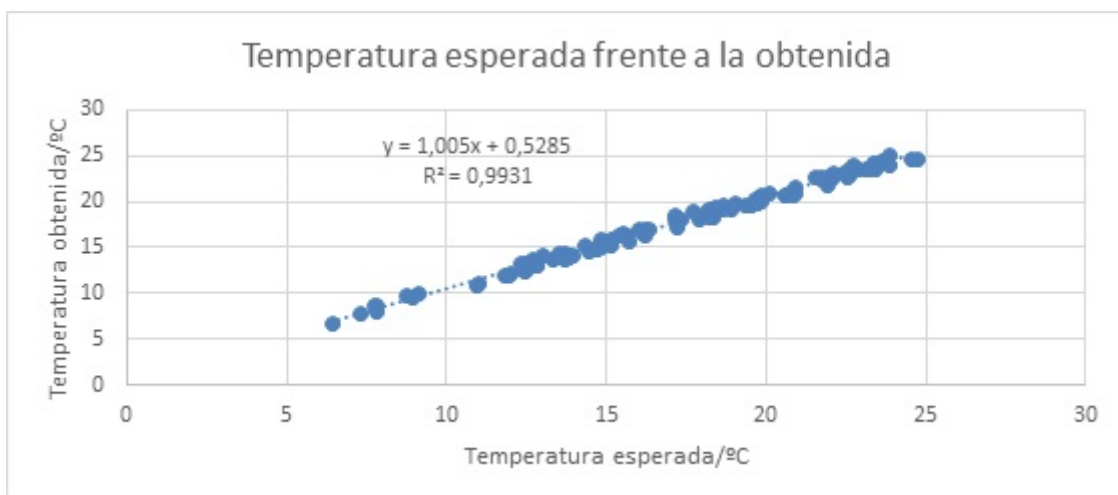


Figura 42: Ajuste lineal para la costa atlántica

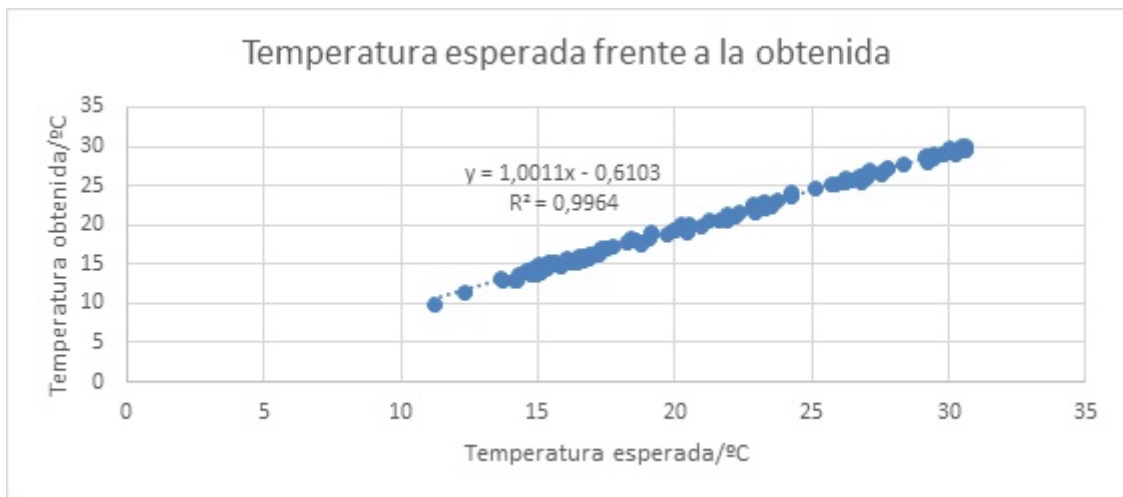


Figura 43: Ajuste lineal para la costa mediterránea

### 6.3.3. Zona intermedia

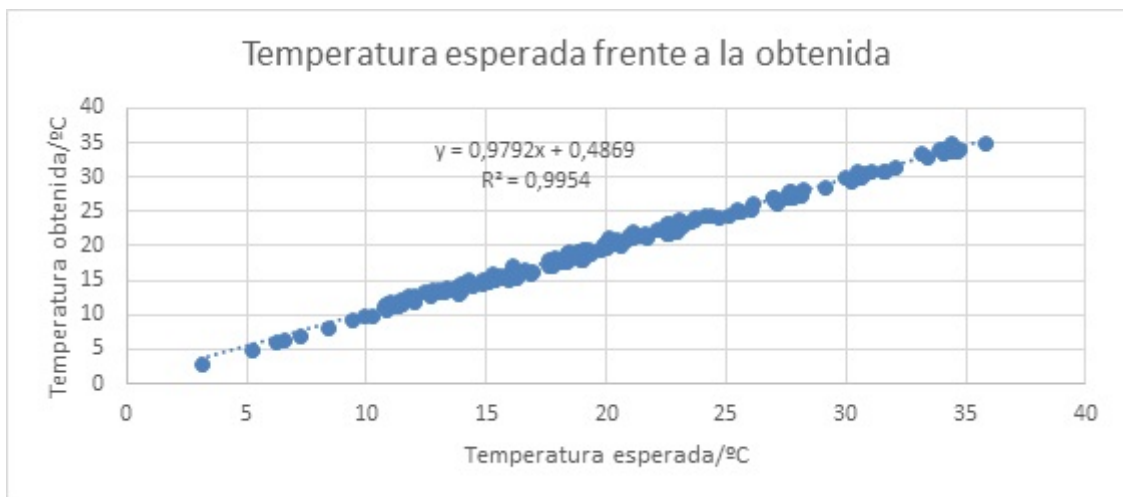


Figura 44: Ajuste lineal para la zona intermedia

## 7. Comentario sobre los resultados y estadística más detallada

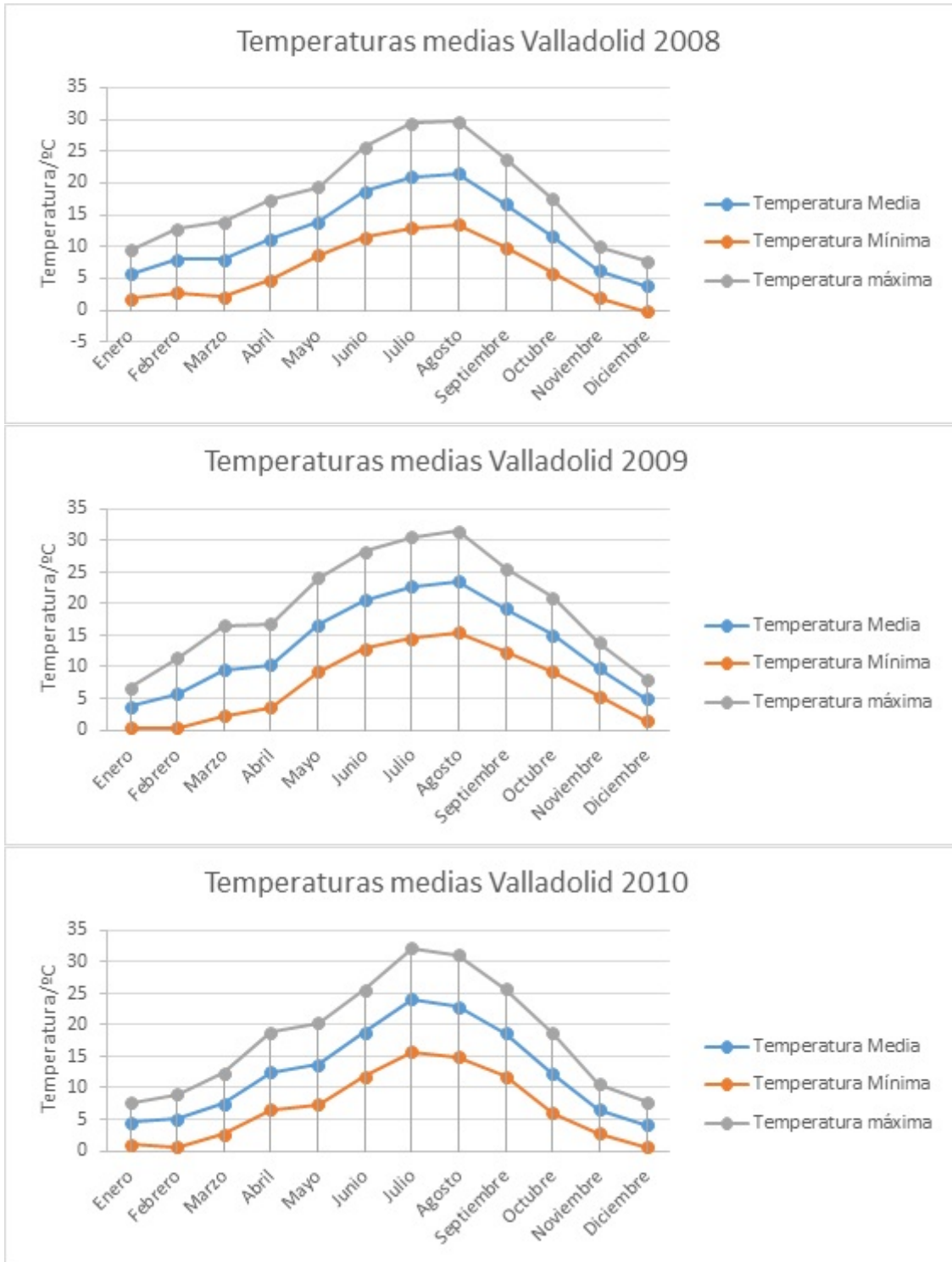
Como ya se ha comentado a la hora del estudio de la temperatura media mensual, la temperatura obtenida en la costa atlántica es siempre superior a la esperada, y en la mediterránea es algo menor. Este patrón se mantiene a la hora del cálculo de las temperaturas medias máximas y mínimas. Por otro lado, la zona que menor error da es la interior, para las tres temperaturas, lo cual es de esperar, dado el error que se ha encontrado en la zona costera y sus consecuencias para lo que hemos llamado zona intermedia.

