



FACULTAD DE CIENCIAS

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Temperatura del aire en las islas Livingston y
Decepción, Antártida, en el periodo 2006-2021, y
análisis de las tendencias de evolución.**

Autora: Aruca Pedrero Redondo

Tutor: Miguel Ángel de Pablo Hernández

2022

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a los datos recopilados por los investigadores del Grupo de Estudio de Permafrost Antártico de la Unidad de Geología de la Universidad de Alcalá, integrados en el Grupo de Investigación de alto rendimiento “Agua, Clima y Medio Ambiente”. Estos datos son el resultado de diversos proyectos de investigación de los suelos congelados en las Shetland del Sur, Antártida, iniciados en el año 2006, y financiados por el Plan Nacional de Investigación y Desarrollo del Gobierno de España: PERMAMODEL (CGL2004-20896-E), PERMAPLANET (CTM2009-10165), ANTARPERMA (CTM2011-15565-E), PERMASNOW (CTM2014-52021-R), así como por la financiación del Comité Polar Español para el mantenimiento de estaciones de permafrost en las islas Livingston y Decepción de la Antártida (PERMATHERMAL). Los datos han sido recopilados gracias a la labor de los investigadores de la UAH desplazados cada año a la Antártida, y al imprescindible apoyo logístico del Comité Polar Español, la Unidad de Tecnología Marina, Ejército de Tierra y Armada Española.

También quería agradecer a mi familia, por ayudarme en todos los problemas que he tenido en la realización de este TFG, y por apoyarme en los momentos más complicados.

Resumen

El planeta Tierra está sufriendo un calentamiento a nivel global desde hace décadas y una de las zonas más afectadas es el continente antártico. Sin embargo, aunque el sector occidental de la península Antártica es uno de los sectores de este continente que más se ha calentado desde los años 50 del pasado siglo XX, hay trabajos que apuntan a un enfriamiento en los últimos años. Por ello, el grupo de investigadores PERMATHERMAL ha estado recogiendo datos desde el año 2000 en dos islas cercanas a la península Antártica para detectar los cambios que se estaban produciendo. El objetivo que persigue este trabajo es analizar estos registros, calcular sus índices de congelación y hacer unas proyecciones a futuro para evaluar el escenario térmico esperado para el año 2100, considerando tanto las tendencias observadas en los datos, como las propuestas en los escenarios del IPCC. Tras el análisis de las temperaturas y el cálculo de las medias, mínimas y máximas, se han obtenido tendencias ascendentes en las 8 estaciones de estudio. Las temperaturas resultantes de esas tendencias observadas en los datos determinan temperaturas por encima de 0 °C en todas las estaciones para 2100, al igual que las halladas con los incrementos dados por el IPCC, aunque estas últimas son más bajas. A pesar del aumento de las temperaturas descrito en todas las estaciones, cada una de ellas tiene unas temperaturas diferentes en función de la afección del viento o de la orografía presente en la zona. Por su parte, los índices describen cambios en la duración o intensidad de los inviernos y veranos, resultando los primeros más suaves y los segundos más cálidos con el paso de los años.

Palabras clave: Cambio climático, la Antártida, IPCC, temperaturas, calentamiento global, tendencias a futuro e índices de congelación y descongelación.

Abstract

The planet Earth is suffering a global warming since decades ago, and one of the most affected zones is the Antarctic continent. However, although the occidental sector of the Antarctic Peninsula is the one where the continent has gotten warm the most since the 50's in the 20th century, there are some investigations that point to a cooler tendency in the last years. Therefore, the group of researchers PERMATHERMAL has been collecting data since 2000 in two islands in the Antarctic peninsula to evaluate the thermic changes produced. The goal of this project is to analyse these records, calculate the freezing and thawing -degree days and make a future forecast to know the expected thermic scenario for 2100, considering both observed tendencies and the ones suggested by the IPCC. After the temperature's analyse and the calculation of the mean, minimum and maximum temperatures, the natural tendencies have been obtained for the 8 stations in the study. The temperatures resulting with the observed tendencies achieve results above 0 °C in every station for 2100. The same happens with the increases set by the IPCC, but these ones are lower than the previous ones. Despite the temperature's increasing describe in all the stations, each of them has a different data depending on the wind or the orography influence in their surrounding area. Furthermore, the freezing and thawing -degree days describe changes in the duration and intensity of the winters and summers, making the first ones softer and the second ones warmer with the passing of time.

Keywords: Climate change, the Antarctic, IPCC, temperatures, global warming, future tendencies and freezing/thawing -degree days.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. El calentamiento global.....	1
1.2. El aumento de las temperaturas en la Antártida	2
1.3. ¿Calentamiento o enfriamiento?.....	3
1.4. Objetivos.....	4
2. MATERIAL Y MÉTODOS	4
2.1 Área de estudio.....	4
2.2 Estaciones de toma de datos.....	6
2.3 Toma y procesado de datos.	7
2.4 Metodología.....	8
2.4.1. Análisis de las temperaturas.	8
2.4.2. Evolución futura.....	8
3. EVOLUCIÓN INTERANUAL	9
3.1 Evolución de las temperaturas.....	9
3.2 Evolución de los índices.	12
4. EVOLUCIÓN FUTURA	13
4.1 Evolución de las tendencias observadas	13
4.2 Evolución de las tendencias según el IPCC.	14
5. DISCUSIÓN.	16
5.1 Análisis de la evolución de las temperaturas.....	16
5.2 Análisis de la evolución de los índices.....	19
5.3 Análisis de las evoluciones futuras.	22
6. CONCLUSIONES	24
REFERENCIAS	26
ANEXOS	33
Anexo I. Código de R.....	34

I.1. Descripción del código	34
I.2. Código de programación de Rstudio.....	35
Anexo II. Evolución interanual de las temperaturas.....	40
Anexo III. Tablas comparativas de las estaciones.....	42
Anexo IV. Evolución anual y mensual de los FDD y TDD.....	43
Anexo V. Comparativa anual de las temperaturas frente a la altitud.	46

FIGURAS

Figura 1. Evolución temporal de las temperaturas medias entre 1966–2015 en distintas estaciones en el sector occidental de la península Antártica (Tomado de Oliva et al., 2017).	3
Figura 2. Mapa de localización de las islas del área de estudio y de la localización de las estaciones de medida (tomado de De Pablo et al., 2016).	5
Figura 3. Temperaturas medias anuales y tendencias de cada estación.	9
Figura 4. Evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas anuales por estación.....	10
Figura 5. Comparación de la variabilidad térmica anual media de las estaciones.	11
Figura 6. Evolución de los índices mensuales (izquierda) y anuales (derecha) de la estación DEC_CL.	12
Figura 7. Temperaturas esperadas siguiendo las tendencias de ascenso descritas por los datos.	14
Figura 8. Abanico de temperaturas esperadas para cada estación según el IPCC.....	15
Figura 9. Media de las temperaturas medias frente a la altura.....	18
Figura 10. Relación de la altitud con los índices medios de congelación (FDD, izquierda) y descongelación (TDD, derecha), en °C·día.	20
Figura 11. Comparación de la altitud con el aumento de la temperatura en cada estación.	23
Figura IV.1. Evolución de los índices mensuales (izquierda) y anuales (derecha) de las estaciones DEC_CL, LIV_LL, LIV_JC y LIV_NI.....	44
Figura IV.2. Evolución de los índices mensuales (izquierda) y anuales (derecha) de las estaciones LIV_IN, LIV_CR, LIV_MO y LIV_SO.....	45
Figura V.1. Temperaturas medias anuales frente a la altura (2006-2017).	46
Figura V.2. Temperaturas medias anuales frente a la altura (2018-2021).	47

TABLAS

Tabla 1. Localización de las estaciones de recogida de la temperatura del aire (modificado de: De Pablo, 2021).	6
Tabla 2. Evolución de la disponibilidad de datos de temperatura del aire (en verde) en cada una de las estaciones de medida para el periodo 2006-2021. ..	7
Tabla 3. Rangos de incremento de temperatura para el año 2100 (IPCC, 2014).	9
Tabla 4. Tendencias de aumento de las temperaturas de las estaciones.	12
Tabla 5. Temperaturas esperadas siguiendo las tendencias de aumento descritas por los datos.	13
Tabla 6. Temperaturas (en °C) esperadas siguiendo las tendencias de aumento del IPCC, clasificadas por escenario y año.	14
Tabla 7. Temperaturas medias mensuales (en °C), FDD y TDD de los últimos tres años del estudio en DEC_CL.	21
Tabla II.1. Temperaturas anuales por estación, medido en °C.	40
Tabla III.1. Comparativa de las temperaturas anuales de cada estación.....	42
Tabla III.2. Comparativa de las temperaturas mensuales de cada estación....	42
Tabla IV.1. FDD y TDD anuales por estación medidos en °C·día.....	43

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El calentamiento global

Uno de los grandes problemas más importantes a escala planetaria es el calentamiento global: el aumento de las temperaturas, que aceleran el cambio climático natural que sufre la Tierra (Viñas, 2019).

Aunque muy discutido, parece que la acción antrópica juega un papel muy importante por la emisión masiva de gases de efecto invernadero (GEI), como el CO₂ y CH₄, entre otros (Viñas, 2019). Este proceso fue descubierto a mediados del siglo XIX gracias a la que se considera la pionera y descubridora del efecto invernadero, Eunice Foote (1819-1888). Con un experimento casero muy sencillo, descubrió que grandes cantidades de CO₂ aumentan la temperatura ambiental y, por lo tanto, la temperatura atmosférica también podría verse afectada (Ortiz y Jackson, 2020).

Sin embargo, no fue hasta los años 70 del siglo pasado cuando el cambio climático generado por el sobrecalentamiento de la atmósfera producido por esos gases empezó a cobrar importancia y ser tenido en cuenta, debido a la publicación de unos estudios por parte del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT, 1970, 1971a, 1971b).

Se estima que la temperatura media del planeta ha aumentado 1 °C desde 1950, y los escenarios de futuro no son mejores, discutiéndose subidas de hasta 4,8 °C. De hecho, organismos como el IPCC (*the Intergovernmental Panel on Climate Change*) han querido desarrollar cuatro trayectorias de concentración representativas (RCP) distintas (IPCC, 2014). Estos RCP son escenarios que comprenden del año 2005 al 2100 y en los que se tienen en cuenta diferentes situaciones de emisiones de GEI, aerosoles y uso del suelo de manera que se estima un aumento de las temperaturas globales (Moss et al., 2008).

En todo caso, el ascenso de temperaturas registrado hasta el momento ya ha traído consigo una alteración en la distribución de las temperaturas a nivel planetario, aumentando la probabilidad de temperaturas y fenómenos meteorológicos extremos (Levine y Steele, 2021). De hecho, las zonas terrestres afectadas por estas temperaturas más extremas se han visto incrementadas del 0,1% que ocupaban en 1951 al 9,6% en 2011 (Hansen et al., 2013). En base a

este estudio, estas áreas se han visto incrementadas en 100 veces, sólo con el aumento de 1 °C (Levine y Steele, 2021).

Según algunos investigadores, como consecuencia de las actividades y acciones humanas, el clima a nivel global ha experimentado un cambio en sus temperaturas medias, lo que conlleva una alteración de los patrones climáticos, resultando en que zonas climáticas delimitadas por la escala de Köppen habrían sufrido diferentes alteraciones (Cui et al., 2020). Aunando los resultados obtenidos en varios trabajos, en el intervalo de 1901 y 2005, en periodos de unos 15, 20, 25 o 30 años, Cui y colaboradores (2020) pudieron comprobar que las zonas clasificadas con climas polares (E) habrían experimentado una disminución de entre un 0,50-0,98% de su expansión total (Fraedrich et al., 2001; Kalvová et al., 2003; Beck et al., 2005; Chen y Chen, 2013; Belda et al., 2014; Chan y Wu, 2015; Rohli, et al., 2015). Por el contrario, las zonas de climas áridos (B) habían crecido entre un 0,7-1,51% (Beck et al., 2005; Chen y Chen, 2013; Chan y Wu, 2015; Rohli, et al., 2015); las áreas tropicales (A), entre un 0,38-0,46% (Fraedrich et al., 2001; Kalvová et al., 2003; Belda et al., 2014); y los climas fríos (D), alrededor de un 0,46% (Kalvová et al., 2003; Belda et al., 2014).

1.2. El aumento de las temperaturas en la Antártida

Ese incremento de 1°C la temperatura del aire a escala global ha afectado gravemente a los polos. El Ártico ha sufrido un deshielo y reducción de su extensión (Levine y Steele, 2021), disminuyendo la superficie ártica en un 60% entre 1979 y 2019. Junto con el Ártico, el continente antártico es una de las regiones del planeta más perjudicadas y afectadas por el cambio climático. Muchos estudios realizados a finales de los años 90 y principios de este siglo han remarcado una alta variabilidad climática en la Antártida, especialmente en la península Antártica (King, 1994; Vaughan et al., 2001; Marshall et al., 2002). Jones (1995) estudió la variación térmica ocurrida en el periodo de 1957-94, y obtuvo que la Antártida sufrió un aumento de 0,75 °C. En otros estudios posteriores, Turner y colaboradores (2005) detectaron diferentes tendencias de las temperaturas a lo largo del continente antártico en el periodo de 1971-2000. La más alta se encontró en el noroeste de la península Antártica, siendo +0,56 °C/década entre 1951-2000 (Turner et al., 2005). Aunque las tendencias descienden según se alejan de este punto, obteniendo otras entre +0,20 y +0,29

°C/década (Turner et al., 2005). Según este mismo autor, el aumento de las temperaturas queda patente con la disminución de la superficie de hielo sobre el mar, poniendo de manifiesto la relación entre estas dos variables.

1.3. ¿Calentamiento o enfriamiento?

A pesar de las tendencias tan claras hacia el calentamiento en toda la Antártida, existen también algunos trabajos que indican que ha ocurrido un enfriamiento en las últimas décadas. Así, Doran y colaboradores (2002) establecieron un descenso de 0,7 °C/década en la Antártida entre los años 1986-2000, mientras que Oliva y colaboradores (2017) observaron que la temperatura había disminuido entre 0,5 y 0,9 °C desde 1996 a 2015 en la mayor parte de la península Antártica (*Figura 1*). Por otro lado, en el estudio realizado por Turner y colaboradores (2005) en el que analizaban las tendencias térmicas en todo el continente antártico, describieron que la estación que se enfriaba más rápidamente se encontraba en el centro del continente. Algunos autores creen que este fenómeno se debe a cambios en la circulación atmosférica (Bertler et al., 2004), mientras que otros lo atribuyen a corrientes de aire marítimo que penetran en el continente (Turner et al., 2009), o a la influencia de las oscilaciones de El Niño/La Niña (Turner et al., 2016; Oliva et al., 2017).

