



---

**Universidad de Valladolid**

Facultad de Ciencias

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

Grado en Física

**Estudio del cambio climático mediante el análisis de la  
temperatura**

*Autor: Irene Fernández García*

*Tutor/es: Isidro A. Pérez Bartolomé*

*María Luisa Sánchez Gómez*

*Gracias al Gobierno de Navarra por la disposición de sus datos.  
A mis tutores, M<sup>o</sup> Luisa Sánchez e Isidro A. Pérez,  
por los nuevos puntos de vista y conocimientos adquiridos.  
Gracias porque han supuesto querer continuar mis estudios en este campo.  
Finalmente, gracias a todos aquellos que me han acompañado y que con su apoyo  
han conseguido que presentar este trabajo sea una realidad.*

# ÍNDICE

**Abstract ..... 5**

**Introducción..... 7**

## **Capítulo I**

### **Área de estudio**

**1.1. Características geográficas de Navarra ..... 12**

**1.2. Características climáticas de Navarra ..... 12**

## **Capítulo II**

### **Descripción experimental**

**2.1. Obtención de datos ..... 17**

**2.2. Diagrama de selección de datos..... 19**

**2.3. Mapa de alturas de las estaciones ..... 20**

## **Capítulo III**

### **Estudio de la temperatura mediante indicadores estadísticos**

**3.1. Definición de indicadores estadísticos ..... 23**

**3.2. Significación estadística del coeficiente de correlación ..... 25**

**3.3. Medianas de los indicadores ..... 26**

**3.4. Presentación de resultados para los indicadores estadísticos ..... 27**

**3.4.1. Medianas de la temperatura ..... 27**

**3.4.2. Rango intercuartílico IQR ..... 29**

**3.4.3. Sesgo ..... 31**

**3.4.4. Curtosis ..... 33**

## Capítulo IV

### Tendencia de la temperatura mediante un modelo armónico

4.1.	Coeficiente $B_0$ . Tendencia de la temperatura en 10 años.....	38
4.2.	Coeficiente $c$ . Amplitud anual de la temperatura .....	40
4.3.	Coeficiente $d$ . Crecimiento con el tiempo .....	42
4.4.	Coeficiente $D_0$ . Variación lineal de la amplitud con el tiempo .....	44
	Conclusiones. ....	46
	Futuras líneas de estudio.....	46
	Referencias .....	49
	Lista de figuras y tablas .....	52

# Abstract

*The current study is based on the temperature evolution in Navarra, a region located in northern Spain, which was chosen due to its extensive network of weather stations. 51 automatic weather stations were selected since observations during a 10-year period, from 2005 to 2014, were available.*

*Maximum and minimum temperatures of the day in every station were analysed in two sections.*

*In the first section both temperatures are described by means of location, spread, symmetry and flattening statistics. Noticeable results are obtained: a decrease of 9°C per km for the maximum temperature, a change with the latitude for the interquartile range and kurtosis and a great spread of the skewness.*

*The second section is dedicated to the analysis of the temperature trend, which has been studied with a model with one linear component and one harmonic component. The most noticeable results are an increase of the temperature around 0.3°C in ten years, a change with the latitude observed for the annual cycle amplitude and its decrease of about 0.9°C.*

A lo largo del siguiente trabajo vamos a realizar un estudio del cambio de temperatura en la Comunidad de Navarra. Hemos elegido esta región por su extensa red de estaciones meteorológicas. Han sido seleccionadas 51 estaciones automáticas de las que disponemos datos referidos a un periodo de 10 años completos, desde 2005 hasta 2014.

El estudio se realizará para temperaturas máximas y mínimas diarias de cada estación y su análisis se ha dividido en dos partes.

En la primera se describen ambas temperaturas mediante indicadores estadísticos de posición, dispersión, simetría y aplanamiento. Como resultado se ha obtenido un acusado decremento de la temperatura máxima con la altura de 9°C por kilómetro, una variación latitudinal del rango intercuartílico y la curtosis, y una gran dispersión del sesgo.

La segunda parte está dedicada al análisis de la tendencia de la temperatura, realizado mediante un modelo con parte lineal y parte armónica. Como resultado hemos obtenido que la temperatura ha aumentado casi 0,3°C en diez años; la amplitud del ciclo anual presenta una dependencia latitudinal y ha decrecido en torno a los 0,9°C en los diez años seleccionados.

# Introducción

En los últimos años la preocupación ante el cambio climático ha aumentado de manera considerable, suponiendo que este fenómeno sea uno de los más relevantes en la actualidad, ya que es, además, un proceso a escala planetaria. Se ha estimado que en el periodo de 1948 a 2010 el 65% de la superficie continental mostró un calentamiento significativo, llegando a ser, cada diez años, de 0,32°C en la Antártida y de 0,21°C en la parte central de África. Solo el 3% de la superficie continental se vio afectada por un enfriamiento significativo (Sun et al, 2014).

Uno de los gases directamente involucrados en el calentamiento es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) cuyas fuentes pueden ser antropogénicas, apareciendo esencialmente en los procesos de combustión como el tráfico automovilístico en las ciudades o las centrales térmicas, y naturales, entre las que se encuentran el suelo y sus cultivos. (Buragiene et al., 2015).

Sin embargo, las emisiones de gases responsables del efecto invernadero no son las únicas causas del cambio climático pues hoy sabemos que el cambio en el uso del suelo (a causa de la deforestación) también puede tener efectos en el clima. La deforestación en áreas tropicales determinaría un decremento en la evapotranspiración que conduciría a mayores temperaturas, mientras que en áreas boreales (de inviernos largos y fríos), una deforestación similar incrementaría el albedo durante el invierno debido a la capa de nieve que haría bajar las temperaturas. El impacto de la deforestación en zonas templadas aún no ha sido suficientemente explorado pero recientes estudios en el noreste de China revelan que podría determinar un decremento de la temperatura de alrededor de 4 ó 5°C en zonas húmedas (Yu et al., 2015).

Por otra parte el cambio climático tiene distintos efectos. Para estudiarlos se han utilizado modelos que, con los datos conocidos, simulan condiciones en el futuro. Uno de ellos ha permitido conocer las condiciones hidrológicas en una cuenca semiárida del centro de Arizona en los periodos 1990 - 2000 y 2013 - 2040, determinando, entre otros resultados, un incremento en la temperatura del aire de 1,2°C o un incremento en la cantidad de precipitación de 2,4 veces (Hawkins et al., 2015). Otro modelo ha permitido simular escenarios para el periodo 2046 - 2065 en la meseta tibetana, cuyos resultados han mostrado aumentos tanto en la temperatura del aire como en la precipitación anual del clima en el futuro (Liu et al., 2015).

Otro de los efectos del cambio climático es la expansión de las zonas secas. Se sabe que en el norte de China, la superficie de las zonas secas en el periodo 1994 - 2008 es un 12% superior a la del periodo 1948 - 1962 (Li et al., 2015).

En cuanto a las repercusiones en la agricultura, estudios realizados en la cuenca del río Guadiana en Portugal han concluido que cultivos como olivos y viñedos, que están bien adaptados a las condiciones mediterráneas, son menos sensibles al cambio climático, mientras que cultivos que en este momento son importantes consumidores de agua de irrigación, como maíz, pasto y huertas, necesitarán un aumento del riego (Valverde et al., 2015).

Además del efecto del cambio climático sobre la superficie sólida, el incremento de la temperatura del agua también impactará significativamente en la distribución y vida de las especies marinas. Por ejemplo, ya se han estimado acusadas pérdidas de hábitat inducidas por la temperatura para el atún azul como larva y como adulto en sus zonas de desove del norte del golfo de Méjico a la par que la idoneidad del hábitat aumentó con temperaturas cálidas para el atún rayado (Muhling et al., 2015). También sabemos que especies en peligro, como el mejillón *Margaritifera margaritifera*, pueden verse amenazadas por las disminuciones calculadas en la precipitación que se manifiestan en el flujo de los ríos o las profundidades de los lugares en que viven, que pueden situarse por debajo de los niveles requeridos por estas especies (Santos et al., 2015).

El ser humano, en consecuencia, tampoco es ajeno a la influencia del cambio climático. Se ha estimado que algunas condiciones relativamente poco comunes, que determinan una baja mortalidad, pueden ser altamente sensibles al calor (Kim et al., 2015). Se sabe que los efectos negativos del calentamiento global indican en el tracto gastrointestinal y en el sistema cardiopulmonar. Además, el riesgo de enfermedades infecciosas como el tífus, cólera, malaria, dengue o la fiebre del Nilo occidental se incrementa a consecuencia del cambio climático. Por el contrario, el calentamiento en latitudes medias consigue reducir las epidemias relacionadas con las bajas temperaturas, como pueden ser la neumonía, bronquitis y artritis, aunque se presenta improbable que contrarreste los inconvenientes asociados al calentamiento (Franchini y Mannucci, 2015).

De cara a llevar a cabo estudios ambientales, la temperatura del aire es uno de los indicadores más importantes del clima por lo que el conocimiento de su cambio es esencial. El cambio en la temperatura del aire se puede estudiar tanto por el análisis del punto de cambio (Shirvani et al., 2015) como por la investigación de la tendencia. En ocasiones se utilizan procedimientos elaborados como el test de la tendencia de Mann-Kendall o la pendiente de Sen (Gocic y Trajkovic, 2013). Sin embargo, en este trabajo nos planteamos estudiar la evolución de la temperatura mediante un procedimiento relativamente sencillo basado en una regresión lineal múltiple.

Un análisis riguroso de la temperatura debe estar apoyado por una red de estaciones de medida suficientemente densa en la zona de estudio que, además, disponga de series de datos con dilatada extensión temporal. En ello basamos el Capítulo II de este trabajo, que hemos dividido en dos partes: la primera está dedicada a la descripción experimental, que comprende tanto las características de las estaciones de medida como los datos que registran, lo que nos permite plantear un diagrama de selección de datos. En la segunda parte un mapa de alturas de Navarra nos permitirá ver la red de estaciones finalmente seleccionadas.

El Capítulo III está dedicado a la descripción de la temperatura mediante indicadores estadísticos. Para ello, en la primera parte del capítulo se definen los indicadores de posición, dispersión, simetría y aplanamiento y en la segunda parte se presentan los resultados de los análisis de las temperaturas máxima y mínima. Enfatizaremos las representaciones gráficas como método principal para comunicar la gran cantidad de información manejada. Se excluye el cálculo de tendencias en este apartado con el propósito de conocer mejor las variables que manejamos.

El Capítulo IV se centra en el análisis de tendencias de las distribuciones de temperatura mediante un ajuste de funciones. Del mismo modo que en el Capítulo III, los resultados de los valores de los coeficientes empleados en el ajuste de las temperaturas se presentarán gráficamente para después compararlos, valorando su peso relativo y contrastándolos con los recogidos en la bibliografía para conocer el grado de acuerdo entre los coeficientes calculados en este estudio con los obtenidos en otros lugares.

# **Capítulo I**

## **Área de estudio**

## 1.1. Características geográficas de Navarra

La superficie de Navarra abarca en torno a los 10.400 km<sup>2</sup> ocupando la zona comprendida entre el extremo occidental de los Pirineos y el río Ebro, muy próxima al mar Cantábrico, a unos 42° de latitud norte. En su relieve se diferencian dos zonas: la Montaña, en la mitad septentrional caracterizada por la orografía pirenaica y cantábrica, y la Ribera, que cuenta con grandes llanos y suaves relieves propios de la depresión del valle del Ebro. (<http://meteo.navarra.es/climatologia/#A>)

## 1.2. Características climáticas de Navarra

El clima de Navarra se caracteriza por la gran cantidad de matices climáticos que se encuentran, pudiendo ser la Comunidad Autónoma peninsular con mayor riqueza climática debido a su pequeña extensión.

Utilizaremos la clasificación de Köppen para diferenciar los distintos climas de la región. Esta clasificación se definió hace más de 100 años y sigue siendo una de las más usadas en estudios climatológicos de todo el mundo. Se basa en definir los distintos tipos de clima a partir de los valores medios mensuales de precipitación y de temperatura. Se diferencian cinco tipos generales de climas: tipo A, climas tropicales; tipo B, climas secos; tipo C, climas templados; tipo D, climas fríos y tipo E, climas polares. Tanto los climas de tipo A como los de tipo E no aparecen en nuestra área, por lo que nos centraremos en el resto.

Basándonos en la clasificación que aparece en la web de Navarra (<http://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm>) en el presente estudio se ha seguido el esquema propuesto por Köppen en su última revisión de 1936, conocido como clasificación de Köppen-Geiger, en el que se eligió como límite de temperatura para separar los climas templados y fríos C y D los 0 °C, en vez de los -3 °C que se utilizaban en la clasificación original.

(<http://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/publicaciones/Atlas-climatologico/Atlas.pdf>)

Comenzamos considerando que los **climas secos (tipo B)**, son climas áridos. Si distinguimos tres intervalos según el régimen anual de precipitación podemos diferenciar entre subtipos de acuerdo con las siguientes fórmulas, donde  $P$  es la precipitación umbral anual en mm y  $T$  es la temperatura media anual en grados centígrados °C.

- $P = 20(T + 7)$ , la precipitación está repartida a lo largo del año. Se indica con el subíndice  $f$ .
- $P = 20T$ , el verano es seco, es decir, el 70% o más de la precipitación se concentra en el semestre otoño – invierno. (Subíndice  $s$ ).
- $P = 20(T + 14)$ , el invierno es seco, ahora el 70% o más de la precipitación anual se concentra en el semestre primavera – verano. Esta situación no se da en la región ibérica. (Subíndice  $w$ ).

Según esto, Köppen distingue entre dos subtipos de clima B, el subtipo BS (estepa, clima semiárido) si la precipitación anual es superior a  $\frac{P}{2}$  respecto la clasificación anterior y el subtipo BW (desierto, clima árido). si la precipitación anual es menor o igual que  $\frac{P}{2}$ . También distingue las variedades cálida (letra  $h$ ; BSh y BWh) y fría (letra  $k$ ; BSk y BWk) atendiendo a que la temperatura media anual esté por encima o por debajo de los 18°C, respectivamente. (Kottek et al., 2006).