En general se puede decir que la simulación proporciona poco error. En su conjunto, el valor del corte con el eje de ordenadas de cada gráfica es siempre menor que 1°C, lo cual muestra que las predicciones en temperatura son bastante buenas.

Ahora, con los datos obtenidos en el WRF se pueden hacer distintas evaluaciones estadísticas de temperatura. Dado que el objetivo de este estudio era realizar la simulación y verificarla, vamos a realizar sólo un estudio breve de las temperaturas para la estación de Valladolid, para visualizar los datos obtenidos, para ver el comportamiento de la temperatura en este lugar.



## 7.1. Valladolid



Figuras 45, 46 y 47: Representación de las temperaturas máxima, mínima y media en Valladolid

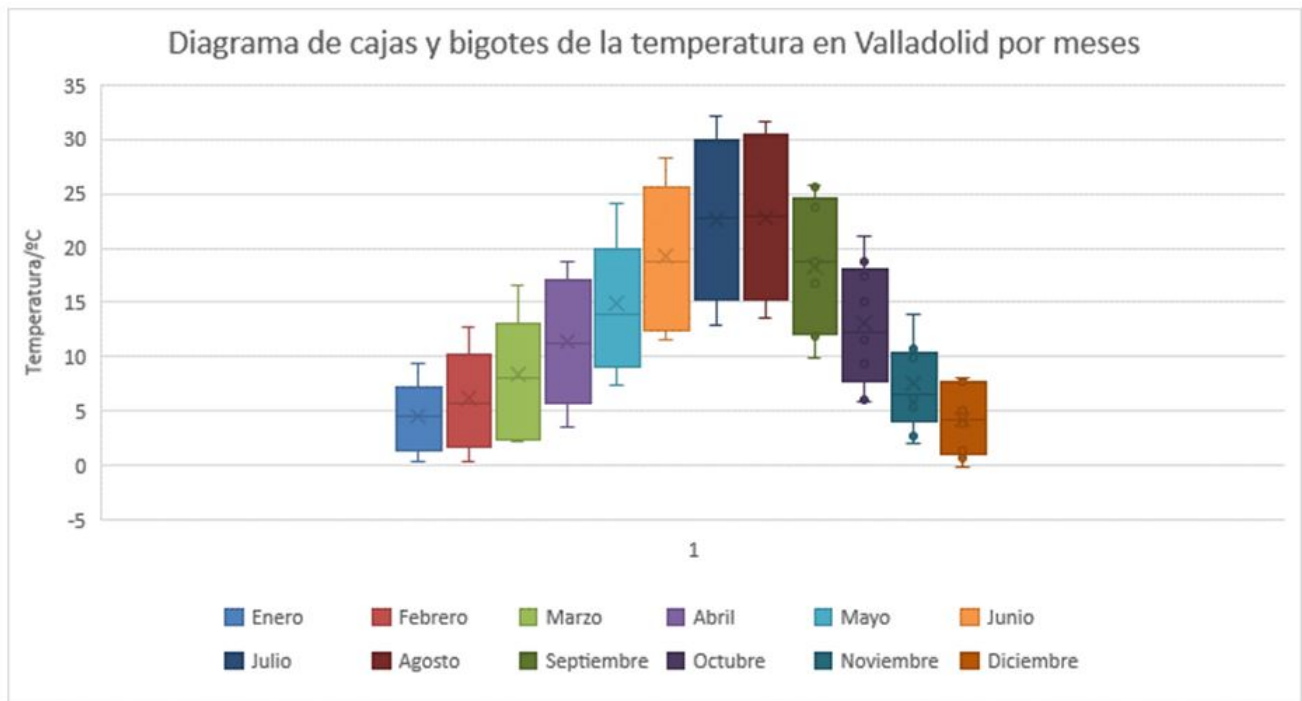


Figura 48: Diagrama de cajas y bigotes para las temperaturas mensuales de Valladolid