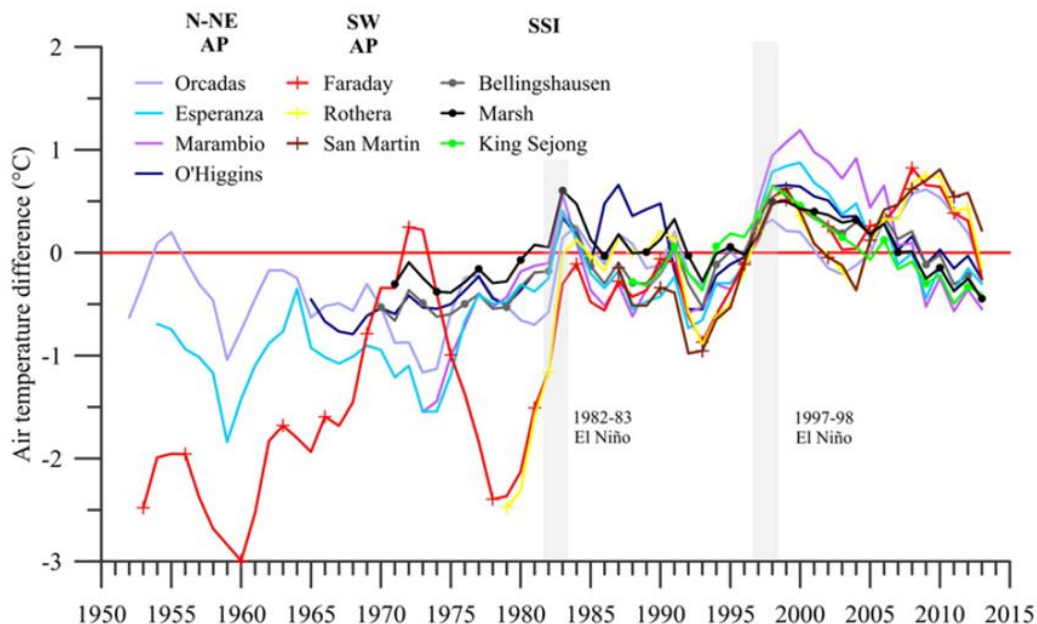


Figura 1. Evolución temporal de las temperaturas medias entre 1966–2015 en distintas estaciones en el sector occidental de la península Antártica (Tomado de Oliva et al., 2017).

Esta situación en la que, por un lado, se observa que el calentamiento global del planeta está aumentando las temperaturas de la Antártida a un ritmo

sin precedentes, mientras que por otro, se defiende un descenso de las temperaturas en la segunda década de este siglo, hace necesario un estudio más detallado de la variabilidad climática de la zona de la península Antártica para evaluar si estas tendencias de enfriamiento representan tendencias sólidas o son ciclos internos de la variabilidad térmica de la zona que sí está sufriendo un calentamiento.

1.4. Objetivos

Por ello, en este trabajo se van a analizar los datos de temperatura del aire recogidos entre los años 2006 y 2021 en 8 estaciones para el control térmico del permafrost, PERMATHERMAL, que el equipo de investigación de la Universidad de Alcalá tiene situadas en las islas Livingston y Decepción, en el archipiélago de las Shetland del Sur, en el sector occidental de la península Antártica (de Pablo, 2021).

Los objetivos de este estudio son:

- Caracterizar la evolución de las temperaturas en estas dos islas, con el fin de evaluar cuál ha sido la tendencia en el periodo 2006-2021, mediante el análisis de la temperatura del aire y de los índices de congelación y descongelación en las 8 estaciones de medida.
- Calcular las temperaturas futuras hasta el año 2100, de acuerdo con las tendencias observadas en los datos.
- Calcular las temperaturas futuras hasta el año 2100, de acuerdo con los distintos escenarios que establecen los modelos de evolución del IPCC.
- Evaluar la evolución pasada y futura de las temperaturas del aire en la zona de estudio en el contexto del calentamiento global.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

Las estaciones de medida de la temperatura del aire se encuentran repartidas por las penínsulas Hurd y Byers de la isla Livingston y en la isla Decepción (*Figura 2*), pertenecientes al archipiélago Islas Shetland del Sur, en la zona más septentrional del continente de la Antártida (Jigena-Antelo et al., 2015; de Pablo, 2021).

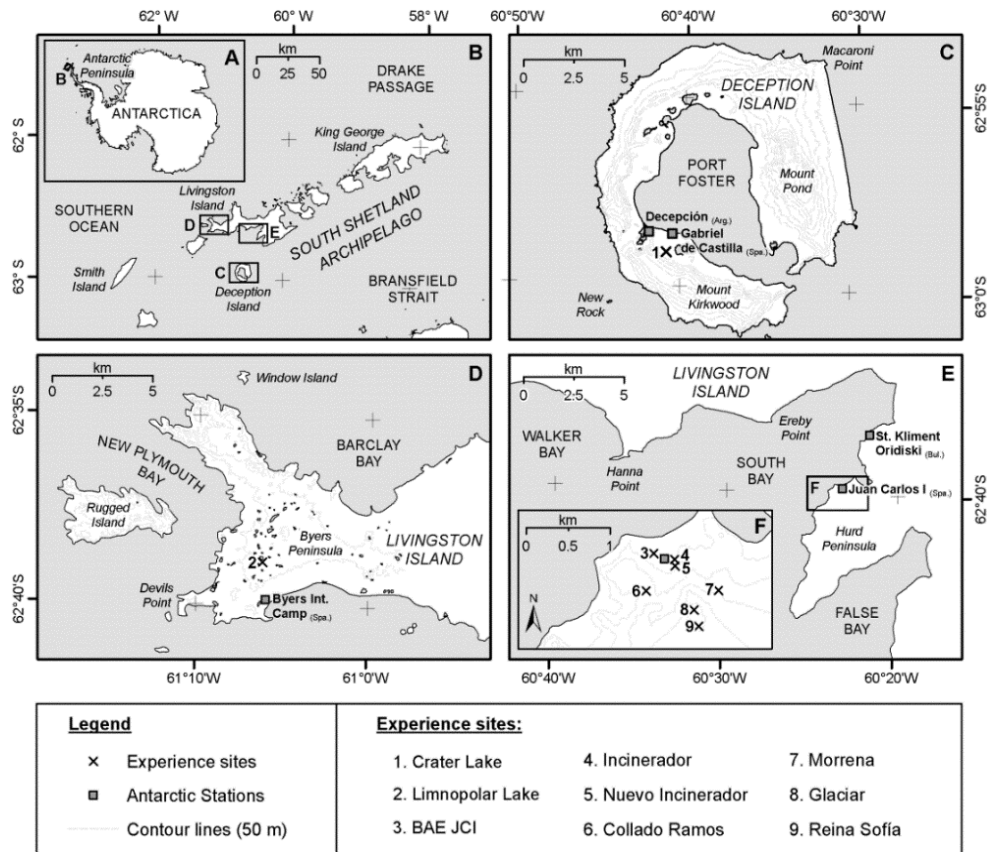


Figura 2. Mapa de localización de las islas del área de estudio y de la localización de las estaciones de medida (tomado de De Pablo et al., 2016).

La Isla Decepción es uno de los volcanes que permanecen activos en la actualidad en la Antártida (Jigena-Antelo et al., 2015). Tiene forma de herradura debido al colapso de la caldera central, por lo que actualmente, el mar entra dentro de la isla formando una bahía interior llamada Puerto Foster. El edificio volcánico tiene un diámetro de 30 km en su base, en el fondo oceánico de la cuenca del Bransfield, y una altura de 1500 m sobre la misma, aunque en la parte emergida sólo tiene 13 km de diámetro y alcanza cotas máximas de 539 msnm (Goyanes et al., 2014; Jigena-Antelo et al., 2015). Se han registrado evidencias de múltiples erupciones, la más reciente en 1969-1970, lo que explica la presencia de cenizas y piroclastos en la isla, incluyendo gran parte de los glaciares existentes (Goyanes et al., 2014). El clima de Decepción es frío, correspondiente a *EF* (polar marítimo templado, según la escala de Koppen), con temperaturas medias anuales de -2 °C y precipitaciones medias anuales de 990 mm, principalmente en forma de nieve (Bañón y Vasallo, 2015).

Por otro lado, la Isla Livingston es la segunda más extensa del archipiélago, con 70 km de largo y un ancho de 4 km en las zonas más estrechas,

hasta unos 32 km en las partes más anchas (Jigena-Antelo et al., 2015), ocupando un total de 845 km² (Martínez de Pisón et al., 1991) de los cuales solo el 10% se encuentra libre de hielo permanente (López Martínez, et al., 1991). Tiene su origen en un arco volcánico del Jurásico Superior (Leppe et al., 2003), asociado a un borde de placa convergente (Gumiel et al., 1999). El punto más alto de la isla se sitúa en el sector oriental, alcanzando 1770 msnm (Martínez de Pisón et al., 1991). Geológicamente, está formada por unidades volcánicas y volcanoclásticas también del Jurásico (Leppe et al., 2003; Ruiz-Fernández et al., 2016).

En esta isla el clima varía dependiendo de la zona, ya que es más extensa que la anterior. Concretamente, en la zona oriental, donde se encuentra la península Byers, el clima es húmedo, con una precipitación media anual de 800 mm y una temperatura media anual de -2,8 °C (Bañón, 2001; Toro et al., 2007; Bañón et al., 2013). Sin embargo, en la península de Hurd, según la Base Antártica Juan Carlos I, la temperatura media anual es de -1,9 °C (Ramos et al., 2008b), la cual desciende gradualmente según se asciende altitudinalmente, hasta registrar valores de -4,2 °C en lo alto del pico Reina Sofía (275 msnm) (Ramos et al., 2008a).

2.2 Estaciones de toma de datos.

En este trabajo se van a emplear los datos de temperatura del aire tomados en 8 de las estaciones para el control térmico del permafrost de la red PERMATHERMAL en esas islas (de Pablo, 2021). De las estaciones disponibles, 7 de ellas se encuentran situadas en la isla Livingston, de las cuales 1 se localiza en la península Byers, y las otras 6 en península Hurd, distribuidas altitudinalmente, entre 11 y 274 msnm (*Tabla 1*). La otra estación considerada se encuentra en la isla Decepción (*Tabla 1*).

Tabla 1. Localización de las estaciones de recogida de la temperatura del aire (modificado de: De Pablo, 2021).

		Estación	Siglas	Altitud (msnm)
Isla Decepción		Crater Lake	DEC_CL	85
Isla Livingston	Península Byers	Limnopolar Lake	LIV_LL	75
	Península Hurd	BAE Juan Carlos I	LIV_JC	11
		Nuevo incinerador	LIV_NI	19
		Incinerador	LIV_IN	34
		Collado Ramos	LIV_CR	117
		Morrena	LIV_MO	145
		Monte Reina Sofía	LIV_SO	274

2.3 Toma y procesado de datos.

Las estaciones cuentan con un registrador de la temperatura del aire, recubierto por un protector para la radiación solar o el hielo (de Pablo, 2021). Estos dispositivos registran la temperatura para cada hora (en °C), con una resolución de 0,01 °C y una precisión de 0,04 °C, con un dispositivo TinyTag Plus2 de Gemini (de Pablo, 2021). Los datos, en formato ASCII (en ficheros de datos separados por comas -csv), son procesados para eliminar datos erróneos y espurios, antes de ser agrupados en una serie temporal (de Pablo, 2021). Son precisamente los datos depurados (de Pablo, 2022) del periodo 2006-2021, facilitados por el equipo PERMATHERMAL, los que se van a usar en este estudio, y de los que hay una serie prácticamente completa, aunque con algunos huecos debidos a errores en los dispositivos (*Tabla 2*).

Tabla 2. Evolución de la disponibilidad de datos de temperatura del aire (en verde) en cada una de las estaciones de medida para el periodo 2006-2021.

	2006				2007				2008				2009											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
DEC_CL																								
LIV_LL																								
LIV_JC																								
LIV_NI																								
LIV_IN																								
LIV_CR																								
LIV_MO																								
LIV_SO																								
	2010				2011				2012				2013											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
DEC_CL																								
LIV_LL																								
LIV_JC																								
LIV_NI																								
LIV_IN																								
LIV_CR																								
LIV_MO																								
LIV_SO																								
	2014				2015				2016				2017											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
DEC_CL																								
LIV_LL																								
LIV_JC																								
LIV_NI																								
LIV_IN																								
LIV_CR																								
LIV_MO																								
LIV_SO																								
	2018				2019				2020				2021											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
DEC_CL																								
LIV_LL																								
LIV_JC																								
LIV_NI																								
LIV_IN																								
LIV_CR																								
LIV_MO																								
LIV_SO																								

2.4 Metodología.

2.4.1. Análisis de las temperaturas.

Para el estudio de la variabilidad interanual, se han calculado las temperaturas medias, mínimas y máximas tanto diarias, mensuales como anuales. Con estas últimas se ha calculado la tendencia lineal que siguen, con el objetivo de estudiar si las temperaturas han aumentado o disminuido en este periodo de tiempo. Además, se han calculado los índices de congelación (*freezing-degree days*, FDD, en °C·día) y descongelación (*thawing-degree days*, TDD, en °C·día), que representan el sumatorio de temperaturas (T) menores y mayores (respectivamente) a 0°C (T_F) (Klene et al., 2001) durante un año (dt), de acuerdo con la siguiente expresión (*Ecuación 1*):

$$FDD/TDD = \int_{FDD/TDD} (T - T_F) dt \quad (1)$$

Estos cálculos se han realizado con el lenguaje de programación R en su versión 4.1.2 (R Core Team, 2014) y el entorno gráfico RStudio en su versión 2021.09.1+372 (RStudio Team, 2020). Para ello se ha modificado un algoritmo (*Anexo I*) para el tratamiento de datos de estaciones de monitorización térmica del permafrost (de Pablo, 2022). Este algoritmo realiza la lectura de los datos de temperatura y calcula las estadísticas diarias, mensuales y anuales, así como el cálculo de los índices de congelación y descongelación. Además, realiza el análisis temporal de los datos con el fin de obtener las rectas de tendencia.

2.4.2. Evolución futura.

Partiendo de la temperatura media anual del año 2021 en cada una de las estaciones, se han calculado las temperaturas futuras en los años 2030, 2050, 2075 y 2100, así como el primer año en el que las temperaturas medias superan el umbral de los 0°C. Este cálculo se ha realizado de dos formas distintas utilizando para ello la hoja de cálculo Excel de Microsoft Office 2016. Por un lado, se ha realizado un análisis de las tendencias lineales observadas en los datos, de las que se ha obtenido la ecuación de la recta. Usando la pendiente de dichas rectas, se han obtenido las temperaturas para los años comentados.

Por otro lado, se han utilizado los valores de referencia de los informes sobre el cambio climático del organismo IPCC, junto con sus escenarios de emisiones (IPCC, 2013). Así, se han utilizado los aumentos previstos para 2100

desde el año 2005 (Tabla 3), calculando la tasa de variación por año y multiplicándolo por los años pasados entre 2021 y los años a futuro 2030, 2050, 2075 y 2100.

Tabla 3. Rangos de incremento de temperatura para el año 2100 (IPCC, 2014).

Escenario IPCC	Rango incrementos	°C/año
RCP 2,6	0,3°C a 1,7°C	0,0032 a 0,0179
RCP 4,5	1,1°C a 2,6°C	0,0116 a 0,0274
RCP 6,0	1,4°C a 3,1°C	0,0147 a 0,0326
RCP 8,5	2,6°C a 4,8°C	0,0274 a 0,0505

3. EVOLUCIÓN INTERANUAL

3.1 Evolución de las temperaturas

Las temperaturas medias anuales obtenidas oscilan entre los -5,96 °C (LIV_SO en 2007) y los 0,80 °C (DEC_CL en 2021), lo cual describe un gran aumento de la temperatura para un clima frío. Comparando las diferentes medias anuales de cada estación (Figura 3, Anexo II), se puede observar que DEC_CL es la estación que más asciende desde que empieza la serie, ya que pasa de los -4,61 °C a superar los 0 °C. En el resto de las estaciones no se llegan a superar los 0 °C en el año 2021, aunque sí que hay algunas que registran temperaturas medias positivas en algún año como LIV_NI con 0,22 °C (2008), LIV_IN con 0,02 °C (2008) y LIV_CR con 0,15 °C (2019).