En cuanto a los **climas templados (tipo C)**, la temperatura media del mes más frío está comprendida entre los 0 y los 18°C. Köppen distingue los subtipos Cs, Cw y Cf conforme se observa un periodo significativamente seco en verano (Cs), en invierno (Cw), o si no hay estación seca (Cf).

Hay una tercera variante conforme el verano sea caluroso (la temperatura media del mes más cálido es superior a 22°C, letra  $a$ ), templado (la temperatura media del mes más cálido es menor o igual a 22°C y tiene cuatro meses o más con una temperatura media superior a 10°C, letra  $b$ ), o frío (la temperatura media del mes más cálido es menor o igual a 22°C y tiene menos de cuatro meses con una temperatura media superior a 10°C, letra  $c$ ).

Para los **climas fríos (tipo D)** la temperatura media del mes más frío es inferior a 0°C y la del mes más cálido es superior a 10°C. Los intervalos considerados para los subtipos y variedades del clima D son análogos a los del tipo C.

Para aplicar esta clasificación a Navarra, podemos considerar cuatro zonas climáticas distintas: la zona Atlántica al noroeste, el Pirineo al nordeste, la zona Media en el centro y la zona Sur. Presentamos su división en la Figura 1.1. que aparece a continuación.



Figura 1. 1. Mapa de estaciones manuales

Comenzamos con el clima en la zona atlántica, que pertenece al grupo de climas templados de latitudes medias o tipo C. En esta zona distinguiremos entre dos climas. El primero será el clima marítimo de costa occidental oceánico, **Cfb**. Es un clima templado de veranos frescos y la temperatura media del mes más cálido es inferior a 22°C. Cuenta con precipitaciones abundantes y bien repartidas durante todo el año aunque existe un mínimo en verano, por lo que no hay ningún mes seco. El segundo será el marítimo de costa occidental oceánico con un mes seco, **Cf1b**.

En la zona pirenaica, además del grupo de climas de latitudes medias debemos contemplar la existencia del grupo D en las zonas más altas del Pirineo. Son climas continentales o de inviernos muy fríos con veranos frescos: **Dfb**. Un clima frío de bosque con precipitaciones abundantes que en invierno se dan en forma de nieve.

En la zona media, bajo el enmarque del tipo C diferenciaremos tres casos. El primero es el clima marítimo de costa occidental, **Cf2b**. Es un clima templado con veranos frescos y precipitaciones abundantes, pero con dos meses secos. El segundo es un clima mediterráneo de veranos frescos y secos, **Csb**, que solo es mediterráneo en cuanto a las precipitaciones, porque tiene temperaturas más bajas. Y el tercero, el clima subtropical húmedo, **Cfa**, un clima templado húmedo con veranos cálidos.

En la zona sur encontraremos climas del tipo C y del grupo B (recordamos, climas secos). Distinguimos primero el clima típicamente mediterráneo, **Csa**. Es un clima templado de veranos secos y calurosos, con un mínimo de precipitación en dicha estación. El segundo es el clima estepario frío, **Bsk**. A veces también se llama

mediterráneo seco, porque aparece en la región colindante al clima mediterráneo según aumenta la aridez. Es un clima templado con precipitaciones escasas durante todo el año, sin un mínimo claro de precipitación en verano.

A continuación en la Figura 1.2. se presentan mediante isolíneas los diferentes climas de la clasificación.

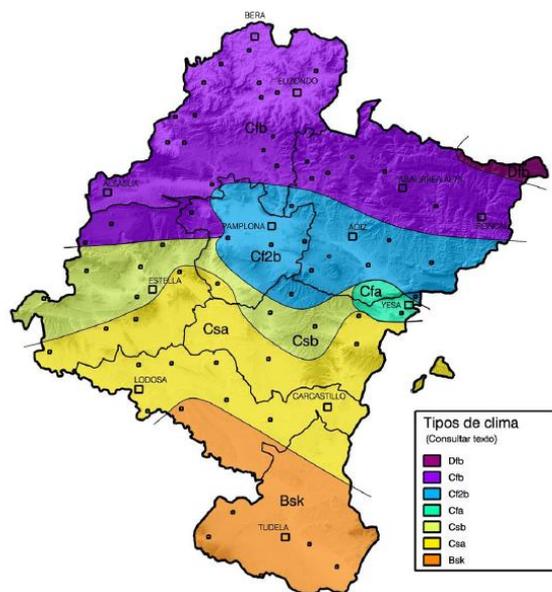


Figura 1.1. Clasificación de Köppen - Geiger en Navarra

Fuentes de las imágenes:

Figura 1.1...: <http://meteo.navarra.es/climatologia/>

Figura 1.2.: [http://meteo.navarra.es/data/estudio\\_agroclimatico/koppen.pdf](http://meteo.navarra.es/data/estudio_agroclimatico/koppen.pdf)

# **Capítulo II**

## **Descripción experimental**

## 2.1. Obtención de datos

La provincia de Navarra cuenta con una extensa red de estaciones meteorológicas, tanto manuales como automáticas. Podemos encontrar la ubicación de las estaciones de la Comunidad Autónoma en la siguiente dirección:

<http://meteo.navarra.es/estaciones/mapadeestaciones.cfm>

Las estaciones manuales son las más abundantes, ya que fueron las primeras en ser establecidas, sin embargo las automáticas llevan un amplio intervalo de tiempo funcionando. Debido a la simplificación que aportan al tratamiento de los datos, hemos seleccionado las estaciones automáticas para el estudio consiguiendo que la base de datos a utilizar sea más manejable.

Presentaremos algunas características de estas que podemos encontrar en la web: <http://eportal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>.

Tomaremos como ejemplo la estación de Ablitas y describiremos brevemente los aparatos con los que cuenta, que son comunes al resto de estaciones. La Figura 2.1. es una imagen de dicha estación que sirve de ejemplo ilustrativo.



Figura 2. 1. Estación automática localizada en Ablitas

Los datos se obtienen a partir de un termohigrómetro (Vaisala, modelo HMP45) que mide la temperatura y humedad del aire, una anemoveleta (R.M. Young, modelo 05103) que tomará datos de dirección y velocidad del viento, un piranómetro (SKYE Instruments, modelo SP1110) capaz de medir la radiación solar global, un pluviómetro (R.M. Young, modelo RM52203) que datará las cantidades de agua precipitada, un sensor de temperatura en el suelo (habitualmente Campbell Scientific, modelo CS107) aunque en esta estación no ha sido instalado y un datalogger (Campbell Scientific,

modelo CR10X) encargado del registro de datos, de la medida de los sensores y de controlar del funcionamiento de la estación.  
<http://eportal.magrama.gob.es/websiar/Ficha.aspx?IdProvincia=31&IdEstacion=4>

En cuanto a la descarga de datos, se lleva a cabo desde la dirección web oficial: <http://meteo.navarra.es/estaciones/descargardatos.cfm>, que nos permite seleccionar las estaciones una a una. Cada estación cuenta con un archivo de tipo .csv con los datos diarios de todos los años en los que ha estado operativa.

Una vez descargados estos ficheros (la descarga es directa) contamos con los datos diarios de temperatura máxima, temperatura media, temperatura mínima; humedad relativa media (%), máxima y mínima; precipitación acumulada (l/m<sup>2</sup>); radiación global (W/m<sup>2</sup>); velocidad media del viento 2m (m/s); dirección del viento 2m (grados). Lo presentamos en la Figura 2.2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Fecha-hora	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Humedad rel	Humedad rel	Humedad rel	Precipitación	Radiación gl	Velocidad m	Dirección viento 2 m (MODA) sector			
2	01/01/2005	14,95	9,58	6,47	73,6	83,9	53,21	0	101,85	3,07	294,9			
3	02/01/2005	13,89	9,32	5,8	73,8	87,1	63,63	0	55,53	3,08	289,5			
4	03/01/2005	11,07	6,85	-0,3	71,4	89,8	50,8	0	101,74	3,05	274,7			
5	04/01/2005	5,72	0,18	-2,58	93,9	97,3	77,3	0	48,8	0,79	198,2			
6	05/01/2005	6,92	0,97	-4,65	86,9	97,2	62,71	0,2	96,99	0,94	240,1			
7	06/01/2005	14,81	6,57	-0,9	80	97,6	58,37	0	101,16	1,78	269,8			
8	07/01/2005	1,85	0,32	-1,97	98,1	98,5	97,6	0,4	27,34	0,75	112,4			
9	08/01/2005	3,59	1,19	-0,44	96,3	98,9	85,6	0,2	34,35	0,89	223,8			
10	09/01/2005	0,57	-0,87	-1,84	98,2	98,8	97,5	0	16,93	1,03	163,2			
11	10/01/2005	-0,9	-1,71	-2,65	95,3	98,3	90,9	0	17,25	1,14	205,8			
12	11/01/2005	-0,63	-1,97	-3,51	95,8	98,2	89,8	0	28,47	0,79	248,1			
13	12/01/2005	3,67	-0,11	-2,17	97	98,4	92,1	0,2	45,27	0,7	195,5			
14	13/01/2005	5,42	2,37	-1,71	96,9	98,5	89,1	0,2	34,5	0,88	103,5			
15	14/01/2005	2,52	1,28	-0,17	98,5	98,9	98,1	0,4	27,93	0,75	102,6			
16	15/01/2005	2,92	1,65	0,44	97,8	98,9	95,1	0,2	28,19	1,01	107,8			
17	16/01/2005	2,72	2,02	1,51	96,4	98,3	92,7	0	15,22	0,69	292,1			
18	17/01/2005	1,72	0,92	-0,17	97,1	98,4	92,5	0	23,19	0,89	238,9			
19	18/01/2005	11,89	3,82	-1,5	85,5	99,1	51,96	0,6	72,82	2,96	278,6			
20	19/01/2005	13,55	9,42	4,93	69,73	78,3	60	0	82,76	6,6	295,5			
21	20/01/2005	15,16	11,62	7,27	70,3	88,3	58,05	0	89,47	4,36	298,6			
22	21/01/2005	12,54	8,81	5,33	73,4	88,3	57,92	0	115,05	3,47	288			
23	22/01/2005	12,48	9,4	5,66	64,48	76,3	51,6	0	80,76	3,48	277,4			
24	23/01/2005	12,34	8,35	2,65	68,6	84,8	55,03	0	111,11	3,2	282,5			
25	24/01/2005	7,47	2,97	-0,7	67,67	86	42,7	0	73,04	6,04	310,9			
26	25/01/2005	3,72	-0,16	-3,31	70,9	91,7	33,43	0	87,73	4,38	308,2			
27	26/01/2005	0,37	-2,06	-3,84	63,44	84,3	43,2	0	112,96	5,94	313,6			
28	27/01/2005	1,84	-0,89	-3,51	55,37	79,5	32,69	0	127,32	6,91	306,4			
29	28/01/2005	7,13	2,61	-1,03	69,5	85,7	56,75	0,2	83,68	5,07	308,1			

Figura 2. 2. Ejemplo de los datos descargados en Ablitas del año 2005

De todas estas variables climáticas seleccionamos los datos de temperatura máxima y mínima.

Con el mismo procedimiento para máximas y mínimas, se crean sendos archivos .xls para cada estación en los que se reflejan los datos de temperatura de cada año uno a continuación del otro. El paso siguiente es la creación de una base de datos para cada variable en la que aparecerá cada estación en columnas y cada día del año en filas, de esta manera, pondremos todos los valores de cada año a continuación uno del otro, sin separarlos, consiguiendo así nuestra variable independiente temporal.

## 2.2. Diagrama de selección de datos

Primeramente seleccionaremos el número de estaciones automáticas que cuentan con un número suficiente de datos para poder sacar conclusiones sobre el periodo de los 10 años, estableciendo el intervalo temporal de cada una de ellas, y dibujándolas con el fin de ver si están repartidas con cierta uniformidad en el territorio.

Para ello elaboramos el gráfico de barras que aparece a continuación en la Figura 2.3. y que representa la distribución de los periodos con datos en todas las estaciones automáticas, suman 57. Cada línea horizontal indica el intervalo de tiempo con medidas disponibles. Con el objetivo de cuantificar los intervalos, las estaciones han sido ordenadas de arriba hacia abajo de manera creciente. En los casos en que el intervalo es coincidente, las estaciones están dispuestas alfabéticamente.

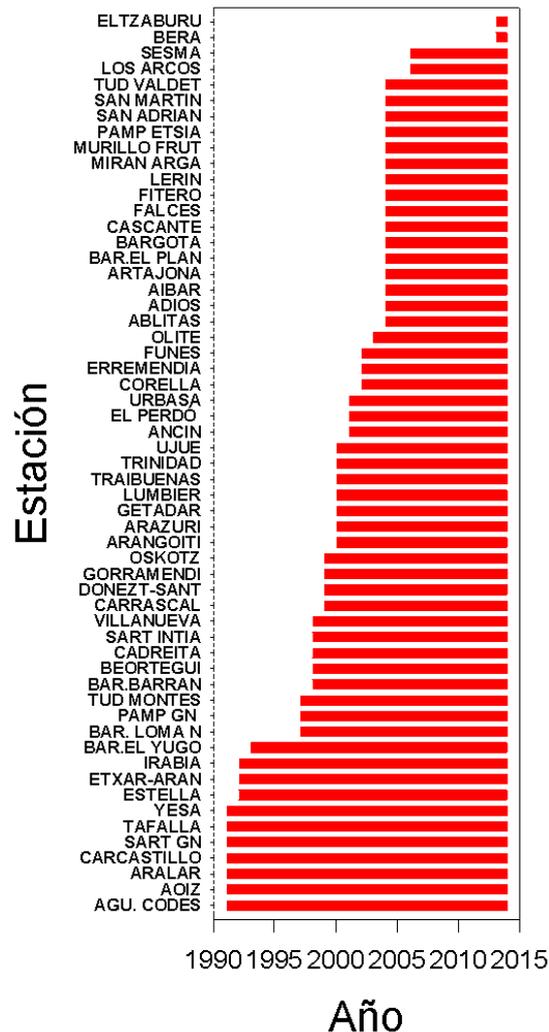


Figura 2. 3. Distribución de los intervalos de medida de las estaciones automáticas

De este diagrama resulta que un 19,3% de las estaciones (11/57) cuentan con registros superiores a los 20 años. El 45,6 % de las estaciones (26/57) mantiene un decremento gradual en el intervalo de medidas que abarca desde los 18 a los 12 años. El 28,1% de las estaciones (16/57) dispone de 11 años de datos y sólo el 7% de las estaciones (4/57) tiene un registro muy bajo de años.