Así, con todos los datos que se obtienen del downscaling del WRF, se pueden realizar mejores estadísticas o nuevas investigaciones, con un mayor número de datos.

Además, ahora vamos a ver un par de casos más en detalle. Como ya dijimos, a la hora de realizar la simulación, metíamos como datos de entrada valores meteorológicos reales cada 48 horas. Vamos a ver, comparando con medias diarias, cómo se ve afectada la simulación debido a esto. Tomaremos siempre como primero de los dos días aquel que tiene a sus 00:00 horas los datos reales, de forma que el último dato obtenido el segundo día, a las 22:00 horas, sea el último que se intenta predecir.

Para ello vamos a tomar 3 pares de días consecutivos del año 2010: 15 y 16 de enero; 27 y 28 de abril; 27 y 28 de diciembre. Los días de enero y de diciembre presentan cambios bruscos de temperatura de un día para otro, mientras que la pareja de abril corresponde a días muy estables. Analizaremos la temperatura media diaria, la máxima y la mínima y las horas a las que acontecen las temperaturas máxima y mínima.

AEMET proporciona sólo datos diarios, por lo que esta vez solo podremos representar los datos directos de la simulación en WRF y comparar estos datos con las medias diarias de la agencia estatal.

En las tablas todas las temperaturas se escriben en grados centígrados.



15 y 16 de enero:

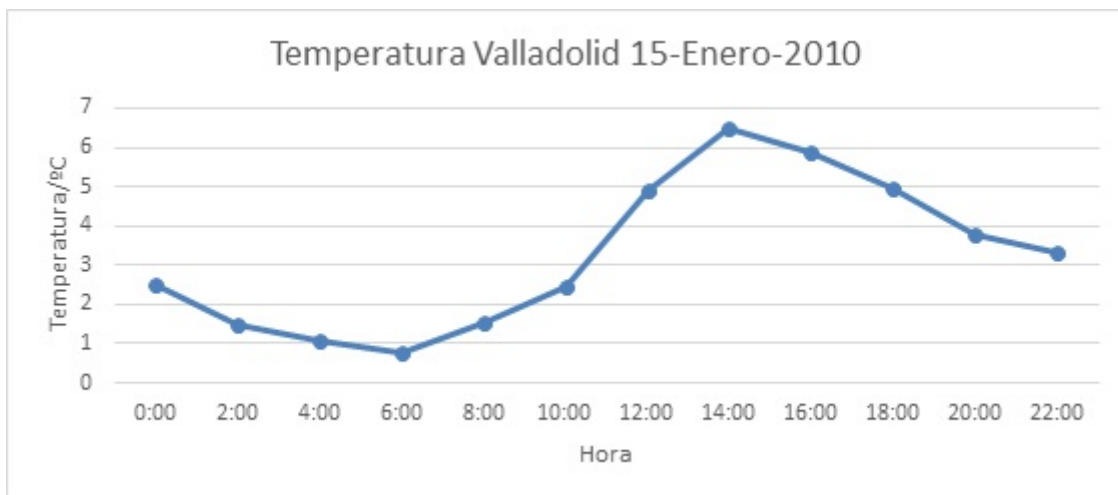


Figura 49: Representación de la temperatura por horas en Valladolid

<u>15-ene-10</u>	<u>Tª Media</u>	<u>Tª mínima</u>	<u>Hora Tmin</u>	<u>Tª Máxima</u>	<u>Hora Tmax</u>
<b>Estación</b>	3.4	0.5	5:30	6.2	15:10
<b>WRF</b>	3.26	0.78	6:00	6.4	14:00