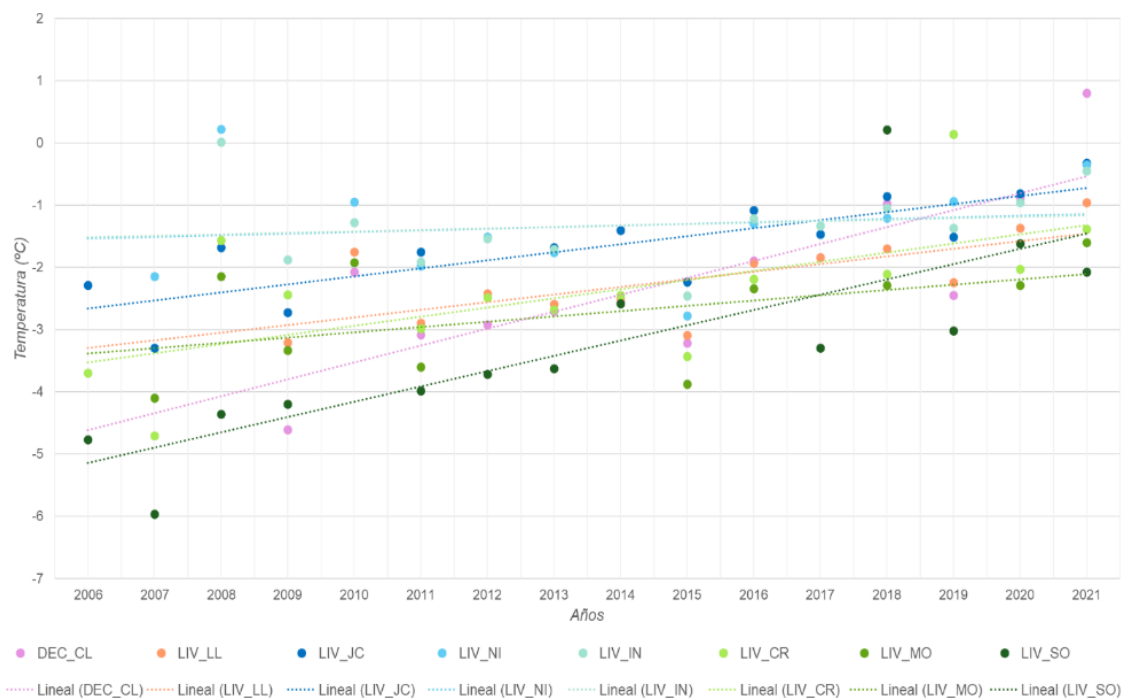


Figura 3. Temperaturas medias anuales y tendencias de cada estación.

Atendiendo a las temperaturas máximas absolutas de cada estación (*Figura 4, Anexo II*), la que destaca por tener el registro más alto es LIV_JC, con 17,34 °C (2009), en el resto de estaciones las cifras varían entre 10 y 15 °C, las cuales se alcanzan en los años 2020 (DEC_CL, LIV_IN y LIV_MO), 2019 (LIV_CR), 2016 (LIV_LL), 2014 (LIV_SO) y 2008 (LIV_NI).



Figura 4. Evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas anuales por estación.

En el caso de las temperaturas mínimas absolutas (*Figura 4, Anexo II*), no hay ninguna estación que tenga una temperatura claramente más baja o alta que las demás, todas varían en un rango entre los -20,02 °C (LIV_IN en 2013) y -26,21 °C (LIV_SO en 2007). El año 2007 fue especialmente frío, y en cinco de las ocho estaciones se registraron las temperaturas mínimas absolutas

registradas en todo el periodo de estudio. Por otro lado, los años 2008 y 2010 destacan por ser anormalmente cálidos en varias estaciones, siendo mucho más calurosos que los años que le preceden o siguen, aunque los años más cálidos de todo el periodo son 2019, 2020 y 2021.

Por otro lado, la diferencia térmica anual entre las diferentes estaciones (*Figura 5*) varía una media de 2,32 °C. Esta variabilidad es muy amplia al principio (con valores entre los 3 y 4 °C), se estabiliza en los años intermedios (de 2011 a 2018 la variación es en torno a 1 °C) y en los últimos años se vuelve a aumentar (con valores de entre 2 y 3 °C).

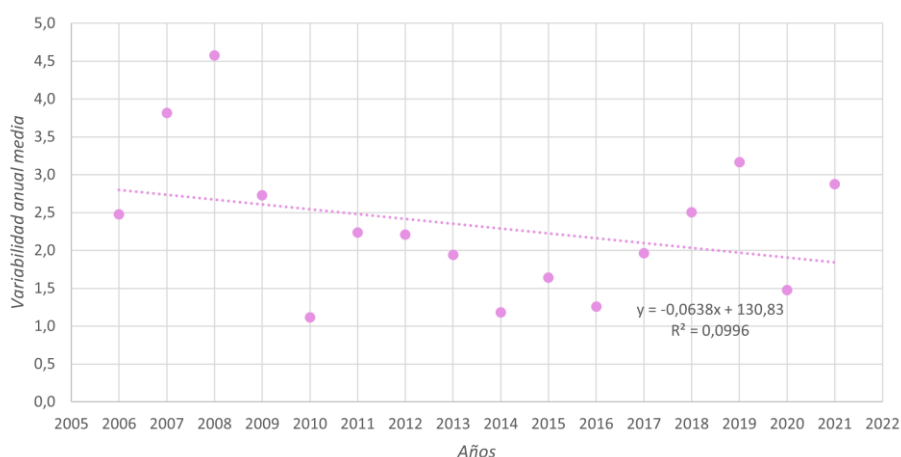


Figura 5. Comparación de la variabilidad térmica anual media de las estaciones.

Si se analizan las temperaturas medias de manera mensual (*Anexo III*), se puede observar que en todas las estaciones el mes más cálido es febrero, con registros entre 0,80 °C y 2 °C, excepto en LIV_SO que es enero (0,36 °C). Además, los meses que superan el umbral de los 0 °C son siempre los de verano (DEF), aunque, en estaciones como LIV_JC, LIV_NI, LIV_IN y LIV_CR, también se superan en el mes de marzo. Sin embargo, en LIV_SO, solo hay temperaturas positivas en enero. Los veranos e inviernos más cálidos se dan en los años 2008, 2020 y 2021 en la mayoría de las estaciones, con temperaturas medias entre los 1,50 °C y 4 °C y -1 °C y -4 °C, respectivamente.

El mes más frío suele ser agosto, con registros entre -4 °C y -7 °C, excepto en LIV_NI, que fue julio con casi -5 °C. En los años 2007 y 2014 se han dado los veranos más gélidos en cinco de las estaciones, con temperaturas entre 1 °C y -1 °C, mientras que los inviernos más fríos se dieron en los años 2007 y 2015, llegando a alcanzar temperaturas de entre -7 °C y -10 °C. La estación DEC_CL

es una excepción en ambos casos, ya que las épocas estival e invernal más frías se dieron en el año 2009, con registros de $-0,76\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-9,13\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Comparando las tendencias obtenidas (*Tabla 4*), se puede observar que en todas las estaciones las temperaturas tienden a ascender de manera lineal, pero no de la misma manera. La máxima obtenida es en DEC_CL, con un aumento de $0,27\text{ }^{\circ}\text{C/año}$, mientras que las estaciones LIV_NI ($0,03\text{ }^{\circ}\text{C/año}$) y LIV_IN ($0,02\text{ }^{\circ}\text{C/año}$) se mantienen más estables y con temperaturas más similares que el resto. El resto de las estaciones se mueven entre esos valores, aunque cabe destacar la estación LIV_SO, que es la más fría de las ocho estudiadas, aunque su tendencia de ascenso es elevada ($0,21\text{ }^{\circ}\text{C/año}$).

Tabla 4. Tendencias de aumento de las temperaturas de las estaciones.

	DEC_CL	LIV_LL	LIV_JC	LIV_NI	LIV_IN	LIV_CR	LIV_MO	LIV_SO
$^{\circ}\text{C/año}$	0,27	0,12	0,13	0,03	0,02	0,15	0,08	0,21
R^2	0,63	0,50	0,66	0,02	0,03	0,40	0,22	0,80

3.2 Evolución de los índices.

En cuanto a los índices, los valores TDD máximos en cada estación oscilan entre $252,08\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$ en LIV_SO (2020) y $702,06\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$ en DEC_CL (2021), siendo este último el mayor de todos los registrados. Por su lado, los FDD anuales máximos han variado entre $-1.054,61\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$ en LIV_NI (2015) y $-2.179,99\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$ en LIV_SO (2007), convirtiéndose este en el índice más bajo de todos.

Estudiando la evolución mensual de cada estación (*Figura 6, Anexo IV*), se puede ver como los picos de FDD, correspondientes a las épocas de invierno, son cada vez más cortos, especialmente desde el año 2018, mientras que los picos de TDD equivalentes a los veranos, son más altos. A su vez, si se observan los datos anuales, se puede ver una tendencia ascendente que sugiere un calentamiento generalizado, especialmente desde 2018 (*Figura 6, Anexo IV*).

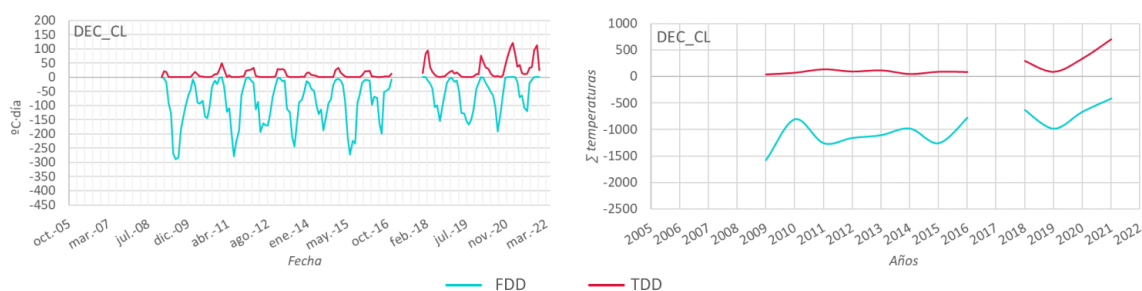


Figura 6. Evolución de los índices mensuales (izquierda) y anuales (derecha) de la estación DEC_CL.

Analizándolos mensualmente, el mes en el que se alcanzan más veces el TDD mayor es febrero, siendo así, el más cálido según este índice, a excepción de las estaciones LIV_IN y LIV_SO, que ambas alcanzan su mes más caluroso en enero. En el caso del FDD, en todas las estaciones el mes más frío siempre es julio, y solo en LIV_NI el mes más frío ocurre en un año distinto al FDD máximo anual (*Anexo IV*).

4. EVOLUCIÓN FUTURA

4.1 Evolución de las tendencias observadas

las estaciones que permanecerían con temperaturas más frías son LIV_IN y LIV_NI, mientras que las estaciones en donde aumentarían más las temperaturas son DEC_CL y LIV_SO. La máxima temperatura que se espera alcanzar en ese año es 20,98 °C en la estación DEC_CL (*Tabla 5*), mientras que la mínima, se quedará muy cerca de 0 °C, concretamente 0,75 °C, en la estación LIV_IN. La diferencia media de temperatura entre 2021 y 2100 en todas las estaciones es de 9,46 °C, con un ascenso medio de 0,13 °C/año.

Tabla 5. Temperaturas esperadas siguiendo las tendencias de aumento descritas por los datos.

Año	2021	2030	2050	2075	2100	DIF.	°C/año	Primer año con T = 0°C
DEC_CL	0,80	1,91	7,36	14,17	20,98	20,18	0,27	2021
LIV_LL	-0,95	-0,26	2,18	5,23	8,29	9,24	0,12	2032
LIV_JC	-0,32	0,45	3,03	6,26	9,48	9,80	0,13	2026
LIV_NI	-0,35	-0,84	-0,31	0,35	1,02	1,37	0,03	2061
LIV_IN	-0,45	-0,90	-0,43	0,16	0,75	1,20	0,02	2068
LIV_CR	-1,39	0,10	3,04	6,71	10,39	11,78	0,15	2029
LIV_MO	-1,60	-1,35	0,20	2,14	4,08	5,68	0,08	2047
LIV_SO	-2,07	-0,06	4,06	9,20	14,34	16,41	0,21	2030
MEDIA						9,46	0,13	

Debido a que las temperaturas siguen tendencias de ascenso diferentes, en cada estación se superan los 0 °C en un año diferente. Cabe destacar que en la estación DEC_CL, se parte ya con temperaturas por encima de ese valor, y que, además, es la estación con una tasa de aumento mayor (0,27 °C/año). Sin embargo, la estación en la que más se tarda en superar esa marca es LIV_IN (2068) al ser la estación con menor tasa de ascenso (0,02 °C/año). Siguiendo estos parámetros, se obtiene una temperatura máxima en 2100 de 20,98 °C, y una mínima de 0,75 °C, correspondientemente con cada una de las estaciones

anteriormente comentadas. Además, en todas las estaciones se superarían los 0 °C de media antes de ese año (Figura 7).

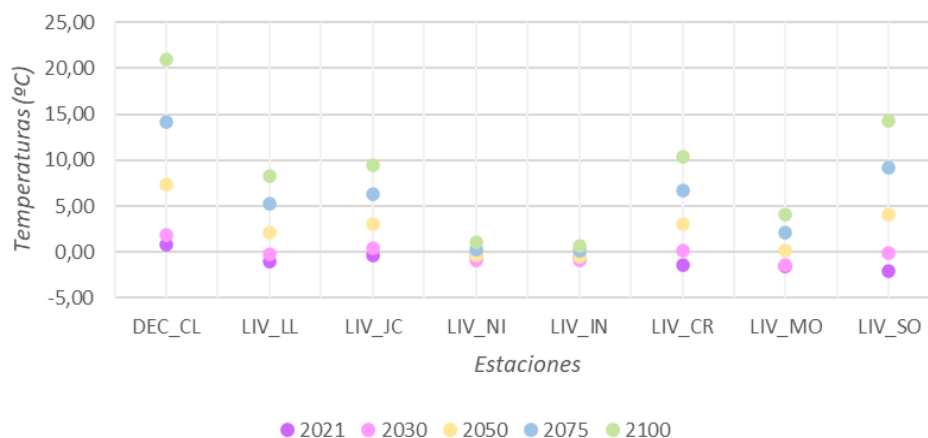


Figura 7. Temperaturas esperadas siguiendo las tendencias de ascenso descritas por los datos.

4.2 Evolución de las tendencias según el IPCC.

El análisis de las temperaturas alcanzadas siguiendo las tendencias descritas por el IPCC (Tabla 3), muestra un aumento de estas, llegando a registrarse datos positivos en la mayoría de los escenarios para el año 2100 (Tabla 6).

Tabla 6. Temperaturas (en °C) esperadas siguiendo las tendencias de aumento del IPCC, clasificadas por escenario y año.