Con el propósito de describir espacialmente la evolución de la temperatura en el mayor número de estaciones, hemos seleccionado 51 de ellas, desechando las que no alcanzan el intervalo de 10 años de datos continuos (desde 2005 hasta 2014).

Cuatro estaciones fueron instaladas hace menos de los 10 años seleccionados, dos en 2013 (Bera y Eltzaburu) y otras dos en 2006 (Los Arcos y Sesma). Dos estaciones más empiezan a ser actualizadas a mediados de 2005 (Sartaguda INTIA y Tudela-Valdetellas), por lo que al no tener el año inicial completo no aportan el número suficiente de datos para abordar el estudio junto a las demás.

Tampoco la estación de Artajona cuenta con datos suficientes para realizar el estudio sobre temperaturas mínimas (1%), por lo que para este caso solo contaremos con 50 estaciones. En el caso de las comparativas y correlaciones futuras entre máximas y mínimas esta estación también ha sido desechada.

### **2.3. Mapa de alturas de las estaciones**

Representaremos a continuación la distribución geográfica de todas las estaciones automáticas en la Figura 2.4. En negro figuran las estaciones desestimadas para el estudio y en rojo las seleccionadas.

A partir de los datos de coordenadas UTM y de altura disponibles en la descripción de la estación, hemos trazado las curvas de nivel mediante el programa *Surfer*, que se ha utilizado con el mismo propósito en los diferentes apartados de este trabajo.

El funcionamiento de este programa se basa en establecer una red espacial en el plano XY en cuyos nudos calcula los valores de una variable a partir de los datos conocidos, en este caso de la altura. Los límites han sido, para el eje X, de 540000 a 690000 m y para el eje Y de 4640000 m a 4800000 m. Se han tomado 151 líneas en el eje X y 161 líneas en el eje Y, con un espaciado de 1 km. El método Kriging ha sido el utilizado para calcular los valores de la variable en los nudos de la red pues es el usado por el programa por defecto. Este estudio no considera la investigación de los resultados mediante otros métodos.

El resultado obtenido son unas curvas de nivel que, aun simplificando el relieve real, mantienen la información esencial. Las zonas montañosas se localizan al este y al oeste de la comunidad, mientras que las zonas de menor altitud (más bajas) están en el norte y en el sur, esencialmente. De esta manera concluimos que las estaciones tienen una distribución bastante homogénea, destacando únicamente la baja densidad en la zona montañosa del este.

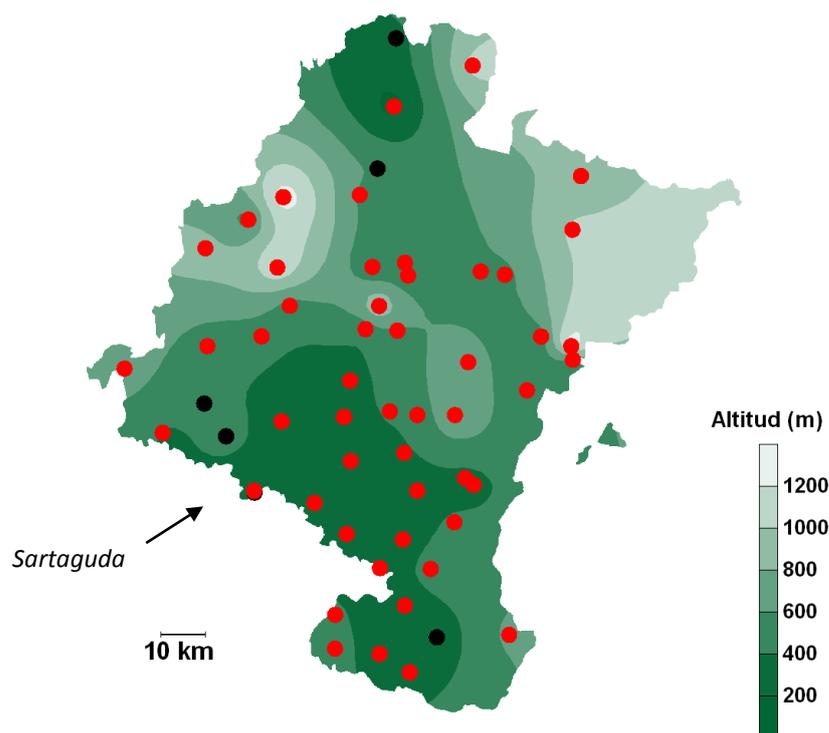


Figura 2. 4. Distribución de las estaciones automáticas en la provincia de Navarra

*Nota:* Hay una estación que en el mapa no podemos observar. Las estaciones Sartaguda INTIA Y Sartaguda GN se encuentran tan cerca que en la imagen aparecen prácticamente superpuestas, por lo que Sartaguda GN, que ha sido seleccionada (punto rojo), tapa a Sartaguda INTIA que no lo ha sido (punto negro).

# **Capítulo III**

## **Estudio de la temperatura mediante indicadores estadísticos**

Con el principal objetivo de profundizar en la evolución de la temperatura, debemos antes describir esta variable cualitativamente. Por lo tanto, este capítulo se dedicará a realizar un estudio de la distribución de la temperatura máxima y mínima en las distintas estaciones a lo largo de los 10 años.

### 3.1. Definición de indicadores estadísticos

En observaciones atmosféricas como la que nos ocupa, es frecuente el uso de indicadores estadísticos. El valor de una variable se describe mediante la media aritmética, su dispersión se conoce con la desviación estándar, el uso del sesgo sirve para determinar la asimetría de su distribución y la curtosis para establecer el aplanamiento (achatamiento) de ésta.

En este caso, sin embargo, se considerarán unos indicadores más robustos, es decir, indicadores que serán menos sensibles a la distribución de los datos o a la presencia de valores anómalos (extremos) que pudieran contaminar los resultados obtenidos (Wilks, 2006). Utilizaremos los cuatro siguientes.

Comenzaremos con un indicador de localización como es la *mediana* y seguiremos con el *rango intercuartílico*, estimador de la dispersión de nuestros datos, que nos indicará la desviación (la no certeza) de los estadísticos de localización. Los dos últimos indicadores nos darán una descripción de la simetría en las distribuciones y serán el *sesgo* y el *coeficiente de curtosis*. Pero para entenderlos adecuadamente, primero debemos definir el concepto de cuartil y de percentil en una distribución. Los cuartiles son los tres valores que dividen el conjunto de datos ordenados en cuatro partes porcentualmente iguales.  $Q_1$  es la mediana de la primera mitad de valores,  $Q_2$  es la mediana de la serie, y  $Q_3$  es la mediana de la segunda mitad de valores. De este modo, identificamos los cuartiles con los percentiles:  $Q_1$  con  $P_{25}$ ,  $Q_2$  con  $P_{50}$  y  $Q_3$  con  $P_{75}$ . Veamos dichos indicadores.

La **mediana ( $M$ )**, siendo el segundo cuartil, nos da el centro de los datos de la distribución, de tal manera que tendríamos el mismo número de datos a la derecha del segundo cuartil que a la izquierda. Si el conjunto de datos es impar, habría dos valores de mediana, por convenio se toma la media aritmética de los dos valores. Como estimador de localización, se obtiene el número central del conjunto de datos de temperatura máxima y mínima en cada caso.

El **rango intercuartílico (IQR)** es la medida robusta de dispersión más común y más sencilla que se suele llevar a cabo. Se define como la diferencia entre el tercer y el primer cuartil de una distribución, permitiendo medir la dispersión estadística.

$$IQR = Q_3 - Q_1$$

Es un buen índice de la dispersión para el 50% de los datos de la parte central del conjunto ya que ignora el 25% de los datos inferiores y superiores de la distribución.

El **sesgo** es el indicador de simetría de la distribución. En este contexto estadístico conocemos por sesgo de un estimador la diferencia entre su esperanza matemática y el valor numérico del parámetro que estima. La propiedad ideal de los estimadores es tener un sesgo nulo, y los llamaremos insesgados o centrados. Calculamos el sesgo mediante el coeficiente de Bowley, como la suma del primer y tercer cuartil menos el doble del segundo (o de la mediana) dividido entre la diferencia entre el tercer y primer cuartil (rango intercuartílico).

$$S = \frac{Q_3 + Q_1 - 2M}{Q_3 - Q_1}$$

Otro coeficiente alternativo al de Bowley que define el sesgo de una distribución es el índice o coeficiente de Yule que se define como el cociente entre la diferencia de media y mediana y la desviación estándar (Pérez et al. 2014).

$$\gamma = \frac{\mu - M}{\sigma}$$

El **coeficiente de curtosis** sirve para considerar el aplanamiento de la distribución bajo estudio frente a la distribución normal. Se calcula dividiendo la diferencia entre el tercer y primer cuartil entre dos veces la diferencia entre el percentil 90 menos el 10.

$$K = \frac{Q_3 - Q_1}{2(P_{90} - P_{10})}$$

Tendremos en cuenta en el estudio para comparar los resultados de la curtosis robusta que la curtosis de la distribución gaussiana es 0,263 (Sachs, 1982).

Si el valor del coeficiente de curtosis es menor que el de la distribución normal, significa que la curva de la de distribución será más estrecha, tendrá un máximo mayor que el de la distribución normal. Si, en cambio, el coeficiente obtenido es superior al de la distribución normal, significará que el máximo es más bajo, la campana está más

achata que la distribución normal, nuestra distribución sería más plana que la de la distribución normal.

A continuación, en la Figura 3.1. vemos una representación del significado del sesgo y del coeficiente de curtosis en una distribución.

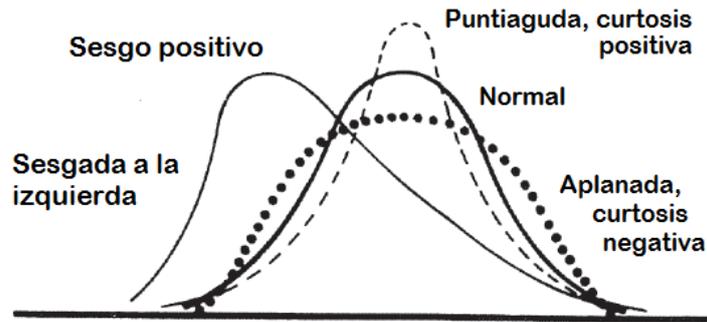


Figura 3. 1. Desviaciones de la curva de campana (distribución normal)

### 3.2. Significación estadística del coeficiente de correlación

Después de calcular los indicadores, los resultados se presentarán mediante un mapa en el que se interpolan las coordenadas de cada estación (longitud y latitud) con el indicador correspondiente y una gráfica de dispersión que representa el indicador frente a la altitud, permitiendo ver si existe o no y de qué tipo es, en caso afirmativo, la correlación entre indicadores y coordenadas.

Con el fin de tener un criterio que nos permita determinar si los coeficientes de correlación son satisfactorios, calculamos el valor crítico teórico del coeficiente al nivel de significación de 0,1%, 1% y 5% de acuerdo con la ecuación:

$$r = \frac{t}{\sqrt{t^2 + n - 2}}$$

El resultado depende de  $n$ , número de valores de la distribución (51, 50) y del valor crítico de la distribución  $t$  de Student, que debemos calcular. Lo haremos mediante la función “inversa de la distribución  $t$ ” que proporciona el programa Excel. Debemos darle al programa dos valores, el porcentaje del nivel de significación en el que estamos interesados en cada caso y los grados de libertad que tenemos, teniendo en cuenta que si no conocemos el signo del coeficiente de correlación será un test de dos colas, y de una en caso contrario.

<http://www.jeremymiles.co.uk/usingstatistics/chapter8/sigofrexcel.html>

Para correlaciones estadísticamente significativas al 0,1%, 1% y 5% tenemos los resultados presentados en las sucesivas tablas, Tabla 3.1. y Tabla 3.2., donde la primera está referida a la distribución de temperaturas máximas y la segunda a las temperaturas mínimas.

p	t	r
<b>0,001</b>	3,50044289	0,44725887
<b>0,01</b>	2,67995197	0,35754266
<b>0,05</b>	2,00957524	0,27593646

Tabla 3. 1. Coeficientes de correlación para la distribución de temperaturas máximas

p	t	r
<b>0,001</b>	3,50506797	0,45142957
<b>0,01</b>	2,68220403	0,36103143
<b>0,05</b>	2,01063476	0,27871059

Tabla 3. 2. Coeficientes de correlación para la distribución de temperaturas mínimas

A continuación presentaremos la mediana de cada estimador, y después pasaremos a estudiar los resultados obtenidos para cada uno de ellos en cada estación.

### 3.3. Medianas de los indicadores para el conjunto de estaciones

Debido a la dificultad de interpretar una tabla con todos los resultados de los indicadores antes presentados para cada estación de medida, se calculan las medianas de cada indicador estadístico que presentamos a continuación en la Tabla 3.3.

Indicadores	T máxima	T mínima
$\bar{M}$ (°C)	18,7	7,7
$\overline{IQR}$ (°C)	13,3	9,4
$\bar{S}$	0,0356	-0,0179
$\bar{K}$	0,2937	0,2996

Tabla 3. 3. Medianas de los indicadores estadísticos de las distribuciones de máximas y mínimas

La mediana de las temperaturas máximas se encuentra en 18,7°C y el rango intercuartílico es del mismo orden, ya que ha resultado ser de 13,3°C. En cambio, para las mínimas, el rango (9,4°C) es mayor que la mediana de temperaturas (7,7°C).

En cuanto al sesgo y el coeficiente de curtosis, observamos que el sesgo de la distribución de máximas es positivo mientras que el de mínimas es ligeramente negativo. La curtosis de ambas distribuciones no difiere mucho, siendo la de mínimas superior en seis milésimas. Son algo superiores al valor correspondiente a una distribución normal, por lo que podemos considerar que las distribuciones de temperatura son platicúrticas.