Figura 50: Tabla comparativa de las temperaturas simuladas y reales

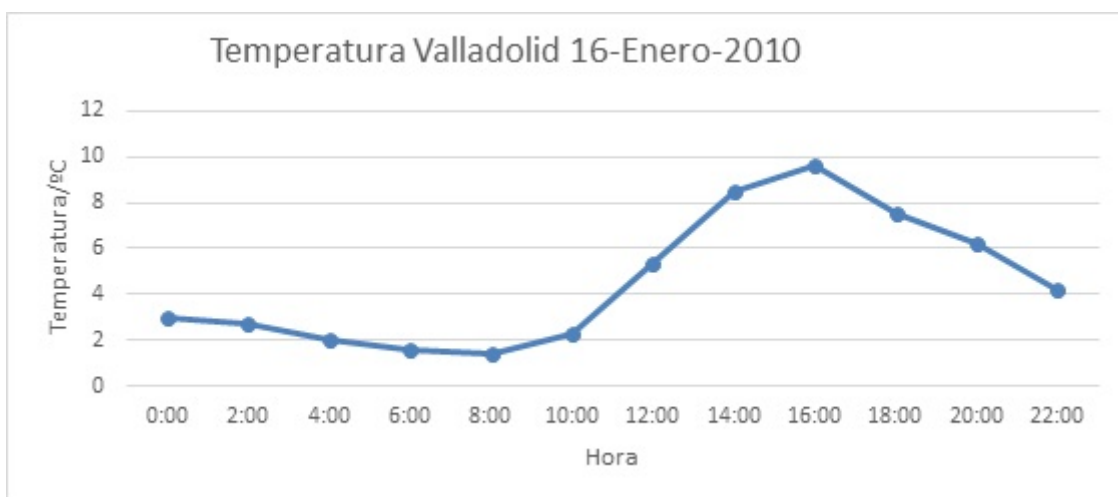


Figura 51: Representación de la temperatura por horas en Valladolid

<u>16-ene-10</u>	<u>Tª Media</u>	<u>Tª mínima</u>	<u>Hora Tmin</u>	<u>Tª Máxima</u>	<u>Hora Tmax</u>
<b>Estación</b>	8	4.8	0:00	11.2	15:15
<b>WRF</b>	4.53	1.38	8:00	9.64	16:00

Figura 52: Tabla comparativa de las temperaturas simuladas y reales

Como podemos ver, en el primer día la simulación resulta bastante precisa. Teniendo en cuenta que esta nos daba datos cada 2 horas y la estación los obtiene cada 5 minutos. Además, es fácil comprobar que las temperaturas son muy parecidas, y que las horas a las que acontecen concuerdan. Sin embargo, esto cambia radicalmente para el segundo día. De un día a otro, la temperatura media (medida por la estación y por tanto lo que sucedió) pasa de 4,5 grados a 8. Es decir, hay un cambio notable. Si comparamos los datos de la simulación con los obtenidos por la estación para el día 16 de enero, es fácil ver como ya los datos no concuerdan. La temperatura media tiene un error muy grande y, aunque la temperatura máxima y su correspondiente hora si se parecen, la temperatura mínima y su hora ni siquiera se parecen.

Ahora veamos lo que ocurre en diciembre de ese mismo año, cuando nuevamente tenemos una pareja de días no muy estables:

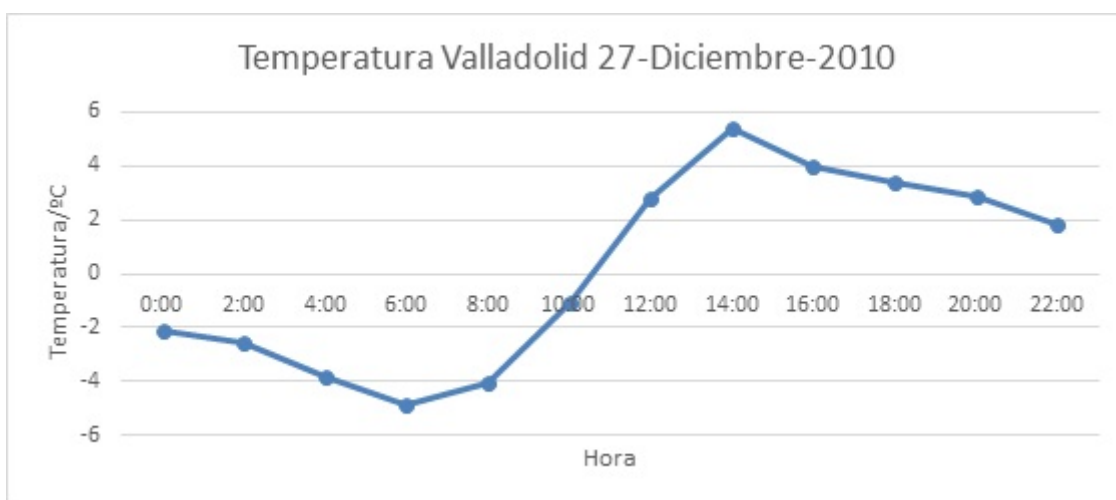


Figura 53: Representación de la temperatura por horas en Valladolid

<u>27-dic-10</u>	<u>Tª Media</u>	<u>Tª mínima</u>	<u>Hora Tmin</u>	<u>Tª Máxima</u>	<u>Hora Tmax</u>
<b>Estación</b>	1	-5.4	6:40	5.6	14:30
<b>WRF</b>	0.16	-4.86	6:00	5.42	14:00