	Tª Media 2021	RCP 2,6				RCP 4,5				RCP 6,0				RCP 8,5				Previsión
		2030	2050	2075	2100	2030	2050	2075	2100	2030	2050	2075	2100	2030	2050	2075	2100	
DEC_CL	0,8	0,83	0,89	0,97	1,05	0,90	1,14	1,43	1,71	0,93	1,23	1,60	1,96	1,05	1,59	2,28	2,96	Min
		0,96	1,32	1,77	2,21	1,05	1,59	2,28	2,96	1,09	1,75	2,56	3,38	1,25	2,27	3,53	4,79	Máx
LIV_LL	-0,95	-0,92	-0,86	-0,78	-0,70	-0,85	-0,61	-0,32	-0,04	-0,82	-0,52	-0,15	0,21	-0,70	-0,16	0,53	1,21	Min
		-0,79	-0,43	0,02	0,46	-0,70	-0,16	0,53	1,21	-0,66	0,00	0,81	1,63	-0,50	0,52	1,78	3,04	Máx
LIV_JC	-0,32	-0,29	-0,23	-0,15	-0,07	-0,22	0,02	0,31	0,59	-0,19	0,11	0,48	0,84	-0,07	0,47	1,16	1,84	Min
		-0,16	0,20	0,65	1,09	-0,07	0,47	1,16	1,84	-0,03	0,63	1,44	2,26	0,13	1,15	2,41	3,67	Máx
LIV_NI	-0,35	-0,32	-0,26	-0,18	-0,10	-0,25	-0,01	0,28	0,56	-0,22	0,08	0,45	0,81	-0,10	0,44	1,13	1,81	Min
		-0,19	0,17	0,62	1,06	-0,10	0,44	1,13	1,81	-0,06	0,60	1,41	2,23	0,10	1,12	2,38	3,64	Máx
LIV_IN	-0,45	-0,42	-0,36	-0,28	-0,20	-0,35	-0,11	0,18	0,46	-0,32	-0,02	0,35	0,71	-0,20	0,34	1,03	1,71	Min
		-0,29	0,07	0,52	0,96	-0,20	0,34	1,03	1,71	-0,16	0,50	1,31	2,13	0,00	1,02	2,28	3,54	Máx
LIV_CR	-1,39	-1,36	-1,30	-1,22	-1,14	-1,29	-1,05	-0,76	-0,48	-1,26	-0,96	-0,59	-0,23	-1,14	-0,60	0,09	0,77	Min
		-1,23	-0,87	-0,42	0,02	-1,14	-0,60	0,09	0,77	-1,10	-0,44	0,37	1,19	-0,94	0,08	1,34	2,60	Máx
LIV_MO	-1,6	-1,57	-1,51	-1,43	-1,35	-1,50	-1,26	-0,97	-0,69	-1,47	-1,17	-0,80	-0,44	-1,35	-0,81	-0,12	0,56	Min
		-1,44	-1,08	-0,63	-0,19	-1,35	-0,81	-0,12	0,56	-1,31	-0,65	0,16	0,98	-1,15	-0,13	1,13	2,39	Máx
LIV_SO	-2,07	-2,04	-1,98	-1,90	-1,82	-1,97	-1,73	-1,44	-1,16	-1,94	-1,64	-1,27	-0,91	-1,82	-1,28	-0,59	0,09	Min
		-1,91	-1,55	-1,10	-0,66	-1,82	-1,28	-0,59	0,09	-1,78	-1,12	-0,31	0,51	-1,62	-0,60	0,66	1,92	Máx

Destaca que la estación DEC_CL es la única con temperaturas medias por encima de 0 °C en todos los escenarios planteados por el IPCC y a lo largo de todos los años, ya que se parte con una media por encima de ese umbral. La estación LIV_SO, por el contrario, es la que más tarda en calentarse, ya que solo podría superar los 0°C en el año 2100 de todos los escenarios menos el RCP 2,6, y en su previsión máxima del RCP 8,5 en el 2075.

Las tres estaciones donde las temperaturas ascenderían más rápidamente son LIV_JC, LIV_NI y LIV_IN (Figura 8). En el RCP 2,6 superan los 0 °C en sus previsiones máximas en todos los años menos en 2030. Además, en el RCP 8,5 hay temperaturas positivas en todos los años menos en la previsión mínima del 2030.

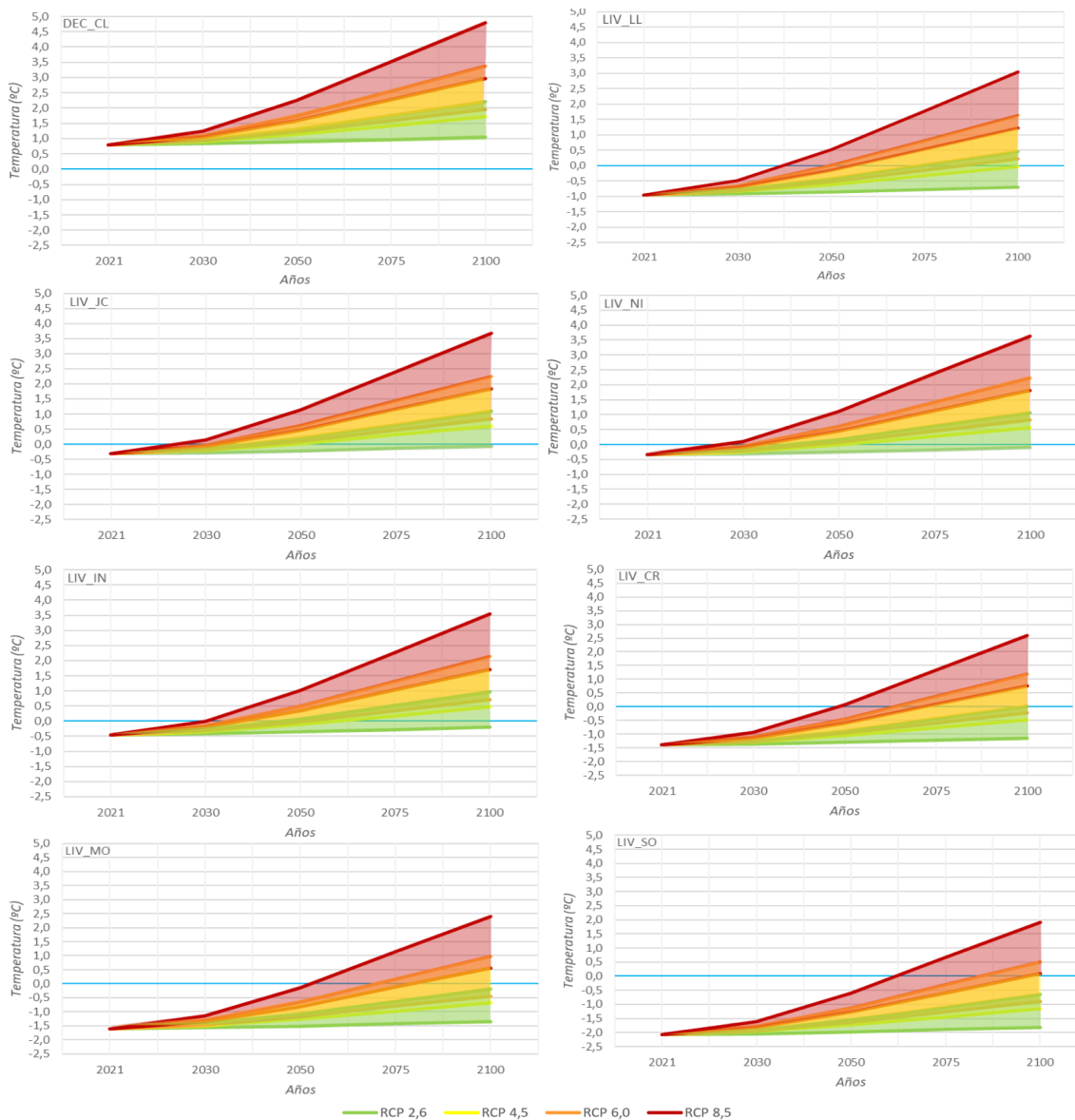


Figura 8. Abanico de temperaturas esperadas para cada estación según el IPCC.

En LIV_LL y LIV_CR las temperaturas se mantienen por debajo de los 0 °C en los años 2030 y 2050 de los tres primeros escenarios, y en el RCP 8,5 sólo superan ese umbral en la previsión alta de 2050. Cabe destacar, que los 0 °C en la estación LIV_LL se alcanzan justamente en 2050 en el RCP 4,5.

Las dos estaciones más frías son LIV_MO y LIV_SO, que solo alcanzan temperaturas positivas en el año 2100 (previsiones máximas) de todos los escenarios menos en 2,6. En el año 2075 LIV_MO solo las obtienen en los RCP 6,0 y 8,5 (también en las máximas) y LIV_SO solo en el RCP8,5.

Para el año 2100 se esperan temperaturas medias (conjuntamente en todas las estaciones) entre -0,54 y 0,62 °C en el RCP 2,6; 0,12 y 1,37 °C en el RCP 4,5; 0,37 y 1,79 °C en el RCP 6,0; y finalmente, 1,37 y 3,20 °C en el RCP 8,5.

5. DISCUSIÓN.

5.1 Análisis de la evolución de las temperaturas.

En la isla Decepción, la única estación estudiada es DEC_CL, ubicada en una ladera de solana, y de cara al interior de la bahía. Tal y como se muestra en los resultados obtenidos, sus temperaturas son más suaves que las del resto de las estaciones antárticas estudiadas debido, probablemente, a su emplazamiento, ya que se ubica en una ladera norte protegida de los vientos fríos provenientes del sur (Zhang, 2005; Goyanes et al., 2014; Goyanes, 2015; de Pablo et al., 2017).

Otro factor que puede estar influyendo en que las temperaturas de esta estación sean ligeramente superiores a las demás consideradas en este estudio, es que se sitúa dentro de una caldera volcánica (Berrocoso et al., 2018). Se ha comprobado que aumentos en la actividad volcánica conllevan temperaturas anormalmente altas, especialmente en el noroeste de esta bahía, ya que hay un intercambio térmico por conducción entre el aire y el mar (Berrocoso et al., 2018). Además, según Goyanes y colaboradores (2014), la capa de permafrost encontrada en esa zona es muy baja, debido al elevado flujo geotérmico

presente. En ese estudio se destaca que hay una gran relación entre la reducción del espesor de permafrost y el aumento de las temperaturas.

El resto de las estaciones se sitúan en la isla Livingston, pero en dos zonas diferenciadas, por lo que su análisis va a diferir dependiendo de su localización. El hecho de tener varias estaciones dentro de la misma isla va a permitir estudiar más en profundidad cómo varían sus temperaturas, tanto altitudinal como espacialmente.

Por un lado, en la península de Byers, está la estación LIV_LL, que tiene datos similares, pero no iguales a DEC_CL. Se encuentran a una altitud parecida, pero LIV_LL está muy afectada por los vientos ya que no existen relieves importantes que los desvíen (Toro et al., 2007), lo que hace que sus temperaturas sean algo más frías que en DEC_CL, que sí se encuentra protegida de los mismos, generando esa diferencia en los registros obtenidos.

Por otro lado, en la península de Hurd, se encuentran el resto de las estaciones siguiendo un gradiente altitudinal con respecto a las medidas de sus temperaturas medias anuales, que parece influir de forma importante en los resultados obtenidos. Cabe destacar que los vientos no van a ser un factor influyente en la temperatura de esta zona, ya que, gracias a su orografía, se encuentra protegida de los vientos del noroeste y del suroeste (del Pilar, 2019). En las estaciones situadas a menor altitud (LIV_JC, LIV_NI y LIV_IN) las temperaturas son similares, aunque LIV_JC, situada junto al mar, es ligeramente más fría que las otras dos, posiblemente por estar menos protegida por su mayor exposición a la humedad ambiental de la costa. El resto de las estaciones cumplen con esa tendencia de descenso de la temperatura con la altitud (*Figura 9*). Las estaciones más alejadas, como LIV_LL en la península Byers, o DEC_CL en la isla vecina de Decepción, también se ajustan a este gradiente altitudinal.

Esta tendencia no es tan evidente y clara cuando se comparan las temperaturas medias anuales en cada estación frente a la altitud, lo que implica que otros parámetros podrían estar influyendo de manera distinta cada año en cada una de ellas, como podría ser el régimen de vientos y el grado de protección orográfica frente a ellos (*Anexo V*). De hecho, ya mencionaban Turner y

colaboradores (2005) en su estudio que ciertos cambios en la temperatura podrían deberse a cambios de la instrumentalización o a su propia localización.

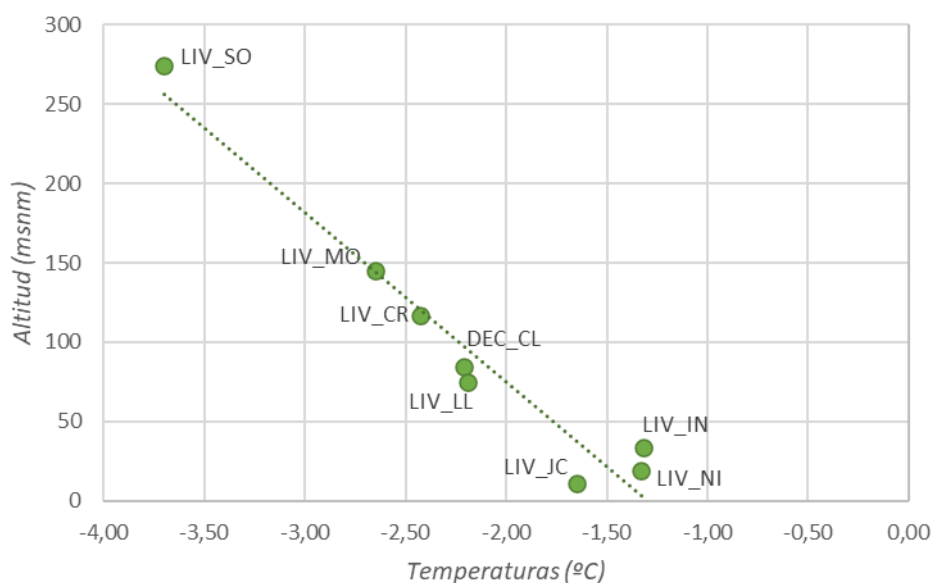


Figura 9. Media de las temperaturas medias frente a la altura.

En cuanto a las temperaturas medias anuales, no muestran fluctuaciones claras en el periodo del 2006 al 2021. Sin embargo, sí que se observan variaciones interanuales. Así los años 2008 y 2010 fueron especialmente cálidos en la mayoría de las estaciones, debido posiblemente a una ola de calor, dado que Díaz (2010) habla de un aumento globalizado de la temperatura en ese último año, que repercutió en cambios a escala mundial y regional, pudiendo afectar concretamente al área de estudio.

En otros trabajos, se ha estudiado que El Niño-Oscilación del Sur, junto con las ondas Rossby, pueden generar alteraciones climáticas, ya que estas ondas proceden del Pacífico tropical (Turner, 2004), aunque no estaba clara la influencia “de las fuerzas tropicales”, ya que los eventos de El Niño suelen generar condiciones de enfriamiento (Turner, 2004). Posteriormente, Oliva y colaboradores (2017) sí establecieron una relación directa entre las épocas de enfriamiento y los fenómenos de El Niño. Se determinó que, tras ellos, las temperaturas de toda la península Antártica disminuían durante unos años, pero luego volvían a ascender, describiendo una tendencia de calentamiento a largo plazo, a pesar de esos ciclos cortos de enfriamiento (Oliva et al., 2017) (Figura 1). En los resultados obtenidos en este trabajo se pueden observar este tipo de

oscilaciones, al haber años en los que desciende la temperatura y otros en los que aumenta, pero manteniendo siempre una tendencia de ascenso de las temperaturas.