### 3.4. Presentación de resultados para los indicadores estadísticos

Presentaremos a continuación en forma de mapa y de gráfica los resultados obtenidos para cada indicador, tanto de máximas, como de mínimas. A partir de este momento las representaciones en mapas y gráficas se corresponden con las temperaturas máximas a la izquierda y mínimas a la derecha utilizando la gama de colores en cálidos y fríos respectivamente.

#### 3.4.1. Medianas de la temperatura

Una vez interpolados los datos de las medianas de temperaturas con las coordenadas, podemos representar los resultados, aparecen a continuación en las Figuras 3.2. y 3.3.:

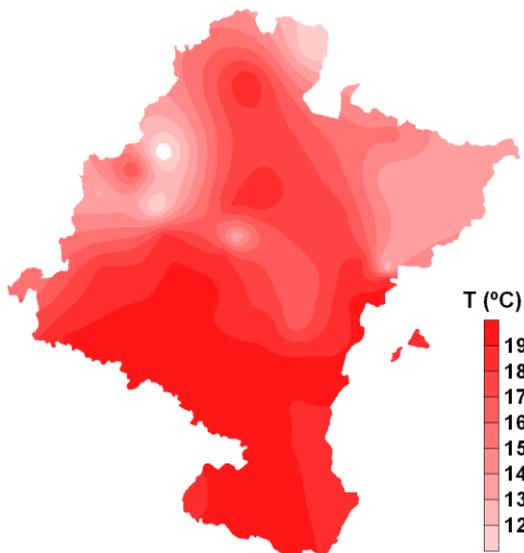


Figura 3.2. Medianas de T máxima

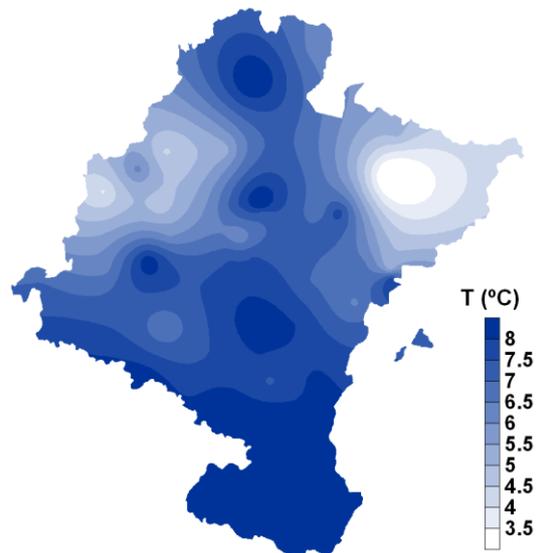


Figura 3.3. Medianas de T mínima

Las medianas de las temperaturas máximas y mínimas mantienen el mismo comportamiento en ambos mapas. En el centro de la provincia se alcanzan valores altos, estando los máximos en el sur de la provincia. Los mínimos se observan en el

norroeste en la distribución de temperatura máxima y en el noreste en la de temperatura mínima, lo que concuerda con la geografía de la zona.

Del mismo modo, en las Figuras 3.4. y 3.5. presentamos la correlación de las temperaturas con la altura, donde podemos observar una dependencia lineal decreciente con la altitud. En el caso de la temperatura máxima el coeficiente de correlación es muy bueno, y pese a cierta dispersión en el de mínimas, también se aprecia linealidad.

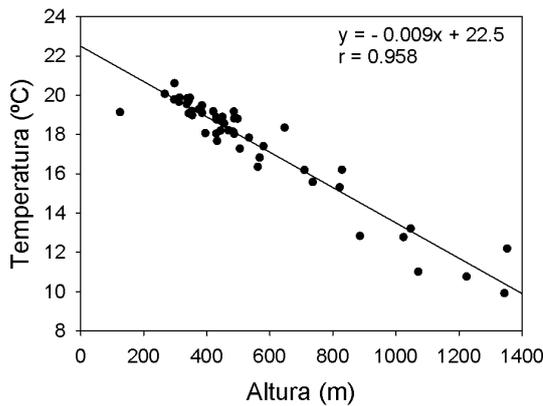


Figura 3.4. T máxima con la altura

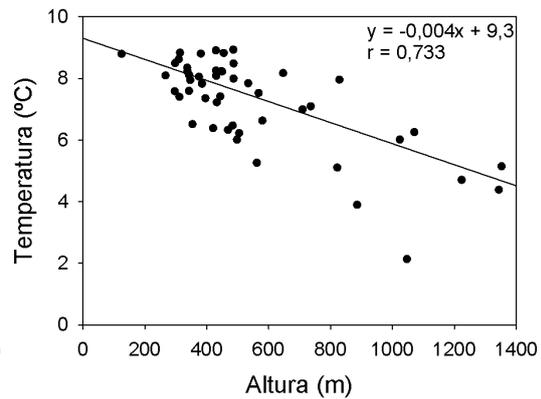


Figura 3.5. T mínima con la altura

Añadimos a continuación, en la Figura 3.6. la correlación entre los valores máximos de temperatura (en el eje y) y los mínimos (eje x), ya que los valores más bajos de la máxima no coinciden con los de la mínima.

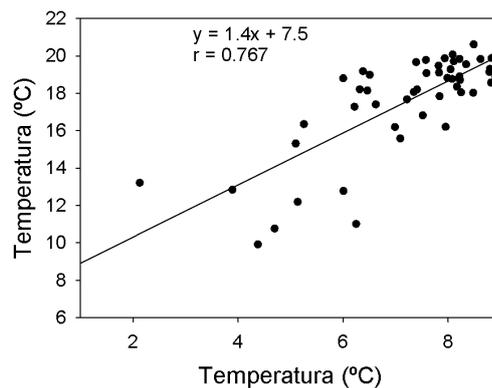


Figura 3.6. Correlación de T máxima con la T mínima

Obtenemos una correlación muy buena, con un coeficiente estadísticamente significativo al 0,1%.

### 3.4.2. Rango intercuartílico IQR

Repitiendo el proceso anterior para los valores de rango intercuartílico observamos en las Figuras 3.7. y 3.8. que siguen su distribución geográfica:

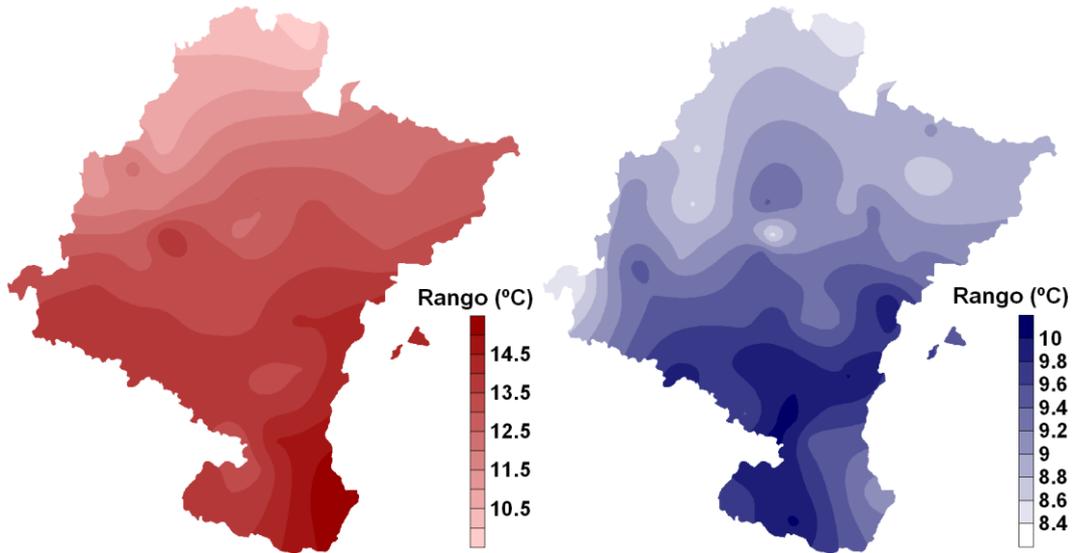


Figura 3.7. Rango intercuartílico de T máximas

Figura 3.8. Rango intercuartílico de T mínimas

Observamos que los valores máximos del rango intercuartílico se dan en el sur de la provincia. Para las temperaturas máximas los valores máximos del rango se localizan en el sureste, alcanzando 14,5°C. Sin embargo en las mínimas los máximos están en la zona del suroeste, rondando los 10 °C.

Vemos también la correlación con la altura en las Figuras 3.9. y 3.10. :

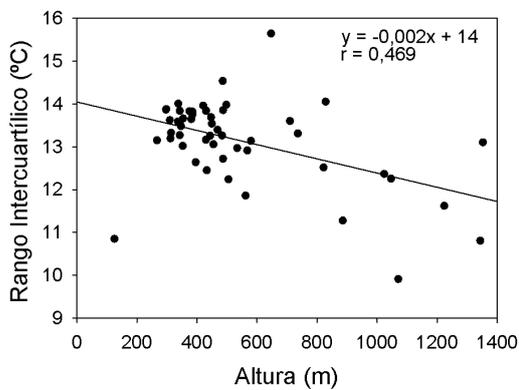


Figura 3.9. Rango intercuartílico de T máximas respecto a la altura

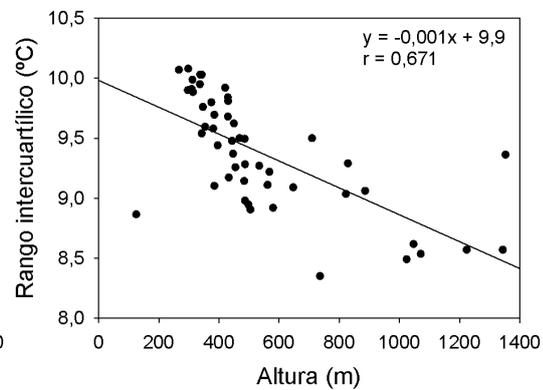


Figura 3.10. Rango intercuartílico de T mínimas respecto a la altura

Apreciamos que el coeficiente de correlación lineal para la dependencia con la altitud es estadísticamente significativo al 0,1% ya que es superior al valor crítico calculado anteriormente.

Habiendo observado que la representación con la altura refleja franjas horizontales, presentamos a continuación en las Figuras 3.11. y 3.12. la correlación con la latitud y observamos una dependencia lineal, siendo el rango máximo para los valores más bajos de la latitud y disminuyendo éste a medida que la coordenada aumenta.

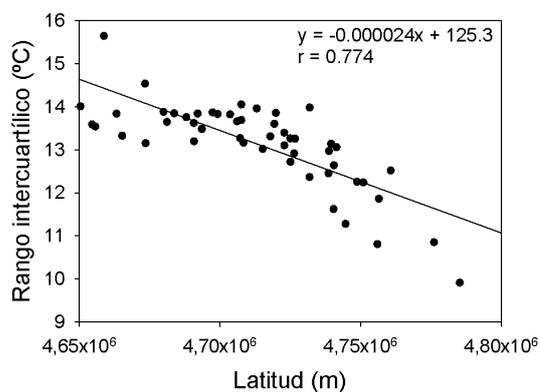


Figura 3.11. Rango intercuartílico de T máximas respecto a la latitud

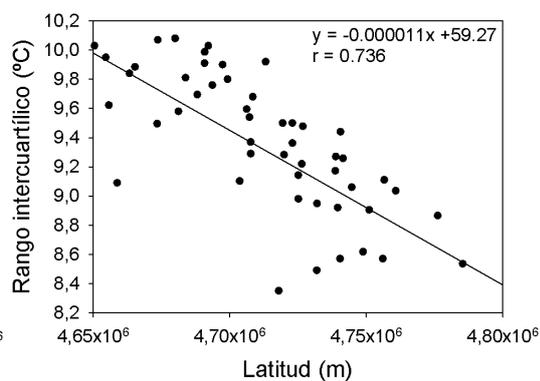


Figura 3.12. Rango intercuartílico de T mínimas respecto a la latitud

Obtenemos una correlación significativa (al 1%) entre los valores del rango y la latitud, como preveíamos después de observar la distribución geográfica en los mapas.

Añadimos también la Figura 3.13. que representa la correlación entre los valores del rango intercuartílico correspondientes a las máximas y a las mínimas. Como antes, en el eje y estarán las máximas y en el eje x las mínimas.

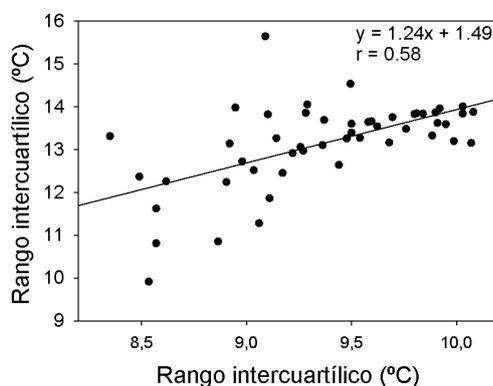


Figura 3.13. Correlación del rango intercuartílico de T máximas con el de T mínimas

Obtenemos un coeficiente de correlación estadísticamente significativo al 0.1%. Observamos que mientras los valores del rango para las máximas abarcan desde los 9°C hasta los 16°C, los valores del rango de las mínimas solo tienen una amplitud de unos 3°C.

### 3.4.3. Sesgo

Repetimos el método para los resultados del sesgo, representándolos geográficamente en las Figuras 3.14. y 3.15. siguientes. En ellas es difícil poder determinar algo con certeza a causa de las diferencias de los datos.