Figura 54: Tabla comparativa de las temperaturas simuladas y reales

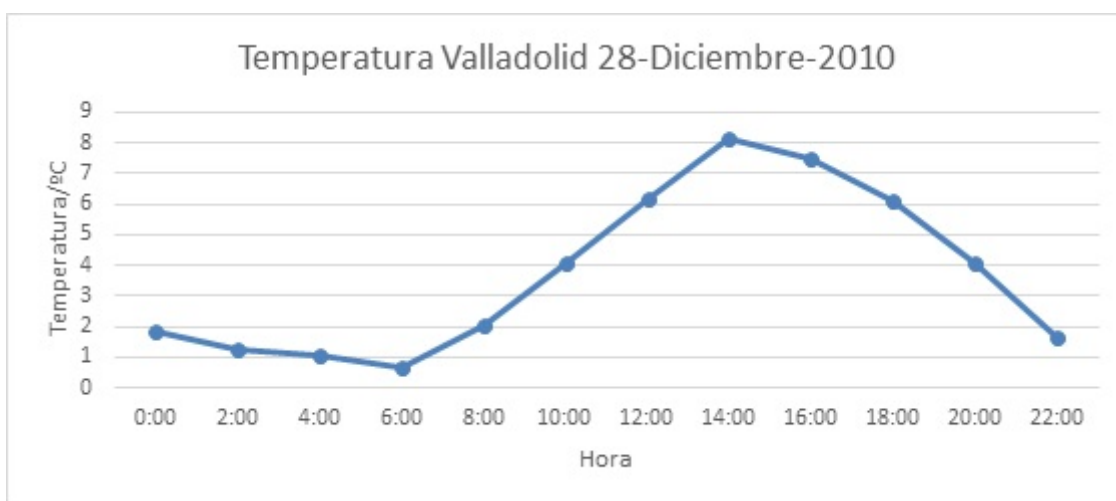


Figura 55: Representación de la temperatura por horas en Valladolid

<b>28-dic-10</b>	<b>Tª Media</b>	<b>Tª mínima</b>	<b>Hora Tmin</b>	<b>Tª Máxima</b>	<b>Hora Tmax</b>
<b>Estación</b>	5.2	0.8	1:00	9.7	14:05
<b>WRF</b>	3.7	0.63	6:00	8.12	14:00

Figura 56: Tabla comparativa de las temperaturas simuladas y reales

Nuevamente tenemos el mismo patrón: el primero de los días las temperaturas y horas coinciden adecuadamente, pero en el segundo día no es así; la temperatura media y la hora de la temperatura mínima divergen mucho. Es decir, si de un día para otro hay un cambio muy brusco de las condiciones meteorológicas, nuestro modelo no es capaz de adaptarse bien. Aunque sí que sigue la tendencia, vemos que de un día para otro las temperaturas sí que suben, no lo hacen en la medida que realmente sucede.

En cambio, y como vamos a ver a continuación, si los dos días consecutivos son estables, el modelo funciona bien.