Otra posible causa de la tendencia al calentamiento observada podría ser la disminución progresiva del ozono estratosférico, especialmente en verano (Marshall et al., 2006), tal y como discuten Turner y colaboradores (2016). En invierno las conexiones entre los trópicos y las altas latitudes del sur son más fuertes y pueden producir anomalías en las temperaturas marinas (Li et al., 2014; Trenberth et al., 2014). Esto a su vez puede alterar la superficie de hielo congelado, afectando directamente a las temperaturas de la superficie del continente (Oliva et al., 2017). El estudio de la relación entre las temperaturas y tendencias observadas frente a la cantidad de ozono estratosférico requeriría un estudio más pormenorizado.

Sin embargo, en las temperaturas máximas y mínimas anuales, sí se observan ciertas fluctuaciones. Las máximas, adquieren una mayor amplitud de onda en los últimos años del estudio, mientras que, al principio las oscilaciones son más suaves. En el caso de las mínimas ocurre justo, al contrario, al principio del periodo mostraban cierta sinuosidad, pero a partir del 2018 se vuelven más estables hasta casi estabilizarse (*Figura 4*).

5.2 Análisis de la evolución de los índices.

La duración de los índices obtenidos coincide con la relatada en Goyanes y colaboradores (2014), ya que los FDD se extienden de otoño a primavera (marzo-noviembre), mientras que los TDD sólo ocupan el verano (diciembre-enero), como cabe esperar, en respuesta a los periodos de congelación y descongelación.

Es necesario analizar los índices de manera separada, ya que cada uno actúa de manera diferente. Por una parte, los FDD describen un patrón similar en todas las estaciones manteniéndose un índice de congelación parecido, en el que cada vez el índice es más cercano a cero (*Anexo IV*). Se observa que, según avanzan los años, cada vez se registran índices más altos. Esto quiere decir que, cada vez las épocas invernales son menos frías, concordando con el ascenso

general de las temperaturas. Sin embargo, no se detecta una reducción en la duración de los inviernos, (*Anexo IV*).

Por otra parte, en los TDD no se distingue un comportamiento similar al FDD. Se puede decir que no se detecta un aumento del valor del índice tan pronunciado como con los FDD, a excepción de DEC_CL y LIV_SO, pero sí se denota un aumento de la duración de los periodos estivales para todas las estaciones. Esto significa que el índice está aumentando, porque hay más meses con temperaturas positivas, aunque el valor más alto del mes más cálido siga siendo el mismo o similar. Además, en este índice sí se producen diferencias entre las distintas estaciones, ya que mientras que en las más cercanas al nivel del mar (LIV_JC, LIV_NI y LIV_IN) los índices se mantienen muy regulares o con unas pequeñas variaciones, en las situadas a mayor altitud (LIV_MO y LIV_SO) sí se detecta un aumento de los TDD. En general, ambos índices se ajustan al gradiente altitudinal (*Figura 10*), exceptuando LIV_JC que se sale del gradiente con respecto a los FDD y TDD, y LIV_LL que tampoco cumple con la tendencia en los TDD.

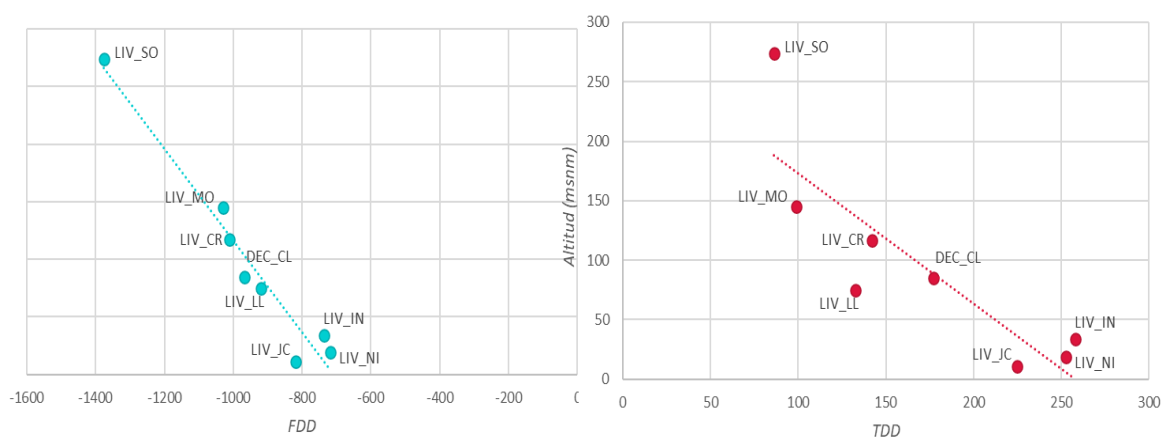


Figura 10. Relación de la altitud con los índices medios de congelación (FDD, izquierda) y descongelación (TDD, derecha), en °C·día.

También habría que resaltar la estación de la isla Decepción que muestra un mayor aumento en este índice pasando de niveles inferiores a 50 °C·día a superar los 100 °C·día mostrando claramente el calentamiento en esta isla. Las temperaturas mensuales de DEC_CL cada vez son más altas que en el resto de las estaciones (*Tabla 7*), llegando incluso a alcanzar en 2021 ocho meses con temperaturas positivas, por lo que los TDD también aumentan (*Anexo IV*).

Tabla 7. Temperaturas medias mensuales (en °C), FDD y TDD de los últimos tres años del estudio en DEC_CL.

		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T media	2019	0,65	-0,07	0,16	-1,27	-3,97	-4,29	-5,00	-5,37	-5,01	-3,61	-1,05	-0,34
	2020	2,48	1,80	0,49	-0,20	-1,32	-2,07	-3,39	-5,99	-4,15	-1,75	1,36	2,34
	2021	3,36	4,31	2,67	0,69	-0,90	-1,68	-3,10	-3,44	0,44	0,83	3,15	3,62
FDD	2019	-3,63	-15,19	-12,66	-48,46	-126,52	-128,60	-154,99	-166,37	-150,20	-114,83	-41,22	-20,30
	2020	0	-1,84	-19,96	-35,82	-52,80	-65,65	-106,77	-191,28	-126,13	-60,22	-1,01	0
	2021	0	0	-0,36	-16,71	-71,78	-64,89	-107,04	-119,17	-19,85	-9,34	0	0
TDD	2019	23,72	13,22	17,72	10,35	3,38	0	0	0	0	2,81	9,78	9,78
	2020	76,79	54,14	35,02	29,69	12,02	3,58	1,66	5,48	1,49	5,89	41,67	72,67
	2021	104,2	120,62	83,22	37,41	43,83	14,55	10,92	12,63	33,00	35,17	94,36	112,2

Esto puede deberse al aumento de la actividad volcánica hidrotermal en DEC_CL. Berrocoso y colaboradores (2018) describieron un fenómeno similar ocurrido en 2012, en el que, temperaturas marinas y terrestres anómalamente altas se relacionaban con ascensos de la actividad volcánica. Además, también apuntaron que esta correlación entre ambos factores puede apreciarse mejor gracias a la forma de herradura de la isla (Berrocoso et al., 2018).

Estos índices ayudan a comprender mejor la variabilidad térmica de las islas, y es otra manera de determinar los periodos más cálidos y fríos (de Pablo et al., 2014). Si comparamos los años más cálidos según las temperaturas medias anuales y los TDD, se puede apreciar cómo en la mayoría de las estaciones, ambos años coinciden, excepto en LIV_LL, LIV_JC y LIV_MO. En estos casos el TDD máximo es en 2020, mientras que la temperatura media anual mayor se da en 2021. Esto puede deberse a que en 2021 las temperaturas alcanzasen registros mayores (fue un año con temperaturas más extremas), mientras que en 2020 hubo más días calurosos, pero no necesariamente temperaturas muy cálidas. Igualmente, si se equipara con el FDD, sólo hay una de ellas (LIV_LL) en la que el año no coincide, siendo el índice máximo en 2015 y la temperatura media más baja en 2009.

Una vez analizados todos los datos se observa que las evoluciones de las temperaturas de todas las estaciones siguen siempre una tendencia ascendente, es decir, todas las estaciones se van calentando, más o menos rápidamente, pero se puede observar un calentamiento generalizado en ambas islas, lo que concuerda con lo descrito por Turner y colaboradores (2005) en sus estudios.

Bien es cierto que se ha podido observar que los años anteriores a 2015 (excepto 2008 y 2010) fueron algo más fríos que el resto, lo que podría suponer el final de la tendencia de enfriamiento que argumentaban Oliva y colaboradores (2017), pero se ha podido observar que era solo un ciclo, ya que después las temperaturas han vuelto a aumentar.

5.3 Análisis de las evoluciones futuras.

La tendencia más rápida de aumento se encuentra en DEC_CL, con 0,27 °C/año, lo que supondría alcanzar una temperatura de 20,18 °C en 2100. A pesar de que es una de las estaciones más cálidas, no sólo por ser la única que empieza la proyección a futuro con datos positivos, sino por su localización encima de la caldera volcánica y protegida de los vientos fríos. Sin embargo, hay que ser cautelosos con la interpretación de estos resultados, ya que una posible explicación a que el incremento por año sea tan elevado es que es una estación cuyos datos parten de 2009, en vez de 2006 como las demás. Esa falta de los primeros años (supuestamente más fríos que el resto por la tendencia ascendente de las temperaturas) podría alterar la línea de tendencia de los datos, ya que esta debería ajustarse a datos inferiores anteriores al primer registro, y así, obtener un incremento menor. Esto mismo ocurre con la estación LIV_LL, en la que no se obtiene un incremento tan alto como en la estación anterior, pero también faltan los tres primeros años del estudio.

Cabe destacar, que en la estación LIV_MO faltan siete años enteros, siendo así la estación más incompleta, lo que puede generar problemas al calcular una línea de tendencia fiable para el análisis a futuro. La relativa falta de datos, como se puede ver, es un problema generalizado a la hora de calcular las tendencias naturales descritas por los datos, por lo que los incrementos calculados deben considerarse con cautela.

En este caso, no se puede apreciar una clara relación entre el aumento de temperatura con respecto a la altitud a la que se localizan las estaciones (*Figura 11*), ya que LIV_SO tiene el segundo registro más alto y es la que se encuentra a mayor altitud. No existen datos para explicar porque esta estación ha tenido una tasa de aumento de las temperaturas tan rápido (0,21 °C/año). Como se ha discutido previamente, debe existir algún otro factor distinto a la

altitud que esté afectando especialmente a esta estación y que ocasiona este incremento interanual de las temperaturas.

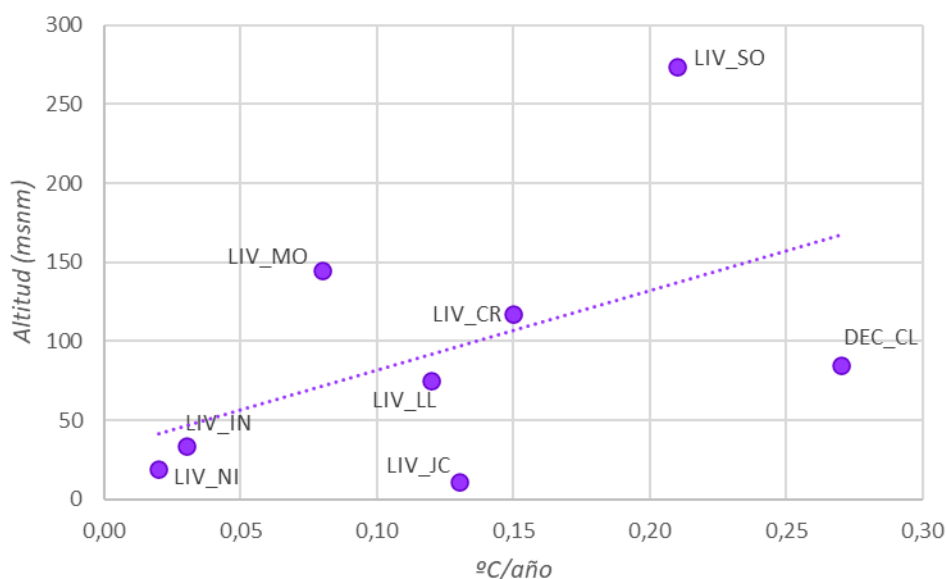


Figura 11. Comparación de la altitud con el aumento de la temperatura en cada estación.

En todo caso, las temperaturas obtenidas para 2100 en todas las estaciones son bastante preocupantes, excepto en LIV_NI y LIV_IN. Las temperaturas superan de forma clara los 0 °C, quedándose la mayoría cerca o por encima de los 10 °C. Para el año 2030 cinco estaciones siguen manteniéndose con temperaturas negativas, pero pasado ese año, las ascienden a niveles alarmantes, pudiendo tener grandes efectos en los ecosistemas locales, la hidrología, el permafrost y los procesos periglaciares.

Por otro lado, atendiendo a las temperaturas obtenidas con los incrementos descritos por el IPCC se obtienen datos más bajos que con las tendencias observadas, aunque son igualmente inquietantes, ya que todas ellas también superan los 0 °C, algunas incluso en el escenario más favorable. En las estaciones situadas a bajas cotas en la isla Livingston (LIV_JC, LIV_NI y LIV_IN) sólo se superan los 0°C en la parte alta del intervalo del rango en el escenario RCP 2,6 desde 2050. A su vez, la estación DEC_CL sigue siendo la más cálida, llegando a alcanzar casi los 5 °C en el RCP 8,5 y en 2100.

Comparando ambos análisis, en los resultados obtenidos con las tendencias observadas, las temperaturas son notablemente más altas que las previstas por el IPCC para esos años en cualquiera de los escenarios. Sólo hay

dos estaciones que no cumplen esa norma, que son LIV_NI y LIV_IN en las que las temperaturas obtenidas para 2030 y 2050 son más frías que las previstas por el IPCC, y las esperadas para los años 2075 y 2100 encajarían dentro del rango de datos esperado en el RCP 2,6 para esos mismos años. En LIV_MO, para el año 2030 obtiene una temperatura que encajaría dentro del RCP 6,0, pero pasado ese año, todos sus registros son más cálidos que en el escenario menos favorable.

Combinando todos los resultados obtenidos, se obtiene que si continua este nivel de contaminación y emisión de GEI, las temperaturas en la Antártida van a aumentar drásticamente y ser peores que las previstas por el IPCC. Bien es cierto que puede que no alcancen los 15-20 °C obtenidos en este estudio por la tendencia observada de los datos, debido que, la falta de estos puede ocasionar fallos en las predicciones de incremento por año, pero sí que se prevé un ascenso mayor y claramente preocupante para las temperaturas en esta parte del continente. Tal y como dicen Chown y colaboradores (2022), para poder frenar este aumento descontrolado de la temperatura, se necesita reducir las emisiones de GEI de manera inmediata. En su estudio también esclarecen que este aumento conllevará cambios tanto en el mar como en tierra, alterando sobre todo el nivel del mar y afectando a los ecosistemas costeros a nivel global.

6. CONCLUSIONES

Tras este análisis térmico de los registros obtenidos en las islas Livingston y Decepción, se puede concluir que las temperaturas en este sector del continente están en aumento desde 2006 en todas las estaciones. Esto se ve reflejado, por un lado, en las tendencias lineales positivas descritas en las temperaturas medias anuales, variando entre 0,02 y 0,27 °C/año, y por el otro, en el cambio de la duración e intensidad de los inviernos y veranos descritos por los índices de congelación y descongelación, en los que los primeros se van haciendo menos fríos, mientras que los segundos cada vez son más cálidos y largos.