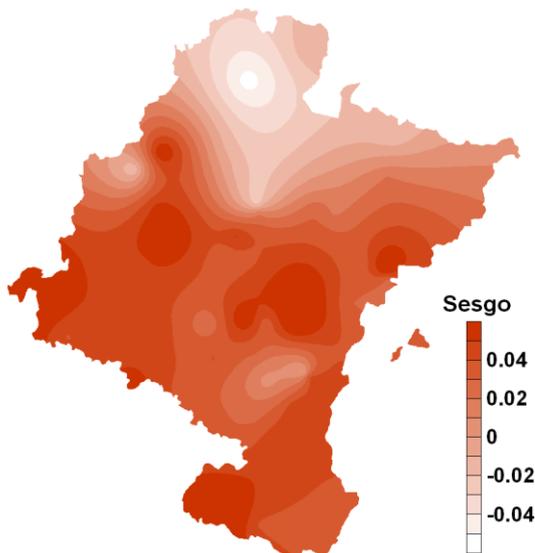


Figura 3.14. Sesgo de T máximas

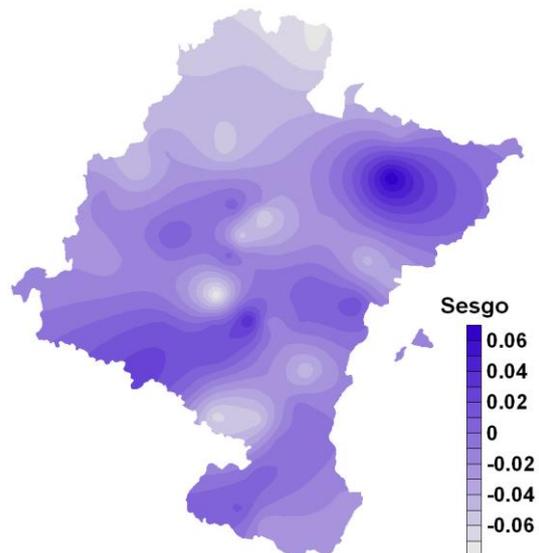


Figura 3.15. Sesgo de T mínimas

En las sucesivas Figuras 3.16. y 3.17. se representan los valores en función de la altura, pero obtenemos que en ambos casos no se aprecia ningún tipo de correlación, la dispersión es notable a simple vista, por lo que no tiene sentido aproximar a una recta.

En vista de unos resultados tan dispersos, se ha calculado también el sesgo mediante el coeficiente de Yule, pero los valores obtenidos no suponían mejoras en la correlación, por lo que se prefiere mantener el coeficiente de Bowley.

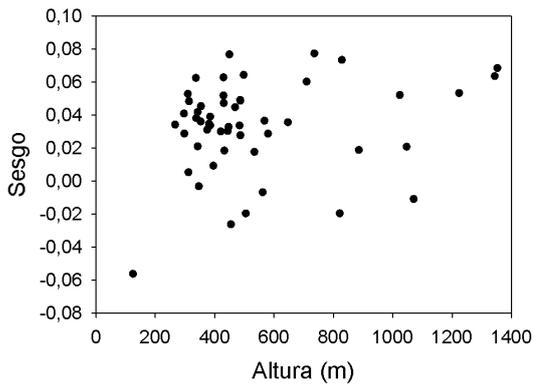


Figura 3.16. Sesgo de T máximas respecto a la altura

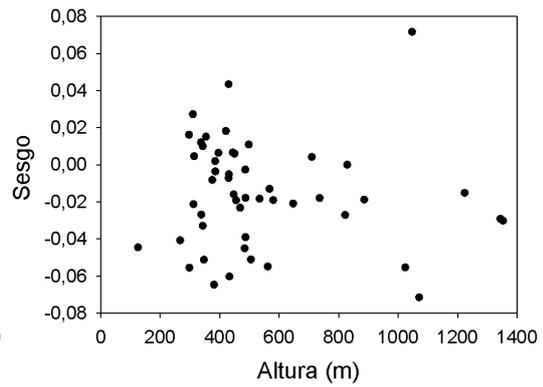


Figura 3.17. Sesgo de T mínimas respecto a la altura

Presentamos en la Figura 3.18. el contraste del sesgo relacionado con las temperaturas máximas y mínimas, obteniendo un coeficiente de correlación bajo, estadísticamente significativo al 1%.

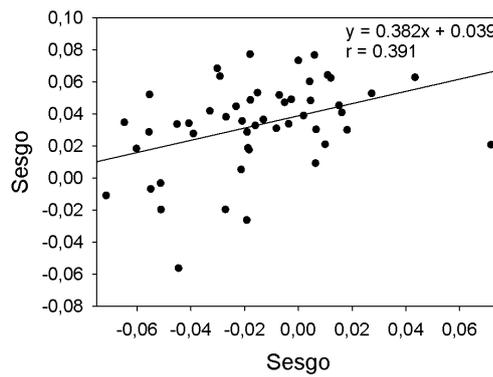


Figura 3.18. Correlación del sesgo de T máximas con el de T mínimas

### 3.4.4. Curtosis

Para el coeficiente de curtosis, las Figuras 3.20. y 3.21. muestran los datos en el mapa, obtenemos unos resultados similares para las dos distribuciones.

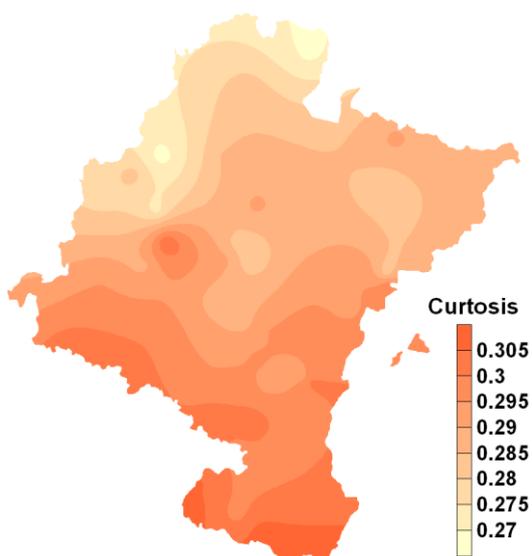


Figura 3.20. Coeficiente de curtosis de T máximas

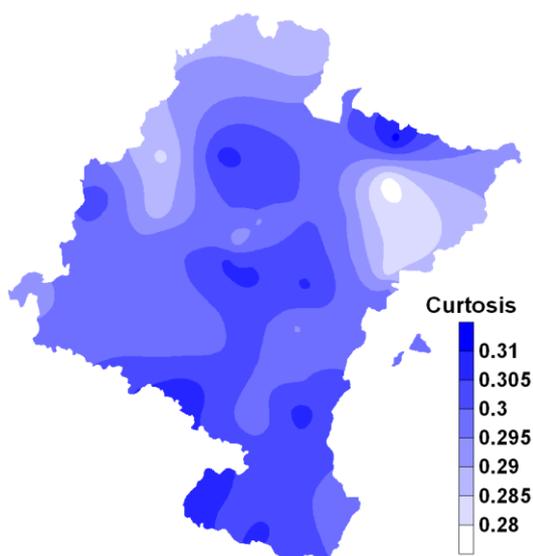


Figura 3.21. Coeficiente de curtosis de T mínimas

Representándolos en función de la altura en las Figuras 3.22. y 3.23. obtenemos que a pesar de mostrar cierta dispersión, los coeficientes de correlación son significativos al 0,1%, siendo superiores a los del rango intercuartílico.

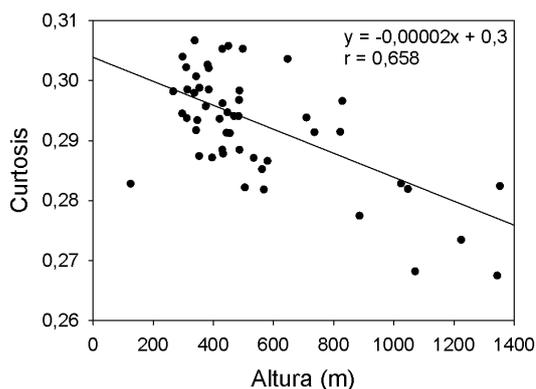


Figura 3.22. Coeficiente de curtosis de T máximas

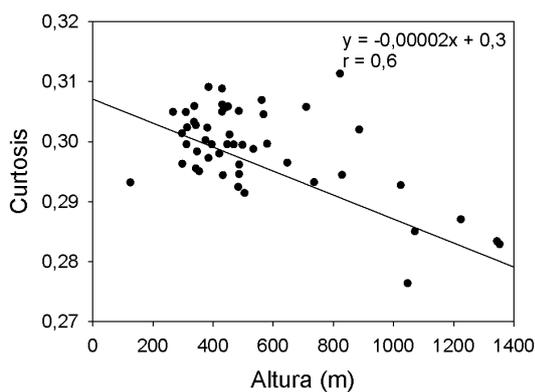


Figura 3.23. Coeficiente de curtosis de T mínimas

Ambos caminos nos muestran que los valores de curtosis para ambas distribuciones son superiores a 0,263 lo que indica que las correspondientes curvas serán más anchas que las de la campana de Gauss. En el caso de las máximas la campana será más ancha en el sur de la provincia, mientras que para las mínimas

tenemos máximos puntuales repartidos por la provincia. Destacamos que los resultados obtenidos para ambas distribuciones tienen un contraste muy bajo: mientras que para las máximas el coeficiente de curtosis varía entre 0,26 y 0,31, el de las mínimas tiene un rango más extenso entre 0,27 y 0,37.

Añadimos en las Figuras 3.24. y 3.25. la correlación de ambas temperaturas frente a la latitud. Observamos que para el caso de temperaturas máximas hay una correlación evidente con la latitud, como preveíamos de las franjas horizontales del mapa. Sin embargo, para el caso de mínimas el coeficiente de correlación no es tan alto.

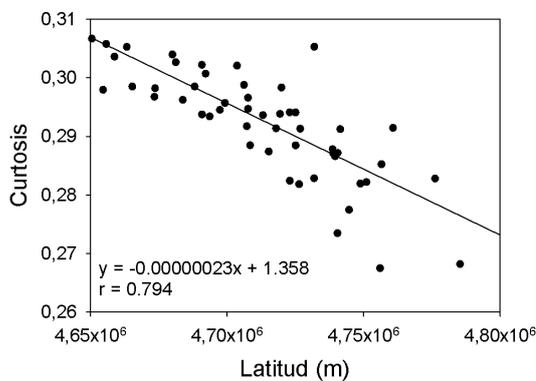


Figura 3.24. Coeficiente de curtosis de T máximas respecto a la latitud

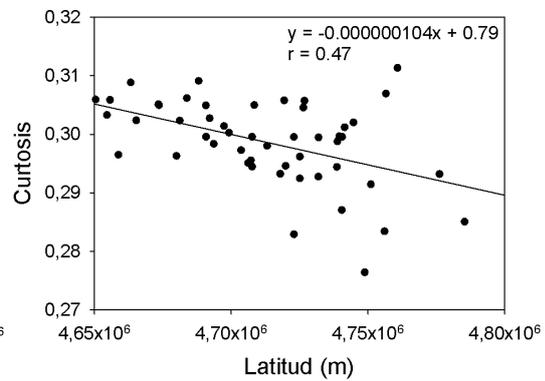


Figura 3.25. Coeficiente de curtosis de T mínimas respecto a la latitud

Añadimos también en la Figura 3.26. la correlación entre el coeficiente de curtosis de máximas y de mínimas, donde cabe mencionar que el contraste entre ambas temperaturas es muy bajo, no habiendo diferencia destacable entre los valores obtenidos para ambas temperaturas.

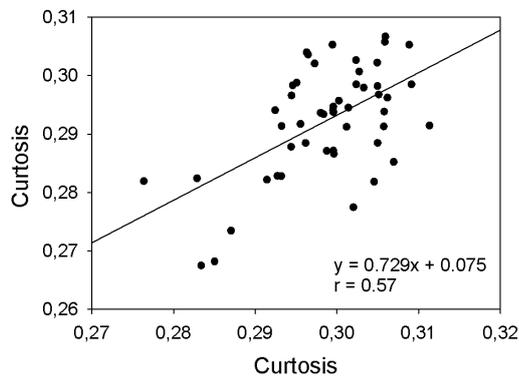


Figura 3.26. Correlación del coeficiente de curtosis de T máximas con el de T mínimas

# **Capítulo IV**

## **Tendencia de la temperatura mediante un modelo armónico**

Conocemos de antemano que la temperatura media anual cambia con el tiempo. Durante este capítulo llevaremos a cabo un estudio para ver cómo se comportan las temperaturas máximas y mínimas a lo largo del periodo de 10 años seleccionado. En primera aproximación se puede emplear un modelo lineal. Sin embargo, lo haremos de acuerdo a un modelo con una parte armónica, ajustando mediante una regresión múltiple que calcularemos con el programa *Statgraphics*.

Este tipo de análisis armónico es comúnmente usado en ciencias atmosféricas para estudiar ciclos a lo largo de un periodo determinado. Primeramente proponemos la siguiente ecuación que consiste en la suma de una parte lineal más una contribución armónica (Sánchez et al., 2008; 2010).

$$y(t) = A_0 + B_0 t + (C_0 + D_0 t) \cos(\omega t - \theta) \quad (4.1)$$

Donde,  $t$  es el tiempo en días, desde enero de 2005 hasta diciembre de 2014,  $A_0$  es la media de la temperatura inicial,  $B_0$  es la variación de la temperatura durante el periodo de estudio,  $(C_0 + D_0 t)$  considera una tendencia lineal de la amplitud con el tiempo y  $\cos(\omega t - \theta)$  representa la evolución de la estación, siendo la frecuencia angular  $\omega$  igual a  $2\pi$  multiplicado por el número total de días considerados y dividido entre el número de años del intervalo seleccionado.

Sin embargo, si separamos el término armónico podemos obtener una mejora del modelo y de esta manera, la ecuación resultante es:

$$y(t) = A_0 + B_0 t + c \cos(\omega t - \theta_1) + dt \cos(\omega t - \theta_2) \quad (4.2)$$

Si la desarrollamos y agrupamos obtenemos,

$$y(t) = A_0 + B_0 t + c \cos \omega t \cos \theta + c \sin \omega t \sin \theta + dt \cos \omega t \cos \theta + dt \sin \omega t \sin \theta$$

$$T = A_0 + B_0 t + c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t + d_1 t \cos \omega t + d_2 t \sin \omega t \quad (4.3)$$

$$\text{De forma que, } c = \sqrt{c_1^2 + c_2^2} \quad y \quad d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2}. \quad (4.4)$$

La metodología a seguir en el programa *Statgraphics* para calcular los coeficientes será crear en el programa una tabla de datos, que tendrá por columnas, los días,  $t$  (3652),  $\cos \omega t$ ,  $\sin \omega t$ ,  $t \cos \omega t$ ,  $t \sin \omega t$ . Estas serán las variables independientes, e iremos cambiando la dependiente, la estación, de tal manera que el programa nos dará un ajuste múltiple. Para el cálculo de la frecuencia angular,  $\omega$ , multiplicamos cada día,  $t$  por  $2\pi$  y dividimos entre el número de días que tiene un año, en nuestro caso será el número total de días entre los 10 años, resultando 365,2 días:  $\omega = \frac{2\pi t}{365,2}$ .