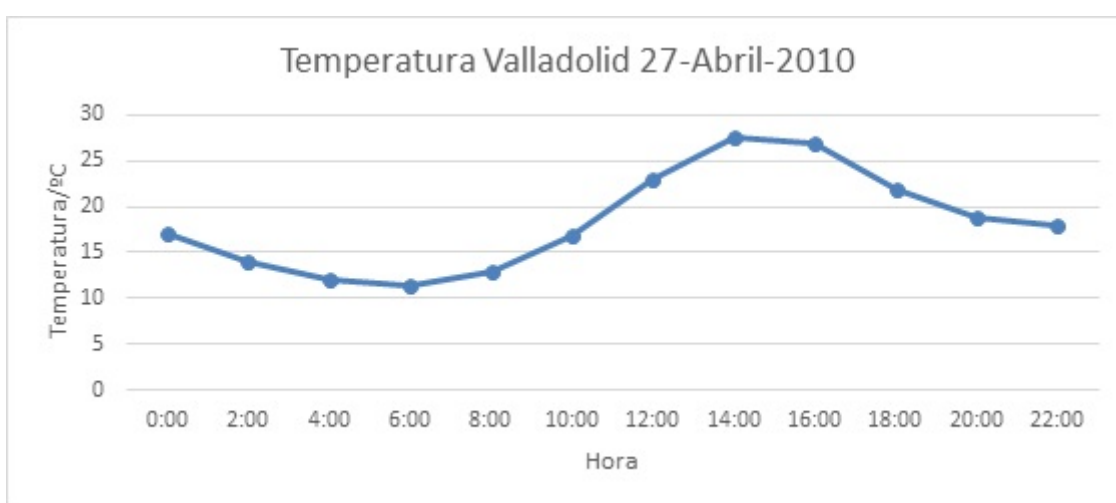


Figura 57: Representación de la temperatura por horas en Valladolid

<b>27-abr-10</b>	<b>Tª Media</b>	<b>Tª mínima</b>	<b>Hora Tmin</b>	<b>Tª Máxima</b>	<b>Hora Tmax</b>
<b>Estación</b>	18.8	10.6	6:00	27	14:30
<b>WRF</b>	18.34	11.46	6:00	27.66	14:00

Figura 58: Tabla comparativa de las temperaturas simuladas y reales

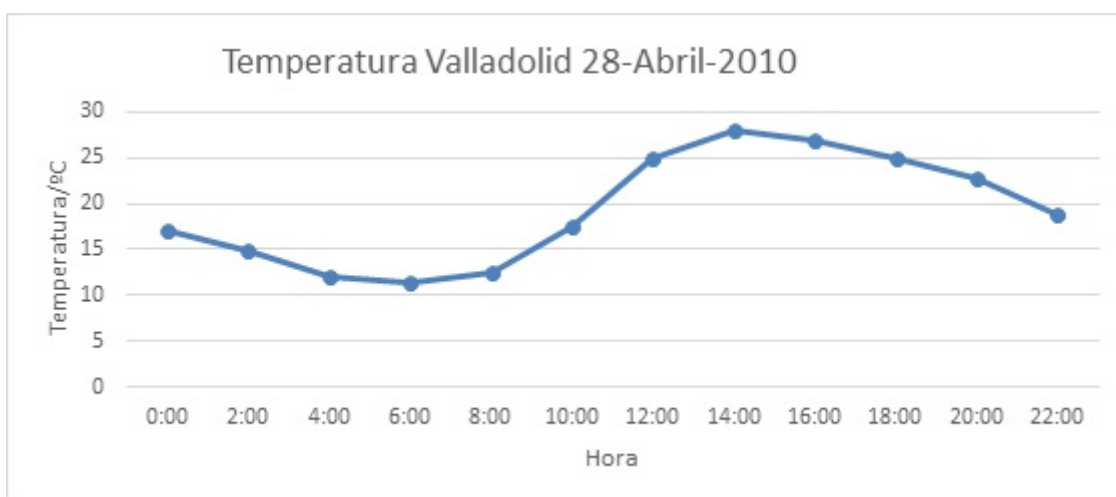


Figura 59: Representación de la temperatura por horas en Valladolid

<b>28-abr-10</b>	<b>Tª Media</b>	<b>Tª mínima</b>	<b>Hora Tmin</b>	<b>Tª Máxima</b>	<b>Hora Tmax</b>
<b>Estación</b>	19.2	10.6	5:30	27.8	14:30
<b>WRF</b>	19.28	11.38	6:00	28.04	14:00

Figura 60: Tabla comparativa de las temperaturas simuladas y reales

En este caso es fácil comprobar como las temperaturas coinciden y, además, también las horas se adecuan correctamente.

## 8. Conclusiones y trabajo futuro

Las conclusiones que se han sacado de este trabajo son que la temperatura, en términos generales, es una magnitud relativamente fácil de predecir con precisión con un par de días de antelación.