De cara al futuro, las tendencias observadas en las temperaturas medias anuales dan lugar a datos térmicos muy elevadas para las condiciones

antárticas, especialmente en algunas estaciones (DEC_CL y LIV_SO), previendo un calentamiento aún más acusado del que se ha visto reflejado en el periodo 2006-2021. Paralelamente, los escenarios descritos por el IPCC plantean también una situación de calentamiento generalizada, aunque no tan acusada como en las tendencias observadas. En este caso, se encuentran situaciones un poco más cálidas que las actuales (RCP 2,6), pasando a unas intermedias en las que las temperaturas medias anuales superarían los 0 °C en la mayoría de estaciones entre 2050 y 2075 (RCP 4,5 y 6,0), y finalmente un escenario bastante preocupante con temperaturas por encima de 0 °C antes de 2050 (RCP8,5).

Aunando todos los resultados obtenidos en este estudio, se puede concluir que, tal y como describían Turner y Colaboradores (2005) en sus estudios, este sector de la península Antártica está sufriendo un calentamiento generalizado, y cuya tendencia señala que va a seguir ascendiendo en los próximos años. Las observaciones de una tendencia al enfriamiento de Oliva y colaboradores (2017) en este sector antártico queda claro que se deben a un episodio de enfriamiento dentro de la tendencia general de calentamiento, al menos en cuanto a las islas Livingston y Decepción se refiere.

Destaca el importante aumento de las temperaturas del aire en la Isla Decepción, claramente superior al de todas las demás estaciones, posiblemente relacionado con el carácter volcánico de la isla, y microclimas locales favorecidos por la orografía que requieren estudios detallados posteriores.

Con este trabajo se constata que el gran problema en este calentamiento es que, si los seres humanos no cambian sus hábitos y actividades contaminantes, las temperaturas seguirán aumentando al ritmo que han descrito hasta ahora (tendencias naturales), las cuales crecen a un ritmo sin precedentes. Por su lado, el IPCC describe una situación algo mejor que la observada en los datos, aunque no deja de ser preocupante, ya que se alcanzarían temperaturas medias que, hoy en día, se registran solamente en época estival, lo que para el continente antártico supone un cambio drástico de sus condiciones climáticas y ambientales, con los consiguientes efectos en los ecosistemas, la hidrología, los océanos, etc.

REFERENCIAS.

- Bañón, M. (2001) *Observaciones meteorológicas en la Base Antártica Española Juan Carlos I*. Publicación A-151, Serie Monografías. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid. 135 págs.
- Bañón, M. y Vasallo, F. (2015). *AEMET en la Antártida: Climatología y meteorología sinóptica en las estaciones meteorológicas españolas en la Antártida*. Agencia Estatal de Meteorología, Madrid. 152 págs.
- Bañón, M., Justel, A., Velázquez, D., y Quesada, A. (2013) *Regional weather survey in Byers Peninsula, Livingston Island, South Shetland islands, Antarctica, Antarct. Sci.*, 25: 146–156.
- Beck, C., Grieser, J., Kottek, M., Rubel, F., y Rudolf, B. (2005). *Characterizing global climate change by means of Köppen climate classification*. En Werscheck, M. and Willing, P. (Editors). *Klimastatusbericht 2005*. 191: 139-149.
- Belda, M., Holtanová, E., Halenka, T., y Kalvová, J. (2014). *Climate classification revisited: From Köppen to Trewartha*. *Climate Research*. 59(1): 1–13.
- Berrocoso, M., Prates, G., Fernández-Ros, A., Peci, L. M., de Gil, A., Rosado, B., Páez, R. y Jigena, B., (2018) *Caldera unrest detected with seawater temperature anomalies at Deception Island, Antarctic Peninsula*. *Bulletin of Volcanology*. 80 (41). 12 págs.
- Bertler, N.A.N., Barrett, P.J., Mayewski, P.A., Fogt, R.L., Kreutz, K.J. y Shulmeister, J. (2004). *El Niño suppresses Antarctic warming*. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L15207.
- Chan, D., & Wu, Q. (2015). *Significant anthropogenic-induced changes of climate classes since 1950*. *Scientific Reports*, 5, 13487.
- Chen, D., & Chen, H. W. (2013). *Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010*. *Environmental Development*, 6: 69–79.
- Chown, S.L., Leihy, R.I., Naish, T.R., Brooks, C.M., Convey, P., Henley, B.J., Mackintosh, A.N., Phillips, L.M., Kennicutt, M.C. II y Grant, S.M. (Eds.)

- (2022) *Antarctic Climate Change and the Environment: A Decadal Synopsis and Recommendations for Action*. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, United Kingdom.
- Cui, D., Liang, S. y Wang, D. (2020) *Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification*. WIREs Clim Change. 12 (701). 28 págs.
- de Pablo, M. A., Ramos, M. y Molina, A. (2014) *Thermal characterization of the active layer at the Limnopolare Lake CALM-S site on Byers Peninsula (Livingston Island), Antarctica*. Solid Earth, 5: 721–739.
- de Pablo, M., Ramos, M., Molina, A., Vieira, G., Hidalgo, M., Prieto, M., Jiménez, J., Fernández, S., Recondo, C., Calleja, J., Peón, J., y Mora, C. (2016) *Frozen ground and snow cover monitoring in the South Shetland Islands, Antarctica: Instrumentation, effects on ground thermal behavior and future research*. Geographical Research Letters, 42 (2): 475-495.
- de Pablo, M.A. (2021) *Maintenance of TSP and CALM stations for permafrost and active layer monitoring on Livingston and Deception Islands, Antarctica. 2020-21 campaign report. (in Spanish)*. ACMA-Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España. 46 págs.
- de Pablo, M.A. (2022). *R scripts for temperature data processing and analysis from permafrost thermal monitoring stations* (En preparación).
- de Pablo, M.A., Molina, A., Recio, C., Ramos, M., Goyanes, G. y Roperó, M.A. (2017). *Análisis del estado de la capa activa en el emplazamiento de la base antártica española Gabriel de Castilla, Isla Decepción, Antártida*. Boletín Geológico y Minero. 128 (1): 69-92.
- del Pilar, C. (2019) *Balance de masa reciente y dinámica de los glaciares de la Península Hurd (Isla Livingston, Antártida) en un contexto de clima cambiante*. Grado de doctor en Geografía. Universidad Complutense de Madrid.
- Díaz, E. (2010) *Identificación de las causas y efectos del retroceso de los glaciares Antárticos*. Revista interamericana de ambiente y turismo. 6, (1): 139-44.

- Doran, P.T., Prisco, J.C., Lyons, W.B., Walsh, J.E., Fountain, A.G., Mcknight, D.M., Moorhead, D.L., Virginia, R.A., Wall, D.H., Clow, G.D., Fritsen, C.H., Mckay, C.P. y Parsons, A.N. (2002). *Antarctic climate cooling and terrestrial ecosystem response*. Nature. 415: 517-520.
- Fraedrich, K., Gerstengarbe, F. W., y Wnerner, P. C. (2001). *Climate shifts during the last century*. Climatic Change, 50: 405–417.
- Goyanes, G. A. (2015). *Control climático e interacciones permafrost volcanismo, Isla Decepción, Antártida*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 318 págs.
- Goyanes, G., Vieira, G., Caselli, A., Mora, C., Ramos, M., de Pablo, M. A., Neves, M., Santos, F., Bernardo, I., Gilichinsky, D., Abramov, A., Batista, V., Melo, R., Nieuwendam, A., Ferreira, A., y Oliva, M. (2014) *Régimen térmico y variabilidad espacial de la capa activa en isla Decepción, Antártida*. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 71 (1): 112 – 124.
- Gumiel, P., González-Casado, J. M., Giner-Robles, J. L., López-Martínez, J. y Durán, J.J., (1999) *Geometría fractal de los sistemas filonianos en la Península Hurd, Isla Livingston, Antártida Occidental*. Geogaceta, 27: 75-78.
- Hansen, J., Sato, M., y Ruedy, R. (2013). *Reply to Rhines and Huybers: Changes in the frequency of extreme summer heat*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110 (7): 47-48.
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 págs.
- IPCC (2014) *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo

principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)). IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

Jigena-Antelo, B., Vidal, J., y Berrocoso, M., (2015) *Determination of the tide constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), using annual time series*. DYNA. 82 (191): 209-218.

Kalvová, J., Halenka, T., Bezpalcová, K., y Nemešová, I. (2003). *Köppen climate types in observed and simulated climates*. Studia Geophysica et Geodaetica, 47 (1): 185–202.

King, J.C. (1994). *Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula*. International Journal of Climatology. 14: 357- 369.

Klene, A., Nelson, F., Shiklomanov, N., y Hinkel, K. (2001). *The N-factor in natural landscapes: variability of air and soil-surface temperatures*. Kuparuk River basin, Alaska, USA. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 33: 140–148.

Leppe, M., Fernandoy, F., Palma-Heldt, S., y Moisan, P. (2003) *Flora mesozoica en los depósitos morrénicos de cabo Shirreff, isla Livingston, Shetland del Sur, península antártica*. 10° congreso geológico chileno 2003. Departamento de ciencias de la tierra. Universidad de Concepción.

Levine, M. D. & Steele, R. V., (2021), *Climate change: What we know and what is to be done*. WIREs Energy Environ. 10 (388). 12 págs.

Li, X. C., Holland, D. M., Gerber, E. P. y Yoo, C. (2014) *Impacts of the north and tropical Atlantic Ocean on the Antarctic Peninsula and sea ice*. Nature 505: 538–542

López Martínez, J., Martínez de Pisón, E., y Arche Miralles, A., (1991) *Pulsaciones glaciares y terrazas marinas escalonadas en los alrededores de la Base Antártica Española. Isla Livingston. Shetland del Sur*. Geogaceta. 9: 44-47.

Marshall, G. J., Orr, A., van Lipzig, N. P. M. y King, J. C. (2006) *The impact of a changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula summer temperatures*. J. Clim. 19: 5388–5404.

- Marshall, G.J., Lagun, V., Lachlan-Cope, T.A. (2002). *Changes in Antarctic Peninsula tropospheric temperatures from 1956–99: a synthesis of observations and reanalysis data*. *International Journal of Climatology*. 22: 291–310.
- Martínez de Pisón, E., López Martínez, J., y Arche Miralles, A., (1991) *Formas y depósitos de la zona de Johnsons Dock. Mapa geomorfológico. Isla Livingston, Antártida*. ERIA: 39-45.
- MIT. (1970). *Man's Impact on the Global Environment: Report of the study of critical environmental problems (SCEP)*. Cambridge, MA/London: The MIT Press.
- MIT. (1971a). *Man's impact on the climate*. Cambridge, MA/London: The MIT Press.
- MIT. (1971b). *Inadvertent climate modification: Report of the study on Man's impact on climate (SMIC)*. Cambridge, MA/London: The MIT Press.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J. F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., van Vuuren, D., Weyant, J., Wilbanks, T., van Ypersele, J. P. y Zurek, M. (2008) *Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts and response strategies*. Informe de la reunión de expertos del IPCC celebrada del 19 al 21 de septiembre de 2007 en Noordwijkerhout (Países Bajos), Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra, Suiza. 132 págs.
- Oliva, M., Navarro, F., Hrbàček, F., Hernández, A., Nývlt, D., Pereira, P., Ruiz-Fernández, J. y Trigo, R. (2017) *Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere*. *Science of the Total Environment* 580: 210–223.
- Ortiz, J.D. & Jackson, R., (2020) *Understanding Eunice Foote's 1856 experiments: heat absorption by atmospheric gases*. *Notes and records*. 76: 67-84.

- R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- Ramos, M., Vieira, G., Blanco, J.J., Gruber, S., Hauck, C., Hidalgo, M.A., y Tome, D., (2008a). *Active layer temperature monitoring in two boreholes in Livingston Island, Maritime Antarctic: first results for 2000–2006*. In: Kane, D.L., Hinkel, K.M. (Eds.), Ninth International Conference on Permafrost - Extended Abstracts, June 29–July 3. University of Alaska, Fair banks, Alaska, USA: 1463–1467.
- Ramos, M., Vieira, G., Gruber, S., Blanco, J.J., Hauck, C., Hidalgo, M.A., Tome, D., Neves, M., y Trindade, A., (2008b). *Permafrost and active layer monitoring in the Maritime Antarctic: Preliminary results from CALM sites on Livingston and Deception Islands*. U.S. Geological Survey and The National Academies; USGS OF-2007–1047. Short Research Paper 070.
- Rohli, R. V., Joyner, T. A., Reynolds, S. J., Shaw, C., y Vázquez, J. R. (2015). *Globally extended Köppen–Geiger climate classification and temporal shifts in terrestrial climatic types*. *Physical Geography*, 36 (2): 142–157.
- RStudio Team (2020) *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>.
- Ruiz-Fernández, J., Oliva, M., y García-Hernández, C. (2016) *Procesos geomorfológicos y formas del relieve en dos cuencas lacustres de la Península Byers (Isla Livingston, Antártida marítima): implicaciones paleoambientales*. *Polígonos. Revista de Geografía*. 28: 211-237.
- Toro, M., Camacho, A., Rochera, C., Rico, E., Bañón, M., Fernández-Valiente, E., Marco, E., Justel, A., Vincent, W. F., Avendaño, M. C., Ariosa, Y., y Quesada, A. (2007) *Limnological characteristics of the freshwater ecosystems of Byers Peninsula, Livingston Island, Antarctica*. *Polar Biol.*, 30: 635–649.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., Branstator, G. y Phillips, A. S. (2014) *Seasonal aspects of the recent pause in surface warming*. *Nature Climate Change* 4: 911–916.

- Turner J. (2004) *The El Niño–southern oscillation and Antarctica*. International Journal of Climatology 24: 1–31.
- Turner, J., Bindshadler, R., Convey, P., di Prisco, G., Fahrbach, E., Gutt, J., Hodgson, D., Mayewski, P., y Summerhayes, C. (2009) *Antarctic Climate Change and the Environment. Versión 1.1*. the Scientific Committee on Antarctic Research Scott Polar Research Institute, Lensfield Road, Cambridge, UK.
- Turner, J., Colwell, S., Marshall, G, Lachlan-Cope, T., Carleton, A., Jones, P., Lagun, V., Reid, P. y Iagovkina, S. (2005) *Antarctic climate change during the last 50 years*. International Journal of Climatology. 25: 279–294.
- Turner, J., Lu, H., White, I., King, J.C., Phillips, T., Hosking, S.J., Bracegirdle, T.J., Marshall, G.J., Mulvaney, R. y Deb, P. (2016). *Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability*. Nature, 535: 411-416.
- Vaughan, D.G., Marshall, G.J., Connolley, W.M., King, J.C., Mulvaney, R. (2001). *Climate change — devil in the detail*. Science. 293: 1777–1779.
- Viñas, J.M. (2019). *Conocer la meteorología. Diccionario ilustrado del tiempo y el clima*. Alianza editorial S. A. Madrid.
- Zhang, T. (2005). *Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview*. Reviews in Geophysics, 43.

ANEXOS

Anexo I. Código de R.

1.1. Descripción del código

Lo primero que se hace en el código es crear una carpeta en el directorio de trabajo, con el mismo nombre del fichero que se la seleccionado para analizar. Tras ello, se establece el formato de “*fecha_hora*” en la primera columna, para que el programa detecte que los tres números corresponden a la fecha (DD/MM/AAAA) cuándo se toman los datos y los dos últimos, a la hora y minutos recogidos. Para comprobar que los datos se leen correctamente, se genera una tabla (*auxiliar* con los datos en bruto, y se reflejan en un primer gráfico. Después, se separa la primera columna en cuatro diferentes para dividir la fecha y la hora (día, mes, año, hora; cada uno en una columna). Una vez conseguido, se calculan las estadísticas diarias, mensuales y anuales. Estas estadísticas consisten en calcular las temperaturas medias, mínimas y máximas y la desviación estándar. El siguiente paso es hacer un análisis temporal, con el que se derivan la tendencia de las medidas realizadas sobre la media mensual y diaria.