$B_0$  es el coeficiente de la regresión múltiple que da cuenta de la variación con el tiempo del conjunto de la temperatura.

“ $c$ ” es la amplitud anual de la temperatura, o semirango, ya que lo calculamos refiriéndonos a cero. Lo obtenemos a partir de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los coeficientes  $c_1$  y  $c_2$ , que acompañan a  $\cos \omega t$  y  $\sin \omega t$  en la regresión. Nos indica la máxima variación de la temperatura en un año, correspondería a  $C_0$  en la Ec. (4.1). (Bajat et al., 2015).

“ $d$ ” da cuenta de parte del crecimiento de la amplitud a lo largo de los 10 años. Se calcula a partir de los coeficientes  $d_1$  y  $d_2$  que acompañan a  $t \cos \omega t$  y  $t \sin \omega t$  en la regresión múltiple, calculando la raíz de la suma de sus cuadrados y multiplicándolo por el número de días de los 10 años.

Sabemos que la suma de funciones armónicas de amplitud constante e igual frecuencia supone otra función armónica de la misma frecuencia. Por otra parte, el cambio de la amplitud en la Ecuación 4.2 es suficientemente lento como para que, siguiendo el planteamiento anterior, la función resultante se pueda aproximar a la Ecuación 4.1, donde depende de un término constante,  $C_0$  y de otro término que acompaña al tiempo,  $D_0$ . Este término se puede determinar mediante una regresión lineal de los máximos de la parte armónica de la Ecuación 4.2 respecto del tiempo.

Tomando como ejemplo la estación de Ablitas, presentamos en la Figura 4.1. y Figura 4.2. los datos de sendas distribuciones dados por la estación, en color negro, y el ajuste que hemos realizado, en color rojo.

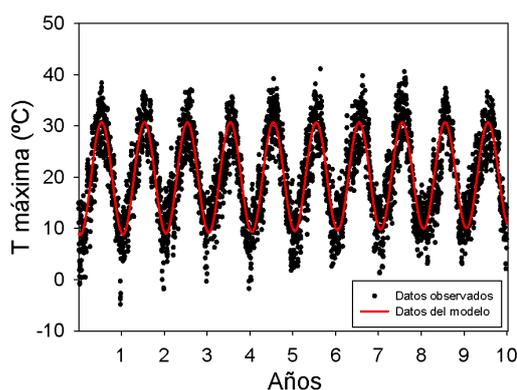


Figura 4.1. Comportamiento de T máximas

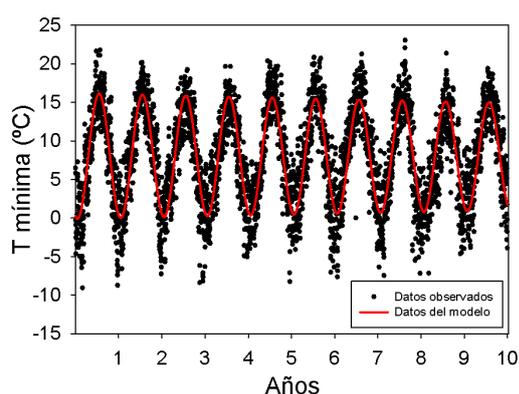


Figura 4.2. Comportamiento de T mínimas

Finalmente, observaremos los datos de los coeficientes  $B_0$ ,  $c$ ,  $d$  y  $D_0$  obtenidos para los casos de temperaturas máximas y mínimas como en el capítulo anterior: mediante un mapa hecho a partir de la interpolación de las coordenadas de cada estación con los coeficientes y con una gráfica de dispersión que represente el dato del coeficiente frente a la altitud. Siguiendo la metodología propuesta en el capítulo III, las figuras en la parte izquierda serán propias de las temperaturas máximas con colores de gama cálida y las de la derecha de las mínimas, con gama fría.

#### 4.1. Coeficiente $B_0$ . Tendencia de la temperatura en 10 años

$B_0$  es el coeficiente  $b$  de la regresión múltiple multiplicado por el tiempo (número de días exacto de los 10 años). Vemos su comportamiento en la provincia en las Figuras 4.3. y 4.4.

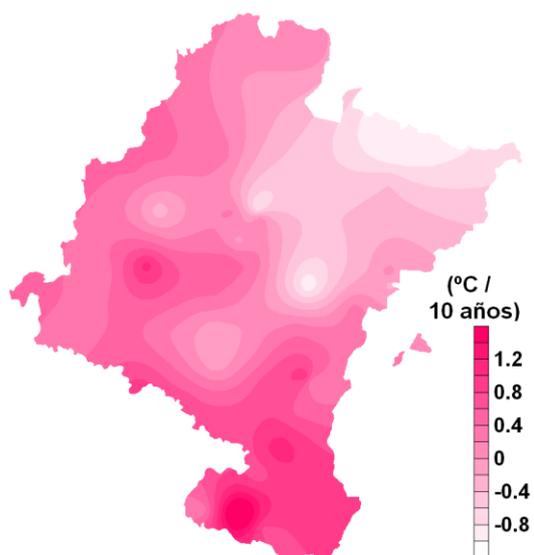


Figura 4.3. Tendencia de la T máxima

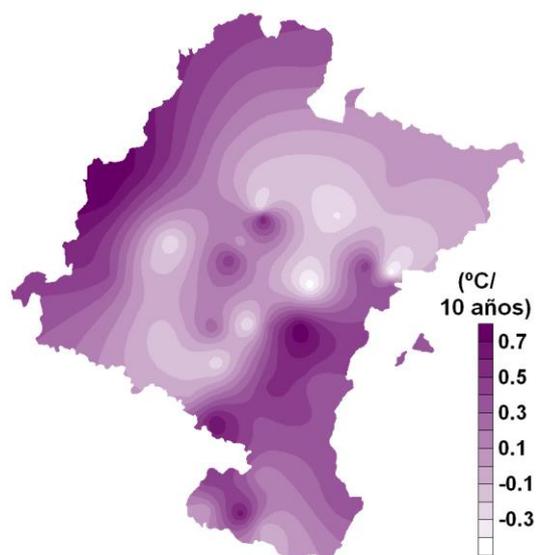


Figura 4.4. Tendencia de la T mínima

El comportamiento del coeficiente  $B_0$  en el mapa de máximas nos indica que esta temperatura ha variado en los 10 años con un crecimiento generalizado (exceptuando el noroeste de la provincia, zona muy próxima a los Pirineos) y un promedio de  $0,28^{\circ}\text{C}$ . En el 74,5% de las estaciones el coeficiente  $B_0$  crece en los 10 años con un promedio de  $0,52^{\circ}\text{C}$ . En las estaciones en las que el coeficiente ha resultado negativo (24,5%) el promedio de descenso ha resultado ser  $-0,44^{\circ}\text{C}$ .

En cuanto al mapa de temperaturas mínimas, vemos cómo también ha aumentado, y en caso de tener una tendencia al descenso, es en décimas de grado centígrado. Su promedio generalizado es de  $0,21^{\circ}\text{C}$ . En el 74% de las estaciones el incremento ha resultado positivo, con un promedio de  $0,37^{\circ}\text{C}$ , mientras que el promedio de descenso ha sido  $-0,24^{\circ}\text{C}$ .

Tanto el resultado del crecimiento de la temperatura máxima ( $0,28^{\circ}\text{C}$ ) como el de la temperatura mínima ( $0,21^{\circ}\text{C}$ ) son comparables a estudios más extensos llevados a cabo alrededor de todo el planeta. En Suiza, un análisis de la tendencia de temperaturas del intervalo 1959-2008 determinó un calentamiento anual de  $0.35^{\circ}\text{C}/10$  años. (Ceppi et al., 2012). Otros estudios han determinado un crecimiento de la tendencia de la temperatura en la Antártida de  $0,32^{\circ}\text{C}$  por década y de  $0,21^{\circ}\text{C}/10$  años en África Central (Sun et al., 2014). En China, de la misma manera, se ha determinado que desde el año 1962 hasta 2011 los valores de calentamiento anual por década han sido de  $0.28^{\circ}\text{C}$ , siendo el calentamiento en las décadas más recientes más alto que en las iniciales del estudio (Jinming et al., 2015).

Para la correlación con la altitud, representado en las Figuras 4.5. y 4.6., el coeficiente de la máxima es estadísticamente significativo al 5%, mientras que el de mínima es demasiado bajo para establecer una correlación.

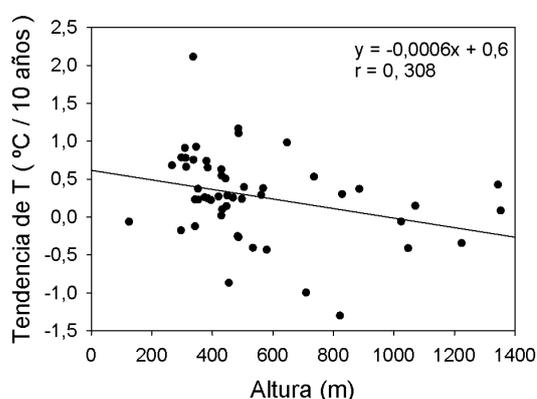


Figura 4.5. Tendencia de la T máxima respecto a la altura

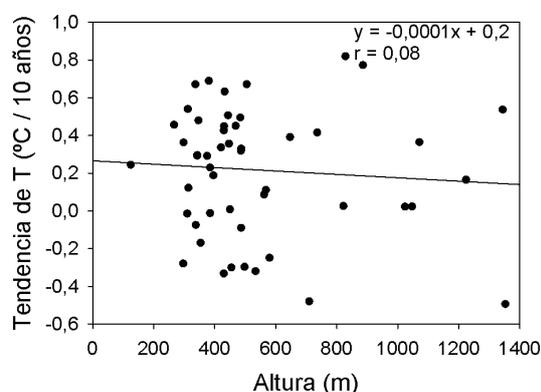


Figura 4.6. Tendencia de la T mínima respecto a la altura

Añadimos una comparación de los valores del coeficiente para los valores de temperaturas máximas y mínimas en la Figura 4.7. y obtenemos una correspondencia con un coeficiente estadísticamente significativo al 0,1% y con una pendiente cercana a la unidad.

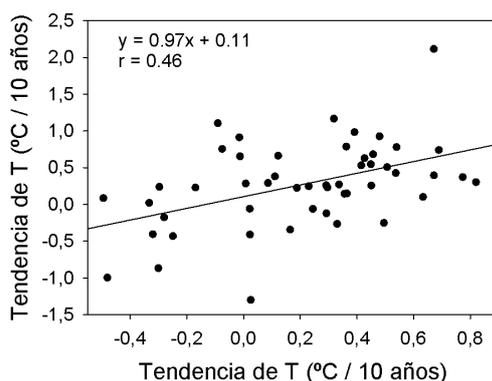


Figura 4.7. Correlación entre la tendencia de T máximas y T mínimas

## 4.2. Coeficiente c. Amplitud anual de la temperatura

Este coeficiente es la amplitud anual de la temperatura, o semirango, ya que lo calculamos refiriéndonos a cero. Nos indica la máxima variación de la temperatura en un año.

Vemos cómo el comportamiento de la amplitud anual de la temperatura máxima y mínima (Figuras 4.8. y 4.9.) es similar

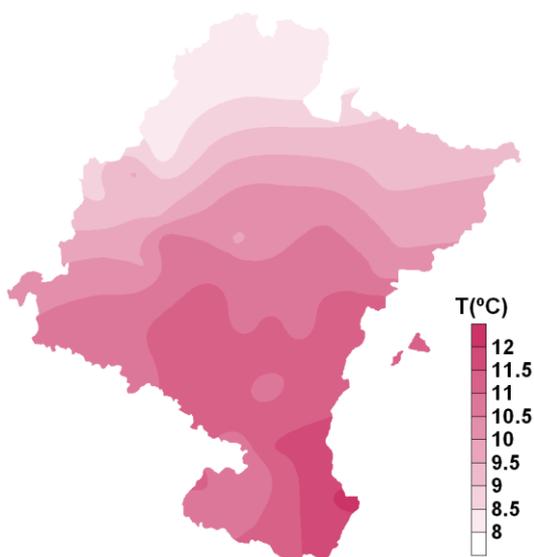


Figura 4.8. Amplitud anual de la T máxima

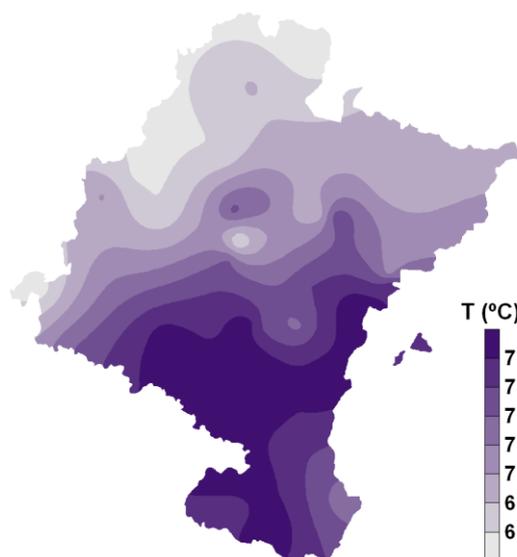


Figura 4.9. Amplitud anual de la T mínima

Ambas amplitudes son máximas en el sur de la provincia teniendo un máximo de amplitud de 12°C para las máximas en el sureste y de 8°C para las mínimas en el suroeste respectivamente y van disminuyendo a medida que nos acercamos al norte, donde la amplitud de las máximas es de 8°C y la de las mínimas es de 6,5°C.

Vemos la dependencia con la altura en las Figuras 4.10. y 4.11., y nos damos cuenta de que a medida que la altura aumenta, la amplitud de la temperatura disminuye, resultado que ya suponíamos. Ambos coeficientes son estadísticamente significativos al 0,1%.