De los últimos apartados podemos concluir que el modelo, cuando se trata de realizar medias mensuales, lo hace de forma correcta; debido a que la media de muchos valores tiende a estabilizarse. En cambio, cuando queremos profundizar más e ir al detalle la cosa cambia. Vemos que un modelo matemático al final no es más que la resolución de una serie de ecuaciones y, ante cambios paulatinos, funciona muy bien. No obstante, si hay un cambio brusco en un momento determinado, aunque el modelo tienda a realizar ese cambio, lo hace mucho más lentamente de lo que sucede en realidad. Así, y en general, los modelos predictivos meteorológicos son buenos cuando no se enfrentan a situaciones de cambios extremos en periodos muy cortos de tiempo. Cuanto más tiempo se quiere predecir, más margen de error hay; pero además, cuanto mayor sea el cambio que se avecina, mayor va a ser el incremento de ese error y en menos tiempo. Es decir, si hay una semana de ola de calor en verano con temperaturas elevadas mantenidas y ya estando dentro de la anomalía los cálculos son fiables. Sin embargo, si estando en unas temperaturas normales se quiere predecir la entrada de la ola de calor, que generalmente llega de un día para otro con subidas de 4 o 5 grados, este tipo de modelos no son la mejor opción a considerar. Igual para olas de frío, o en general para cualquier acontecimiento meteorológico que haga que las cosas cambien bruscamente y en periodos cortos de tiempo. Por ejemplo, una tormenta de verano. Ésta se genera al final de los días de bochorno y en cuestión de media hora ya ha desaparecido, lo cual hace que estos modelos no sean capaces de predecir con exactitud dónde y cuándo surgirán.

Además, se ha visto como cuanto más precisión quieres a la hora de calcular algo, más tiempo se requiere. Para poder calcular las temperaturas correspondientes a cada estación, se ha tenido que hacer una interpolación de los datos en dos dimensiones, debido a que en este trabajo la resolución espacial de la simulación era mucho más grande de lo que en un principio se pretendía. Esto se debió a que, o se reducía esta resolución, o el tiempo necesario para realizar los cálculos era excesivamente grande.

A nivel personal este trabajo ha significado una lección sobre cómo funciona realmente la investigación. En la carrera, aunque hay laboratorios prácticos, normalmente se dispone de un guión donde más o menos se te guía en el proceso. Aquí, por primera vez, me he encarado a un problema real y, aunque con ayuda, no había un guión predefinido y se sabe cuál debe ser el resultado. El encarar problemas reales, obtener datos de estaciones, buscarse uno la vida para obtener aquello que necesita es una experiencia que en la carrera es difícil de obtener. Además, me ha permitido trabajar en un laboratorio de verdad, con gente que debe hacer un trabajo, tener unos horarios... Y así realizar, de una manera paulatina, el paso de un laboratorio de universidad a uno laboral, viendo cómo funcionan las cosas en

el mundo que se supone en el futuro me espera y conociendo gente nueva de la cual he podido aprender.

De cara al futuro este trabajo tiene varios puntos de mejora y varias líneas para continuar con él. Al igual que se ha hecho un estudio de la temperatura, en los datos obtenidos del WRF se dispone de precipitación, días de sol, de nubes, nieblas, humedad del aire. . . Una infinidad de parámetros (todos ellos de ámbito meteorológico) de los cuales se podría hacer un estudio similar a este. Sin embargo, al ser un programa de código libre, en nuestro caso ha aparecido el problema derivado de la temperatura en la costa, y posiblemente éste se encuentre (o afecte de alguna manera) al resto de parámetros. En adelante, se puede intentar profundizar en el código del programa para ver realmente de qué trata ese error, cambiar la versión y volver a realizar la simulación, cambiar al núcleo NMM-WRF y ver en qué cambia y cómo.

## 9. Bibliografía y referencias

- Kalnay, E. and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, Z. Liu, J. Berner, W. Wang, J. G. Powers, M. G. Duda, D. M. Barker, and X.-Y. Huang, 2019: A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. doi:10.5065/1dfh-6p97
- Agencia Estatal de Meteorología Española (AEMET). (2019). Datos del servicio Open Data sobre datos meteorológicos
- Brown, J. M., S. Benjamin, T. G. Smirnova, G. A. Grell, L. R. Bernardet, L. B. Nance, R. S. Collander, and C. W. Harrop, (2007): Rapid-Refresh Core Test: aspects of WRF-NMM and WRF-ARW forecast performance relevant to the Rapid-Refresh application. 22st Conference on Wea. Anal. Forec., Park City, UT, Amer. Meteor.Soc.
- L. Bernardet, J. Wolf, L. Nance, A. Loughe, B. Weatherhead, E. Gilleland2 Brown, 2006: Comparison between WRF-ARW and WRF-NMM objective forecast verification scores.
- Gallus WA, Bresch JF (2006) Comparison of impacts of WRF dynamic core, physics package, and initial conditions on warm season rainfall forecasts. *Mon Weather Rev* 134(9):2632–2641