A continuación, se calculan los índices de congelación y descongelación, tomado las temperaturas medias diarias. Finalmente, se extrajeron los datos de temperaturas medias, mínimas y máximas, y desviación estándar en diferentes ficheros “.csv” en formato tabla (uno con los datos diarios, otro con los mensuales y un tercero con los anuales). A su vez, se generan imágenes con los gráficos realizados en formato “.jpeg”. Todos los ficheros de salida son guardados en la carpeta de trabajo generada al principio del código.

1.2. Código de programación de Rstudio.

```
# PERMATHERMAL SCRIPTS
# Level 5 Air or Surface temperature analysis
# Author: Miguel Ángel de Pablo
# Version: 2021-12-29 v2c
# Modificaciones: Aruca Pedrero ##

# 1) Install libraries required for entire script
install.packages("tools")      # General tools
install.packages("lubridate")  # Dates management
install.packages("dplyr")     # Data management
install.packages("tidyr")     # Data management
install.packages("stlplus")   # Time series management
install.packages("ggplot2")   # Nice plots

# 2) Libraries activation
library(tools)
library(lubridate)
library(dplyr)
library(tidyr)
library(stlplus)
library(ggplot2)

# 3) Load one file
filepath = file.choose()      # Open an interactive window to search for a file to process
file <- file_path_sans_ext(basename(filepath)) # Extract the name of the file without extension
rawdata <- read.csv(filepath, sep = ";", header = T, dec=".", quote = "") # Read the csv file
selected by user

# 4) Set Working directory to folder containing the data file
setwd(dirname(filepath))     # Set working directory in Rstudio

# 5) Create a folder for processing outputs using the name of the file
directory <- file_path_sans_ext(filepath)    # Create a new path for a new folder
dir.create(directory)                       # Create a new folder to store the results of the processing
setwd(directory)                            # Set the working directory to the new folder

# 6) Adjust format of datetime column
head(rawdata)                             # Show an example of the datafile in the console [Testing]
str(rawdata)                               # Show the columns structure [Testing]
rawdata$Date.time <- dmy_hm(rawdata$Date.time, tz="UTC") # Convert DateTime column to
date class
str(rawdata)                               # Show the columns structure [Testing]
data <- rawdata                            # Create the working dataset
rm(rawdata)                                # Delete from memory the raw datafile
str(data)                                  # Show the columns structure [Testing]

# 7) Summarize the data
s <- summary(data)                         # Summarize the whole data by columns
capture.output(s, file = paste(file, "_Summary.txt")) # Save the summary information in a table
s <- NULL                                   # Delete information from memory

# 8) Plot rawdata
jpeg("rawdata_plot.jpeg") ##
```

```

plot(data, main = "Raw temperature data", xlab = "Time (years)", ylab = "Temperature (°C)",
col = "#DC143C",
type = 'l', font.lab = 3, family = "sans", bty = "L", cex.main = 1.5) # Simple plot of raw data
legend(legend = colnames(data[-1]), x = "top", y = "topright", lty = 1, lwd = 2, col = "#DC143C")
# Show plot legend
dev.off() ##

# 9) Prepare data table for statistics
# Decompose date into year, month, date, hour columns
data <- data %>% mutate(
  Day = day(Date.time),
  Month = month(Date.time),
  Year = year(Date.time),
  Hours = hour(Date.time))
head(data) # Show and example of the datafile in the console [Testing]

# 10) Calculate daily statistics
data$Hours <- NULL # Delete Hours column
# Calculate Daily statistics FROM HOURLY DATA and store them in a new datafile
DayStats <- data %>% group_by(Year, Month, Day) %>% summarize(
  DayAvg = mean(Temperature, na.rm = TRUE),
  DayMax = max(Temperature, na.rm = TRUE),
  DayMin = min(Temperature, na.rm = TRUE),
  DaySD = sd(Temperature, na.rm = TRUE))
is.na(DayStats) <- sapply(DayStats, is.infinite) # Delete "Inf" values
is.na(DayStats) <- sapply(DayStats, is.na) # Delete "NA" vaues
DayStats$Date <- as.Date(with(DayStats, paste(Year, Month, Day, sep = "-")), "%Y-%m-%d") #
# Merge Year, Month and day columns in a single one to construct a date
colnames(DayStats) # Show columns names [Testing]
DayStats <- DayStats[,c(8,4,5,6,7,1,2,3)] # Reorganize the columns
head(DayStats) # Show an example of the datafile in the console [Testing]

# 11) Calculate monthly statistics
# Calculate Monthly statistics FROM HOURLY DATA and store them in a new datafile
MonthStats <- data %>% group_by(Year, Month) %>% summarize(
  MonthAvg = mean(Temperature, na.rm = TRUE),
  MonthMax = max(Temperature, na.rm = TRUE),
  MonthMin = min(Temperature, na.rm = TRUE),
  MonthSD = sd(Temperature, na.rm = TRUE))
is.na(MonthStats) <- sapply(MonthStats, is.infinite) # Delete "Inf" values
is.na(MonthStats) <- sapply(MonthStats, is.na) # Delete "NA" vaues
MonthStats$Day <- as.integer("1") # Assign the values to first date each month
MonthStats$Date <- as.Date(with(MonthStats, paste(Year, Month, Day, sep = "-")), "%Y-%m-%d") #
# Merge Year, Month and day columns in a single one to construct a date
colnames(MonthStats) # Show columns names [Testing]
MonthStats <- MonthStats[,c(8,3,4,5,6,1,2,7)] # Reorganize columns
head(MonthStats) # Show an example of the datafile in the console [Testing]

# 12) Calculate yearly statistics
# Calculate Yearly statistics FROM HOURLY DATA and store them in a new datafile
YearStats <- data %>% group_by(Year) %>% summarize(
  YearAvg = mean(Temperature, na.rm = TRUE)
  YearMax = max(Temperature, na.rm = TRUE),
  YearMin = min(Temperature, na.rm = TRUE),
  YearSD = sd(Temperature, na.rm = TRUE))
is.na(YearStats) <- sapply(YearStats, is.infinite) # Delete "Inf" values

```

```
is.na(YearStats) <- sapply(YearStats, is.na) # Delete "NA" vaues
head(YearStats) # Show an example of the datafile in the console [Testing]
```

13) Timeseries analysis

```
data_stl <- stlplus( data$Temperature, t = data$Date.time, n.p=8760, s.window="periodic",
sub.start=1) # Additive decomposition of time serie data yearly (365*24 = 8760)
jpeg("timeseries_plot.jpeg") ##
plot(data_stl, main = "General timeseries analysis", ylab = "Temp(C)", xlab = "Time", type =
c("l", "g"), font.lab = 3, family = "sans", bty = "L", cex.main = 1.5) # Plot time serie additive
decomposition
dev.off() ##
dataframestl <- as.data.frame(data_stl$data) # Take the values from decomposition: raw,
seasonal, trend, random
dataframestl$Date <- data_stl$time # Take time values
dataframestl <- dataframestl[,c(7,1,2,3,4,5,6)] # Organize columns
write.table(dataframestl, file = paste(file,"_STL-raw.txt"), append = FALSE, sep = ";", dec =
".",row.names = FALSE, col.names = TRUE) # Export the decomposition to a csv file
dataframestl <- NULL # Delete variable
```

Timeseries day analysis

```
day_stl <- stlplus(DayStats$DayAvg, t = DayStats$Date, n.p=365, s.window="periodic",
sub.start=1) # Additive decomposition of time serie DailyStats yearly (365*1 = 365)
jpeg("timeseries_day.jpeg") ##
plot(day_stl, main = "Daily timeseries analysis", ylab = "Temp(C)", xlab = "Time", type = c("l",
"g")) ## # Plot time serie additive decomposition
dev.off() ##
dataframestl <- as.data.frame(day_stl$data) # Take the values from decomposition: raw,
seasonal, trend, random
dataframestl$Date <- day_stl$time # Take time values
dataframestl <- dataframestl[,c(7,1,2,3,4,5,6)] # Organize columns
write.table(dataframestl, file = paste(file,"_STL-daily.txt"), append = FALSE, sep = ";", dec =
".",row.names = FALSE, col.names = TRUE) # Export the decomposition to a csv file
dataframestl <- NULL # Delete variable
```

Timeseries month analysis

```
month_stl <- stlplus(MonthStats$MonthAvg, t = MonthStats$Date, n.p=12, s.window="periodic",
sub.start=1) # Additive decomposition of time serie MonthStats yearly (12*1 = 12)
jpeg("timeseries_month.jpeg") ##
plot(month_stl, main = "Monnthly timeseries analysis", ylab = "Temp(C)", xlab = "Time", type =
c("l", "g")) ## # Plot time serie additive decomposition
dev.off() ##
dataframestl <- as.data.frame(month_stl$data) # Take the values from decomposition: raw,
seasonal, trend, random
dataframestl$Month <- month_stl$time # Take time values
dataframestl <- dataframestl[,c(7,1,2,3,4,5,6)] # Organize columns
write.table(dataframestl, file = paste(file,"_STL-monthly.txt"), append = FALSE, sep = ";", dec =
".",row.names = FALSE, col.names = TRUE) # Export the decomposition to a csv file
dataframestl <- NULL # Delete variable
```

Timeseries year analysis

```
year_stl <- stlplus(YearStats$YearAvg, t = YearStats$Year, n.p=12, s.window="periodic",
sub.start=1) # Additive decomposition of time serie YearlyStats yearly (1*12 = 12)
jpeg("timeseries_year.jpeg") ##
plot(year_stl, main = "Yearly timeseries analysis", ylab = "Temp(C)", xlab = "Time", type = c("l",
"g")) ## # Plot time serie additive decomposition
dev.off() ##
dataframestl <- as.data.frame(year_stl$data) # Take the values from decomposition: raw,
seasonal, trend, random
```

```

dataframe$Year <- year_stl$time # Take time values
dataframe$tl <- dataframe$tl[,c(7,1,2,3,4,5,6)] # Organize columns
write.table(dataframe$tl, file = paste(file,"_STL-yearly.txt"), append = FALSE, sep = ";", dec =
".",row.names = FALSE, col.names = TRUE) # Export the decomposition to a csv file
dataframe$tl <- NULL # Delete variable

```

14) calculate FDD and TDD indexes

```

MonthIndexes <- DayStats %>% group_by(Year, Month) %>% summarize(MonthFDD =
sum(DayAvg[which(DayAvg<0)]), MonthTDD = sum(DayAvg[which(DayAvg>0)])) # Calculate
Monthly FDD and TDD from daily average
MonthIndexes$Day <- as.integer("1") # Assign the values to first date each month
MonthIndexes$Date <- as.Date(with(MonthIndexes,paste(Year,Month,Day,sep="-")),"%Y-%m-
%d") # Merge Year, Month and day columns in a single one to construct a date
colnames(MonthIndexes) # Show columns names [Testing]
MonthIndexes <- MonthIndexes[,c(6,3,4,1,2,5)] # Reorganize columns
head(MonthIndexes) # Show an example of the datafile in the console [Testing]
jpeg("timeseries_index.jpeg") ##
plot(MonthIndexes$Date, MonthIndexes$MonthFDD, # Plot Monthly FDD and TDD indexes
main = "Monthly FDD and TDD indexes", ##
xlab = "Time (years)", ylab = "FDD & TDD (°C/day)", ##
col = "#00CED1", ##
type = 'l', ##
font.lab = 3, family = "sans", bty = "L", cex.main = 1.5, lwd = 2, ##
ylim=c(min(MonthIndexes$MonthFDD), max(MonthIndexes$MonthTDD))) ##
lines(MonthIndexes$Date, MonthIndexes$MonthTDD, type = "l", col = "#DC143C", lwd = 2) ##
legend(legend = c("MonthFDD", "MonthTDD"), x = "bottom", y = "bottomright", lty = 1, lwd = 2,
col = c("#00CED1", "#DC143C")) ##
dev.off() ##

```

15) Save results to csv files (To be moved to each correspondant section)

```

DayStats$Year <- NULL # Remove Year column from daily statistics dataframe
DayStats$Month <- NULL # Remove Month column from daily statistics dataframe
DayStats$Day <- NULL # Remove Day column from daily statistics dataframe
write.table(DayStats, file = paste(file,"_Stats-daily.txt"), append = FALSE, sep = ";", dec =
".",row.names = FALSE, col.names = TRUE) ## # Export Daily statistics to a csv file
MonthStats$Year <- NULL # Remove Year column from monthly statistics dataframe
MonthStats$Month <- NULL # Remove Month column from monthly statistics dataframe
MonthStats$Day <- NULL # Remove Day column from monthly statistics dataframe
write.table(MonthStats, file = paste(file,"_Stats-monthly.txt"), append = FALSE, sep = ";", dec =
".",row.names = FALSE, col.names = TRUE) ## # Export Monthly statistics to a csv file
write.table(YearStats, file = paste(file,"_Stats-yearly.txt"), append = FALSE, sep = ";", dec =
".",row.names = FALSE, col.names = TRUE) ## # Export Yearly statistics to a csv file
MonthIndexes$Year <- NULL # Remove Year column from monthly indexes dataframe
MonthIndexes$Month <- NULL # Remove Month column from monthly indexes dataframe
MonthIndexes$Day <- NULL # Remove Day column from monthly indexes dataframe
write.table(MonthIndexes, file = paste(file,"_Indexes-Monthly.txt"), append = FALSE, sep = ";",
dec = ".",row.names = FALSE, col.names = TRUE) ## # Export Monthly indexes to a csv file

```

16) Plot statistics ## The whole section has been modified by Aruca Pedrero.

```

jpeg("daystarts_plot.jpeg") ##
plot(DayStats$Date, DayStats$DayAvg, main = " Dayly statistics", font.lab = 3, family = "sans",
bty = "L", cex.main = 1.5, ##
xlab = "Time (years)", ylab = "MADT (°C)", col = "#228B22", type = 'l', lty = 1 ) ## # Plot Daily
statistics (To be improved)
lines(DayStats$Date, DayStats$DayMax, type = "l", col = "#DC143C") ##

```



```

lines(DayStats$Date, DayStats$DayMin, type = "l", col = "#00CED1") ##
legend(legend = c("Maximum temperatures", "Average temperatures", "Minimum
temperatures"), x = "bottom", y = "bottomright", lty = 1, ##
      lwd = 2, col = c("#DC143C", "#228B22", "#00CED1"))
dev.off() ##
jpeg("monthstarts_plot.jpeg") ##
plot(MonthStats$Date, MonthStats$MonthAvg, main = "Monthly statistics", font.lab = 3, family =
"sans", bty = "L", cex.main = 1.5, ##
     xlab = "Time", ylab = "MAMDT (°C)", col = "#228B22", type = "l", lwd = 2,
     ylim=c(min(MonthStats$MonthMin, na.rm = TRUE),
            max(MonthStats$MonthMax, na.rm = TRUE))) ## # Plot Monthly statistics
lines(MonthStats$Date, MonthStats$MonthMax, type = "l", col = "#DC143C", lwd = 2) ##
lines(MonthStats$Date, MonthStats$MonthMin, type = "l", col = "#00CED1", lwd = 2) ##
legend(legend = c("Maximum temperatures", "Average temperatures", "Minimum
temperatures"), x = "bottom", y = "bottomright", lty = 1, ##
      lwd = 2, col = c("#DC143C", "#228B22", "#00CED1")) ##
dev.off() ##
jpeg("yearstarts_plot.jpeg") ##
plot(YearStats$Year, YearStats$YearAvg, main = "Yearly statistics", font.lab = 3, family =
"sans", bty = "L", cex.main = 1.5, ##
     xlab = "Time", ylab = "MAYT (°C)", col = "#228B22", type = "l", lwd = 2,
     ylim=c(min(YearStats$YearMin, na.rm = TRUE), max(YearStats$YearMax, na.rm = TRUE))) ##
# Plot Yearly statistics (To be improved)
lines(YearStats$Year, YearStats$YearMax, type = "l", col = "#DC143C", lwd = 2) ##
lines(YearStats$Year, YearStats$YearMin, type = "l", col = "#00CED1", lwd = 2) ##
legend(legend = c("Maximum temperatures", "Average temperatures", "Minimum
temperatures"), x = "bottom", y = "bottomright", lty = 1, ##
      lwd = 2, col = c("#DC143C", "#228B22", "#00CED1")) ##
dev.off() ##

# 17) Clear memory and data at the end
rm(file) # Delete filename
rm(filepath) # Delete filepath
rm(list=ls())

#Set working directory outside the datafile folder
setwd("../") # Set outside the working folder
getwd() # Show the new working directory [Testing]

```

Anexo II. Evolución interanual de las temperaturas.