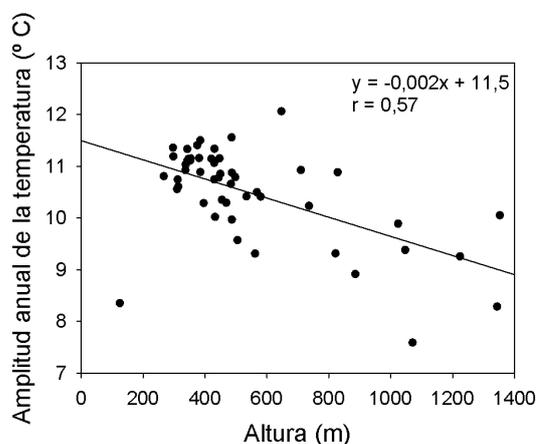


Figura 4.10. Amplitud anual de la T máxima respecto a la altura

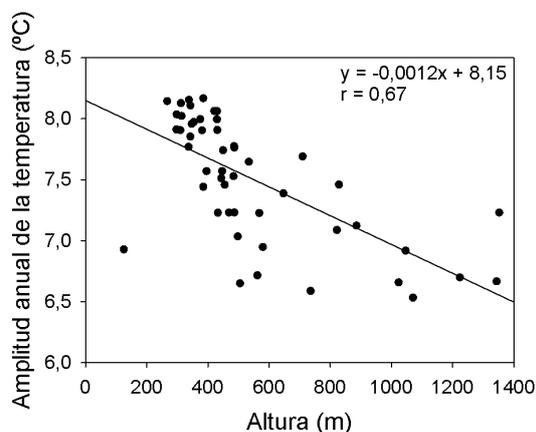


Figura 4.11. Amplitud anual de la T mínima respecto a la altura

En vista a la representación geográfica de este coeficiente en las Figuras 4.8. y 4.9., donde hemos observado una simetría longitudinal, presentamos la relación de los valores de máximas y mínimas obtenidos en función con la latitud en las siguientes Figuras 4.12. y 4.13. Las correlaciones obtenidas son similares, siendo estadísticamente significativas al 0,1%.

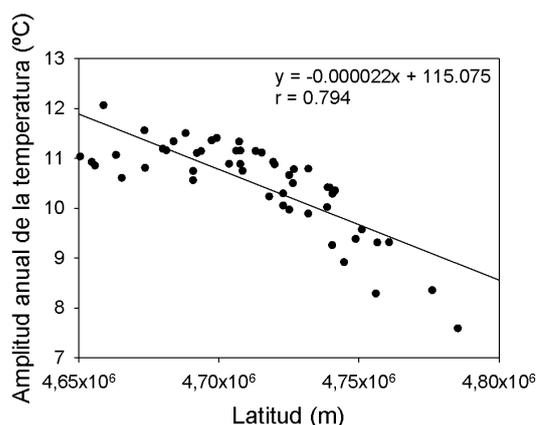


Figura 4.12. Amplitud anual de la T máxima respecto a la latitud

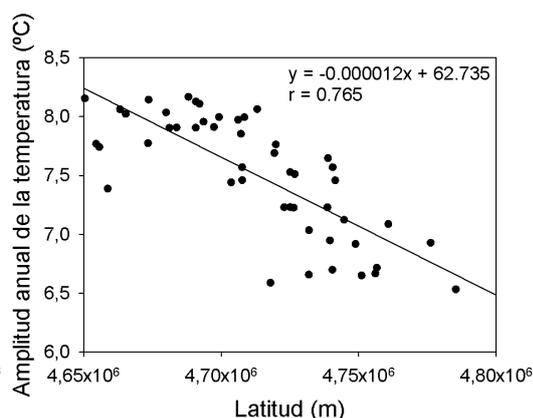


Figura 4.13. Amplitud anual de la T mínima respecto a la latitud

Añadimos también una comparación entre ambos valores, Figura 4.14., correlacionando las máximas con las mínimas y obteniendo un coeficiente significativo al 0,1%.

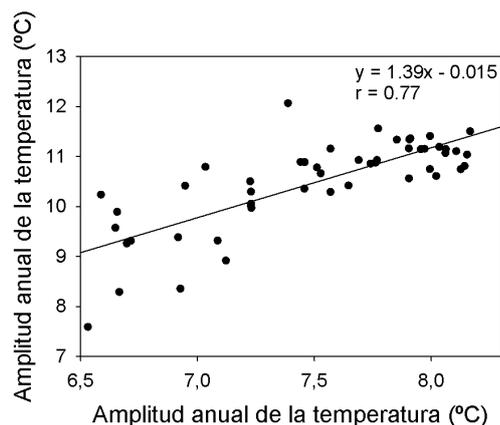


Figura 4.14. Correlación de la amplitud anual de la T máxima con la de la T mínima

### 4.3. Coeficiente $d$ . Crecimiento con el tiempo

Este coeficiente está relacionado con el cambio de la amplitud a lo largo de los 10 años. Se calcula a partir de los coeficientes  $d_1$  y  $d_2$  que acompañan a  $t_{coswt}$  y  $t_{senwt}$  en la regresión múltiple, calculando la raíz de la suma de sus cuadrados y multiplicándolo por el número de días de los 10 años.

En este caso, las Figuras 4.15. y 4.16. nos muestran que los valores del coeficiente  $d$  son muy desiguales en la provincia

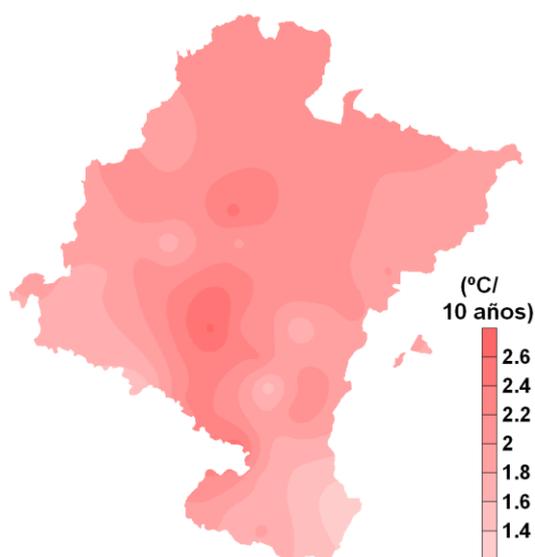


Figura 4.15. Crecimiento del coeficiente  $d$  de T máxima

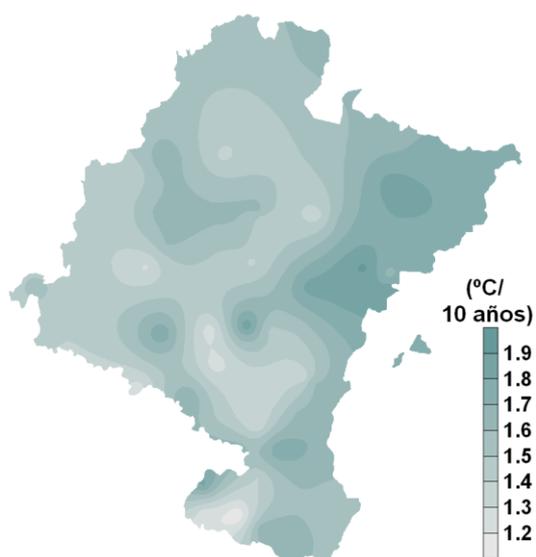


Figura 4.16. Crecimiento del coeficiente  $d$  de T mínima

. En el caso de temperaturas máximas, tenemos un máximo en la parte central en torno a los 2,6°C y en el caso de mínimas, la máxima amplitud en los 10 años se da en

el este de la provincia, alrededor de los 1,9°C. Debemos destacar que tanto para máximas como para mínimas el coeficiente  $d$  ha crecido en las estaciones una media de 2°C para las máximas y 1,54°C para las mínimas.

Observamos en las Figuras 4.17. y 4.18 que la dependencia con la altitud del coeficiente de correlación para las máximas es demasiado bajo, pero para las mínimas es significativo al 5%, destacando que en este caso el crecimiento del coeficiente  $d$  es lineal con la altura a partir de los 600 metros.

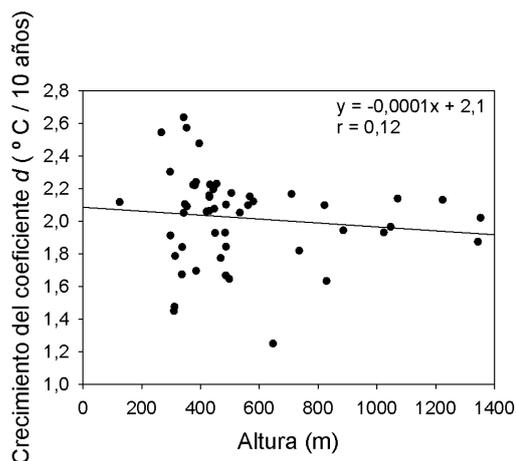


Figura 4.17. Crecimiento del coeficiente  $d$  de T máxima respecto a la altura

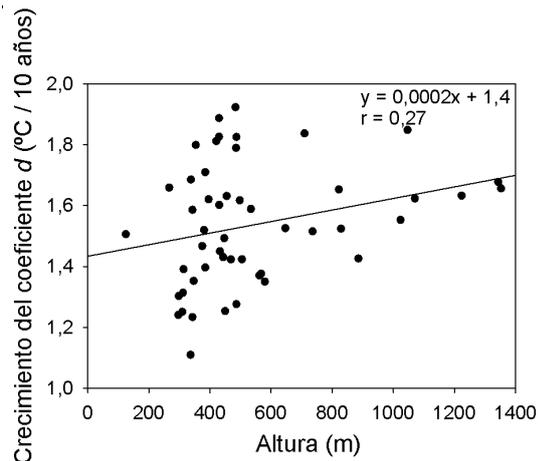


Figura 4.18. Crecimiento del coeficiente  $d$  de T mínima respecto a la altura

Comparamos los datos de máximas con los de mínimas en la Figura 4.19. y obtenemos un coeficiente de correlación prácticamente nulo.

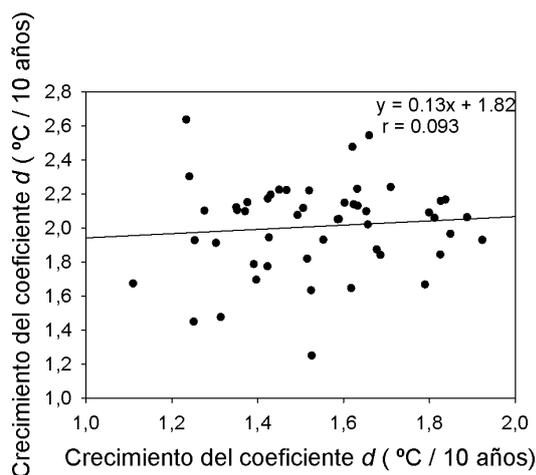


Figura 4.19. Correlación del crecimiento de  $d$  de T máxima con el de T mínima

#### 4.4. Coeficiente $D_0$ . Variación lineal de la amplitud con el tiempo

A continuación, realizamos un estudio para observar cómo se ha comportado la amplitud del ciclo global en cada una de las estaciones, tanto máximas como mínimas.

Presentamos en las Figuras 4.20. y 4.21. sus comportamientos en el marco de la provincia para temperaturas máximas y para mínimas, observando a simple vista que, en ambos casos, la tendencia es negativa.

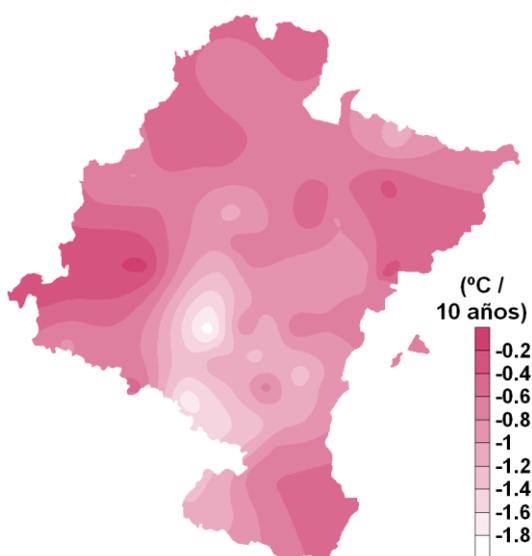


Figura 4.20. Variación de la amplitud para T máx

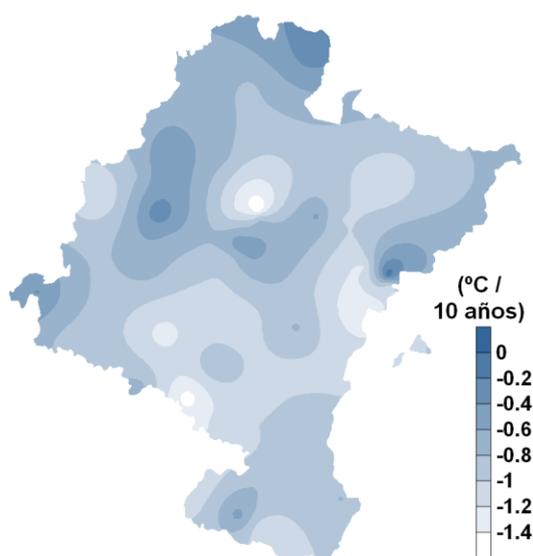


Figura 4.21. Variación de la amplitud para T mín

En las siguientes Figuras 4.22. y 4.23. vemos la correlación de los datos obtenidos para máximas y mínimas temperaturas con la altura

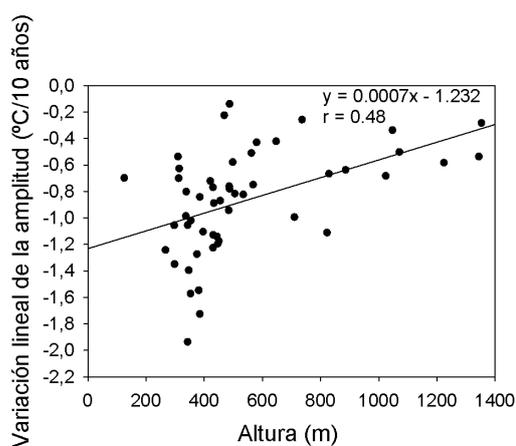


Figura 4.22. Variación lineal de la amplitud para T máximas

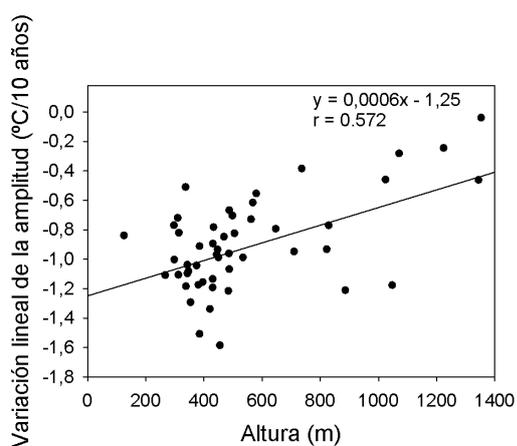


Figura 4.23. Variación lineal de la amplitud para T mínimas

Pese a mostrar cierta dispersión, ambos son estadísticamente significativos. Corroboran además que la variación de la amplitud, en valor absoluto, disminuye con la altura para ambas temperaturas.

En la Figura 4.24. vemos el comportamiento de los resultados obtenidos para máximas temperaturas frente a los de mínimas.

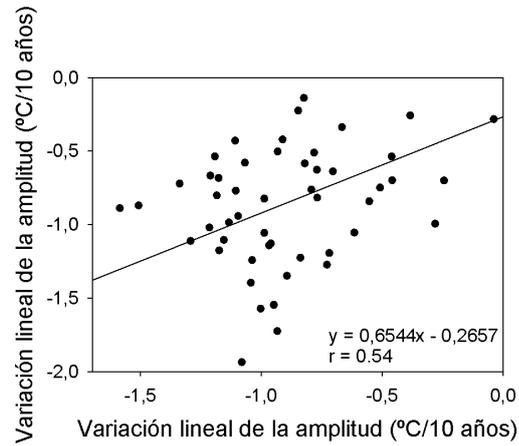


Figura 4.24. Correlación de las variaciones lineales de T máximas frente a T mínimas

**Conclusiones.**

**Futuras líneas de estudio**

Con el fin de hacer un análisis representativo tanto de las temperaturas máximas y mínimas de Navarra como de su evolución temporal, se han considerado las 57 estaciones automáticas que se encuentran uniformemente repartidas en la provincia y que abarcan también un intervalo de alturas amplio. De todas estas estaciones se han excluido seis, ya que su intervalo de medida no ha alcanzado los 10 años establecidos para el estudio. Además, para el análisis de temperatura mínima hemos debido eliminar una estación más, porque solo contaba con el 1% de datos.

Para definir ambas distribuciones de temperatura se han cuantificado distintos indicadores estadísticos robustos que han mostrado que los rangos intercuartílicos son comparables a las medianas. Además el sesgo de cada distribución tiene signo opuesto, siendo positivo para las máximas y negativo para las mínimas. Adicionalmente se ha realizado una representación geográfica de cada indicador estadístico para cada distribución que ha revelado una mejor correlación con la altura para la mediana de la temperatura máxima y una variación latitudinal para el rango intercuartílico y para el coeficiente de curtosis (principalmente el correspondiente a temperaturas máximas). También hemos observado una destacada dispersión del sesgo.

En cuanto a lo referido a la evolución de la temperatura, tanto para la distribución de temperaturas máximas como para la de mínimas, el coeficiente  $B_0$  indica un crecimiento generalizado de la tendencia de la temperatura. El promedio de ambas está equilibrado, resultando sutilmente superior para las máximas ( $0,28^\circ\text{C}$ ) que para las mínimas ( $0,21^\circ\text{C}$ ). La correlación entre ambas es positiva, de manera que ambas crecen con una pendiente próxima a la unidad.

Las amplitudes anuales de máximas y mínimas tienen un comportamiento similar, siendo el promedio de los valores de máximas  $10,5^\circ\text{C}$  y el de los valores de mínimas  $7,5^\circ\text{C}$ . Se aprecia una dependencia latitudinal, de manera que para latitudes mínimas las amplitudes son máximas y decrecen a medida que nos desplazamos hacia latitudes menores. La correlación entre ambas variables es positiva, es decir, a mayor amplitud de máxima, mayor de mínima.

En cuanto a los resultados obtenidos para la variación de la amplitud del ciclo anual, se han alcanzado unos valores de decrecimiento de  $0,9^\circ\text{C}$  para ambas temperaturas, observando que al aumentar la altura los cambios de amplitud han sido menores.

Los resultados obtenidos en el presente estudio son alentadores, sin embargo, cuentan con ciertos inconvenientes. El principal es la extensión temporal del análisis. Con el fin de conseguir un intervalo de medidas más amplio, sería recomendable

tomar los datos de las estaciones manuales, que, además, al ser más numerosas mejorarán la cobertura espacial. Conseguir esta mayor extensión permitiría contrastar los resultados de este trabajo y establecer periodos con un crecimiento desigual de la temperatura. Adicionalmente, otra línea de trabajo a seguir sería realizar un análisis de aglomerados (*clusters*) para agrupar las estaciones con características similares.

# Referencias

Bajat, B., Blagojević, D., Kilibarda, M., Luković, J., Tošić, I. Spatial analysis of the temperature trends in Serbia during the period 1961-2010. (2015) *Theoretical and Applied Climatology*, 121, pp. 289–301.

Buragiene, S., Šarauskis, E., Romaneckas, K., Sasnauskiene, J., Masilionyte, L., Kriaučiuniene, Z. Experimental analysis of CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils subjected to five different tillage systems in Lithuania (2015) *Science of the Total Environment*, 514, pp. 1-9.

Ceppi, P., Scherrer, S.C., Fischer, A.M., Appenzeller, C. Revisiting Swiss temperature trends 1959-2008 (2012) *International Journal of Climatology*, 32 (2), pp. 203-213.

Franchini, M., Mannucci, P.M. Impact on human health of climate changes (2015) *European Journal of Internal Medicine*, 26 (1), pp. 1-5.

Gocic, M., Trajkovic, S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia (2013) *Global and Planetary Change*, 100, pp. 172-182.

Hawkins, G.A., Vivoni, E.R., Robles-Morua, A., Mascaro, G., Rivera, E., Dominguez, F. A climate change projection for summer hydrologic conditions in a semiarid watershed of central Arizona (2015) *Journal of Arid Environments*, 118, pp. 9-20.

Jinming, F., Yonghe, L., Zhongwei, Y. Analysis of surface air temperature warming rate of China in the last 50 years (1962–2011) using k-means clustering (2015). *Theor Appl. Climatol.*, 120, pp. 785–796.

Kim, C.T., Lim, Y.-H., Woodward, A., Kim, H. Heat-attributable deaths between 1992 and 2009 in Seoul, South Korea (2015) *PLoS ONE*, 10 (2), art. no. e0118577.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated (2006) *MEteoorologische Zeitschrift*, 15 (3), pp. 259-263.

Li, Y., Huang, J., Ji, M., Ran, J. Dryland expansion in northern China from 1948 to 2008 (2015) *Advances in Atmospheric Sciences*, 32 (6), pp. 870-876.

Liu, W., Xu, Z., Li, F., Zhang, L., Zhao, J., Yang, H. Impacts of climate change on hydrological processes in the Tibetan Plateau: a case study in the Lhasa River basin (2015) *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 14 p. Article in Press.

Sachs, L. *Applied statistics, a handbook of techniques*. Springer Series in Statistics, 1982.

Muhling, B.A., Liu, Y., Lee, S.-K., Lamkin, J.T., Roffer, M.A., Muller-Karger, F., Walter, J.F. Potential impact of climate change on the Intra-Americas Sea: Part 2. Implications for Atlantic bluefin tuna and skipjack tuna adult and larval habitats (2015) *Journal of Marine Systems*, 148, pp. 1-13.

Pérez, I.A., Sánchez, M.L., García, M.T., Ozores, M., Pardo, N. Analysis of carbon dioxide concentration skewness at a rural site (2014) *Science of the Total Environment*, 476-477, pp. 158-164.

Sánchez, M.L., García, M.A., Pérez, I.A., De Torre, B. Evaluation of surface ozone measurements during 2000-2005 at a rural area in the upper Spanish plateau (2008) *Journal of Atmospheric Chemistry*, 60 (2), pp. 137-152.

Sánchez, M.L., Pérez, I.A., García, M.A. Study of CO<sub>2</sub> variability at different temporal scales recorded in a rural Spanish site (2010) *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (9), pp. 1168-1173.

Santos, R.M.B., Sanches Fernandes, L.F., Varandas, S.G.P., Pereira, M.G., Sousa, R., Teixeira, A., Lopes-Lima, M., Cortes, R.M.V., Pacheco, F.A.L. Impacts of climate change and land-use scenarios on *Margaritifera margaritifera*, an environmental indicator and endangered species (2015) *Science of the Total Environment*, 511, pp. 477-488.

Shirvani, A. Change point analysis of mean annual air temperature in Iran (2015) *Atmospheric Research*, 160, pp. 91-98.

Sun, Q., Kong, D., Miao, C., Duan, Q., Yang, T., Ye, A., Di, Z., Gong, W. Variations in global temperature and precipitation for the period of 1948 to 2010 (2014) *Environmental Monitoring and Assessment*, 186 (9), pp. 5663-5679.

Valverde, P., Serralheiro, R., de Carvalho, M., Maia, R., Oliveira, B., Ramos, V. Climate change impacts on irrigated agriculture in the Guadiana river basin (Portugal) (2015) *Agricultural Water Management*, 152, pp. 17-30.

Wilks, D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. International Geophysics series. Elsevier, 2006.

Yu, L., Zhang, S., Tang, J., Liu, T., Bu, K., Yan, F., Yang, C., Yang, J. The effect of deforestation on the regional temperature in Northeastern China. (2015) *Theoretical and Applied Climatology*, 120, pp. 761-771.

# **Lista de figuras y tablas**

Figura 1.1. Mapa de estaciones manuales .....	14
Figura 1.2. Clasificación de Köppen - Geiger en Navarra .....	15
Figura 2.1. Estación automática localizada en Ablitas .....	17
Figura 2.2. Ejemplo de los datos descargados en Ablitas del año 2005.....	18
Figura 2.3. Distribución de los intervalos de medida de las estaciones automáticas...	19
Figura 2.4. Distribución de las estaciones automáticas en la provincia de Navarra .....	21
Figura 3.1. Desviaciones de la curva de campana (distribución normal).....	25
Tabla 3.1. Coeficientes de correlación para la distribución de temperaturas máximas	26
Tabla 3.2. Coeficientes de correlación para la distribución de temperaturas mínimas	26
Tabla 3.3. Medianas de los indicadores estadísticos de las distribuciones de máximas y mínimas .....	26
Figura 3.2. Medianas de T máxima..... .	27
Figura 3.3. Medianas de T mínima.....	27
Figura 3.4. T máxima con la altura.....	28
Figura 3.5. T mínima con la altura.....	28
Figura 3.6. Correlación de T máxima con la T mínima .....	28
Figura 3.7. Rango intercuartílico de T máximas .....	29
Figura 3.8. Rango intercuartílico de T mínimas.....	29
Figura 3.9. Rango intercuartílico de T máximas respecto a la altura .....	29
Figura 3.10. Rango intercuartílico de T mínimas respecto a la altura.....	29
Figura 3.11. Rango intercuartílico de T máximas respecto a la latitud .....	30
Figura 3.12. Rango intercuartílico de T mínimas respecto a la latitud.....	30
Figura 3.13. Correlación del rango intercuartílico de T máximas con el de T mínimas .	30
Figura 3.14. Sesgo de T máximas.....	31
Figura 3.15. Sesgo de T mínimas.....	31
Figura 3.16. Sesgo de T máximas respecto a la altura.....	32
Figura 3.17. Sesgo de T mínimas respecto a la altura .....	32
Figura 3.18. Correlación del sesgo de T máximas con el de T mínimas .....	32
Figura 3.20. Coeficiente de curtosis de T máximas .....	33
Figura 3.21. Coeficiente de curtosis de T mínimas.....	33

Figura 3.22. Coeficiente de curtosis de T máximas .....	33
Figura 3.23. Coeficiente de curtosis de T mínimas.....	33
Figura 3.24. Coeficiente de curtosis de T máximas respecto a la latitud.....	34
Figura 3.25. Coeficiente de curtosis de T mínimas respecto a la latitud .....	34
Figura 3.26. Correlación del coeficiente de curtosis de T máximas con el de T mínimas.. .....	34
Figura 4.1. Comportamiento de T máximas .....	37
Figura 4.2. Comportamiento de T mínimas.....	37
Figura 4.3. Tendencia de la T máxima.....	38
Figura 4.4. Tendencia de la T mínima.....	38
Figura 4.5. Tendencia de la T máxima respecto a la altura .....	39
Figura 4.6. Tendencia de la T mínima respecto a la altura.....	39
Figura 4.7. Correlación entre la tendencia de T máximas y T mínimas.....	40
Figura 4.8. Amplitud anual de la T máxima.....	40
Figura 4.9. Amplitud anual de la T mínima.....	40
Figura 4.10. Amplitud anual de la T máxima respecto a la altura .....	41
Figura 4.11. Amplitud anual de la T mínima respecto a la altura .....	41
Figura 4.12. Amplitud anual de la T máxima respecto a la latitud .....	41
Figura 4.13. Amplitud anual de la T mínima respecto a la latitud .....	41
Figura 4.14. Correlación de la amplitud anual de la T máxima con la de la T mínima... ..	42
Figura 4.15. Crecimiento del coeficiente $d$ de T máxima .....	42
Figura 4.16. Crecimiento del coeficiente $d$ de T mínima.....	42
Figura 4.17. Crecimiento del coeficiente $d$ de T máxima respecto a la altura .....	43
Figura 4.18. Crecimiento del coeficiente $d$ de T mínima respecto a la altura.....	43
Figura 4.19. Correlación del crecimiento de $d$ de T máxima con el de T mínima .....	43
Figura 4.20. Variación de la amplitud para T máx.....	44
Figura 4.21. Variación de la amplitud para T mín.....	44
Figura 4.22. Variación lineal de la amplitud para T máximas.....	44
Figura 4.23. Variación lineal de la amplitud para T mínimas .....	44

Figura 4.24. Correlación de las variaciones lineales de T máximas frente a T mínimas ....  
..... 45