Tabla II.1. Temperaturas anuales por estación, medido en °C.

TEMPERATURAS ANUALES									
AÑO		DEC_CL	LIV_LL	LIV_JC	LIV_NI	LIV_IN	LIV_CR	LIV_MO	LIV_SO
2006	Máx			9,94			8,93		8,26
	Media			-2,29			-3,69		-4,76
	Min			-19,15			-19,48		-21,67
2007	Máx			8,60	8,37		7,59	9,20	8,60
	Media			-3,29	-2,15		-4,70	-4,10	-5,96
	Min			-25,54	-22,69		-25,54	-23,50	-26,21
2008	Máx			10,28	12,15	12,15	6,64	9,60	4,56
	Media			-1,68	0,22	0,02	-1,57	-2,14	-4,35
	Min			-15,78	-12,05	-12,05	-13,64	-14,56	-17,63
2009	Máx	4,90	4,90	17,34		11,19	8,35	9,15	4,76
	Media	-4,61	-3,20	-2,72		-1,88	-2,44	-3,33	-4,19
	Min	-24,02	-20,97	-19,48		-16,67	-17,06	-18,12	-18,99
2010	Máx	5,40	9,19		10,92	10,70		10,67	
	Media	-2,07	-1,75		-0,95	-1,28		-1,92	
	Min	-15,75	-14,53		-14,30	-13,71		-14,52	
2011	Máx	6,79	5,47	9,34	9,06	8,76	7,58	6,89	8,44
	Media	-3,08	-2,89	-1,75	-1,98	-1,91	-2,98	-3,59	-3,98
	Min	-19,38	-21,25	-20,34	-21,18	-19,91	-20,23	-19,68	-20,93
2012	Máx	7,21	6,01		8,68	7,58	6,85		6,04
	Media	-2,92	-2,42		-1,51	-1,54	-2,48		-3,72
	Min	-16,56	-20,21		-14,73	-14,12	-15,22		-17,21
2013	Máx	6,71	9,43	7,66	7,17	7,48	6,10		5,33
	Media	-2,71	-2,59	-1,68	-1,76	-1,70	-2,68		-3,62
	Min	-22,08	-21,18	-19,67	-19,95	-20,02	-20,78		-22,32
2014	Máx	5,83	3,84	6,82			5,21		15,14
	Media	-2,57	-2,50	-1,40			-2,45		-2,58
	Min	-14,16	-14,90	-12,10			-13,47		-14,35
2015	Máx	5,85	5,97	8,45	7,55	7,67	7,16	6,89	
	Media	-3,21	-3,09	-2,23	-2,78	-2,45	-3,43	-3,88	
	Min	-19,44	-21,91	-19,35	-19,55	-18,81	-19,17	-19,34	
2016	Máx	7,74	11,36	7,26	10,31	10,89	8,99	9,46	
	Media	-1,90	-1,93	-1,08	-1,30	-1,21	-2,18	-2,34	
	Min	-16,88	-19,31	-17,97	-19,99	-18,09	-17,91	-18,16	
2017	Máx		5,51	6,99		7,26			5,96
	Media		-1,84	-1,47		-1,33			-3,30
	Min		-15,99	-17,47		-17,56			-19,40
2018	Máx	9,85	5,70	9,43	9,78	10,00	8,76	9,60	

	Media	-0,97	-1,70	-0,86	-1,21	-1,04	-2,10	-2,29	
	Min	-16,43	-17,44	-15,36	-15,77	-15,71	-16,62	-16,90	
2019	Máx	7,02	5,60	8,89	9,76	7,95	12,62		6,82
	Media	-2,45	-2,24	-1,51	-0,94	-1,37	0,15		-3,02
	Min	-17,80	-19,86	-15,79	-15,27	-15,79	-15,34		-17,79
2020	Máx	10,83	9,30	11,49		12,55	11,95	13,17	12,95
	Media	-0,88	-1,37	-0,81		-0,95	-2,02	-2,28	-1,62
	Min	-16,99	-20,46	-15,08		-15,27	-16,57	-16,71	-16,42
2021	Máx	9,69	5,51	8,06	8,52	8,66	7,47	7,69	7,76
	Media	0,80	-0,95	-0,32	-0,35	-0,45	-1,39	-1,60	-2,07
	Min	-17,56	-17,33	-17,94	-18,05	-18,17	-18,30	-19,39	-20,71

Anexo III. Tablas comparativas de las estaciones.

Tabla III.1. Comparativa de las temperaturas anuales de cada estación.

	DEC_CL	LIV_LL	LIV_JC	LIV_NI	LIV_IN	LIV_CR	LIV_MO	LIV_SO
Altitud (msnm)	85	75	11	19	34	117	145	274
Orientación laderas	Solana	Solana	Solana	Solana	Solana	Solana	Solana	Solana
T media (°C)	-2,21	-2,19	-1,65	-1,33	-1,32	-2,43	-2,65	-3,70
T máxima (°C)	10,83	11,36	17,34	12,15	12,55	12,62	13,17	15,14
Año T máxima	2020	2016	2009	2008	2020	2019	2020	2014
T mínima (°C)	-24,02	-21,91	-25,54	-22,69	-20,02	-25,54	-23,50	-26,21
Año T mínima	2009	2015	2007	2007	2013	2007	2007	2007

Tabla III.2. Comparativa de las temperaturas mensuales de cada estación.

	DEC_CL	LIV_LL	LIV_JC	LIV_NI	LIV_IN	LIV_CR	LIV_MO	LIV_SO
Mes más cálido del periodo	F	F	F	F	F	F	F	E
T mes más cálido (°C)	1,16	1,24	1,91	1,95	1,88	0,89	0,99	0,36
Verano más cálido	2021 (3,76 °C)	2020 (1,98 °C)	2020 (2,50 °C)	2008 (2,70 °C)	2008 (2,71 °C)	2019 (1,95 °C)	2011 (1,05 °C)	2020 (1,54°C)
Invierno más cálido	2021 (-2,74°C)	2021 (-3,89°C)	2021 (-3,05°C)	2008 (-3,04°C)	2008 (-3,04°C)	2019 (-1,15°C)	2010 (-4,13°C)	2020 (-4,98°C)
Meses T < 0 °C	DEF	EFM	EFMD	EFMND	EFMD	EFM	EF	E
Mes más frío del periodo	Ag	Ag	Ag	Jl	Ag	Ag	Ag	Ag
T mes más frío (°C)	-6,15	-6,01	-5,85	-4,93	-5,12	-6,22	-6,68	-7,57
Verano más frío	2009 (-0,76 °C)	2014 (-0,31°C)	2014 (0,76°C)	2013 (0,84°C)	2010 (0,69°C)	2007 (-0,52°C)	2007 (-0,25°C)	2007 (1,54°C)
Invierno más frío	2009 (-9,13°C)	2015 (-7,55°C)	2007 (-7,60°C)	2015 (-7,10°C)	2015 (-6,90°C)	2007 (-8,83°C)	2015 (-7,91°C)	2007 (-10,16°C)

Anexo IV. Evolución anual y mensual de los FDD y TDD.

Tabla IV.1. FDD y TDD anuales por estación medidos en °C·día.

Año		DEC_CL	LIV_LL	LIV_JC	LIV_NI	LIV_IN	LIV_CR	LIV_MO	LIV_SO
2006	FDD			-969,56			-1299,01		-1650,12
	TDD			189,56			69,04		34,14
2007	FDD			-1322,53	-861,92		-1740,17	-1377,79	-2179,99
	TDD			124,49	170,94		37,63	41,92	17,13
2008	FDD			-789,60	-430,98	-430,98	-712,41	-869,27	-1570,17
	TDD			177,16	512,87	440,12	144,13	110,08	9,79
2009	FDD	-1581,31	-1106,68	-1176,31		-906,62	-1042,94	-1313,54	-1558,58
	TDD	41,49	72,27	183,64		236,18	163,75	103,71	31,97
2010	FDD	-803,642	-725,58		-563,74	-638,29		-798,19	
	TDD	72,90	88,63		226,06	172,92		96,50	
2011	FDD	-1258,91	-1167,03	-928,23	-999,24	-976,92	-1202,28		-1475,67
	TDD	138,39	140,17	294,44	277,81	278,47	128,93		60,23
2012	FDD	-1159,5	-1012,42		-774,34	-781,06	-1016,40		-1392,93
	TDD	96,15	126,28		222,97	218,17	109,46		32,21
2013	FDD	-1107,15	-1046,08	-796,93	-854,29	-839,86	-1081,97		-1372,27
	TDD	118,85	101,66	205,74	213,67	218,04	103,13		50,41
2014	FDD	-980,502	-953,91	-658,18			-945,82		-1156,88
	TDD	50,01	42,35	146,91			52,95		214,53
2015	FDD	-1259,91	-1213,88	-1018,37	-1054,61	-1063,85	-1304,56	-1345,50	
	TDD	92,08	97,33	203,51	129,19	181,06	75,68	57,22	
2016	FDD	-776,076	-791,39	-574,91	-635,97	-622,14	-860,63	-914,34	
	TDD	87,41	86,70	191,43	167,04	183,94	71,25	73,30	
2017	FDD		-861,83	-793,66		-770,40			-1207,60
	TDD		191,72	258,36		284,01			83,18
2018	FDD	-628,412	-793,19	-594,81	-639,16	-641,64	-859,73	-948,73	
	TDD	294,92	172,57	282,64	230,17	261,87	127,78	114,31	
2019	FDD	-982,987	-928,52	-757,10	-636,36	-732,25	-477,50		-1181,34
	TDD	90,76	109,88	205,79	293,66	232,70	531,04		79,41
2020	FDD	-661,502	-765,98	-643,76		-684,61	-965,83	-971,24	-844,35
	TDD	340,11	264,57	347,69		335,81	225,82	161,10	252,08
2021	FDD	-409,146	-579,96	-450,19	-458,03	-474,64	-651,61	-716,99	-925,56
	TDD	702,06	231,73	332,43	331,99	310,37	145,88	133,66	169,25



Figura IV.1. Evolución de los índices mensuales (izquierda) y anuales (derecha) de las estaciones DEC_CL, LIV_LL, LIV_JC y LIV_NI.



Figura IV.2. Evolución de los índices mensuales (izquierda) y anuales (derecha) de las estaciones LIV_IN, LIV_CR, LIV_MO y LIV_SO.

Anexo V. Comparativa anual de las temperaturas frente a la altitud.

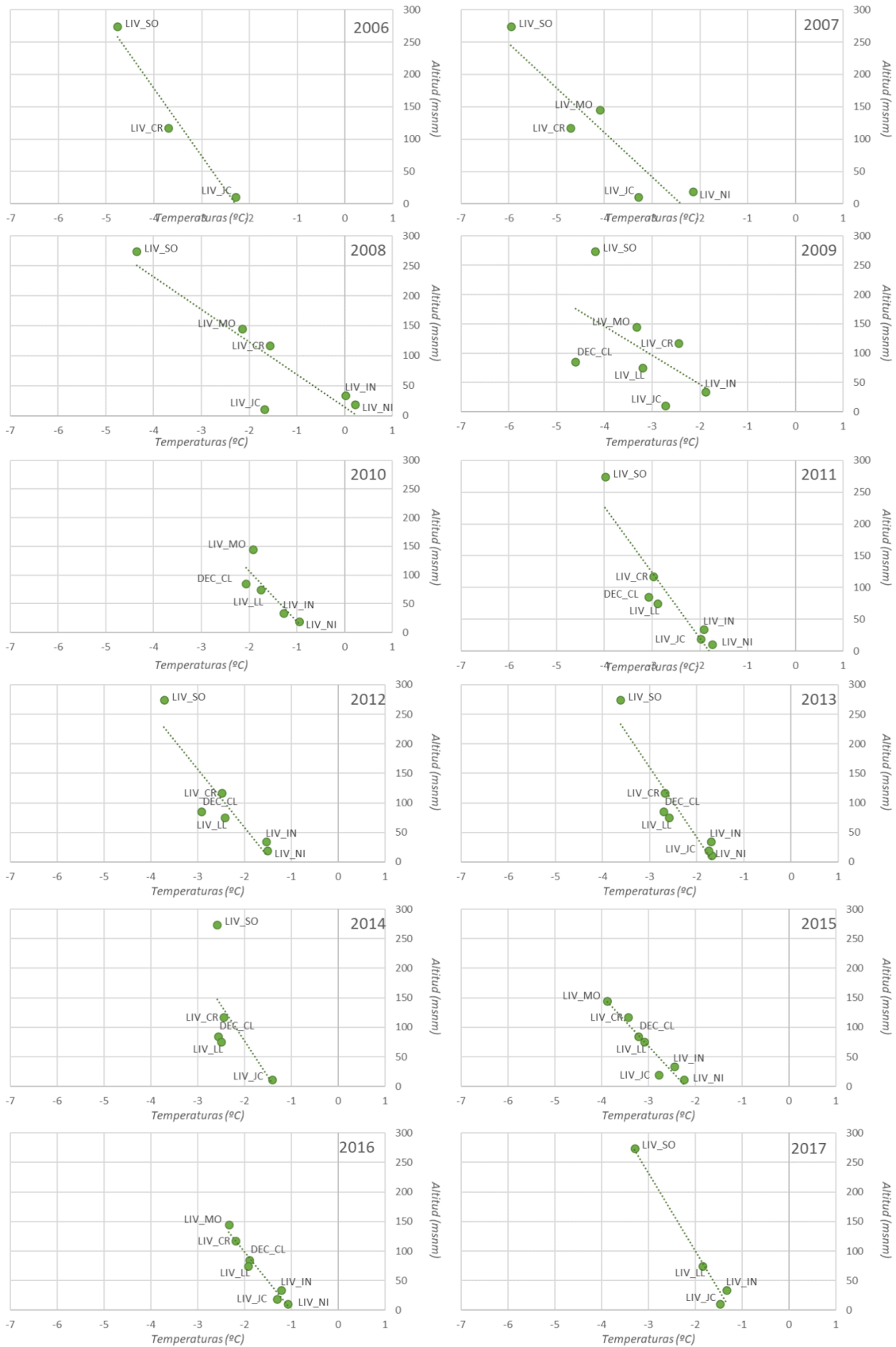


Figura V.1. Temperaturas medias anuales frente a la altura (2006-2017).

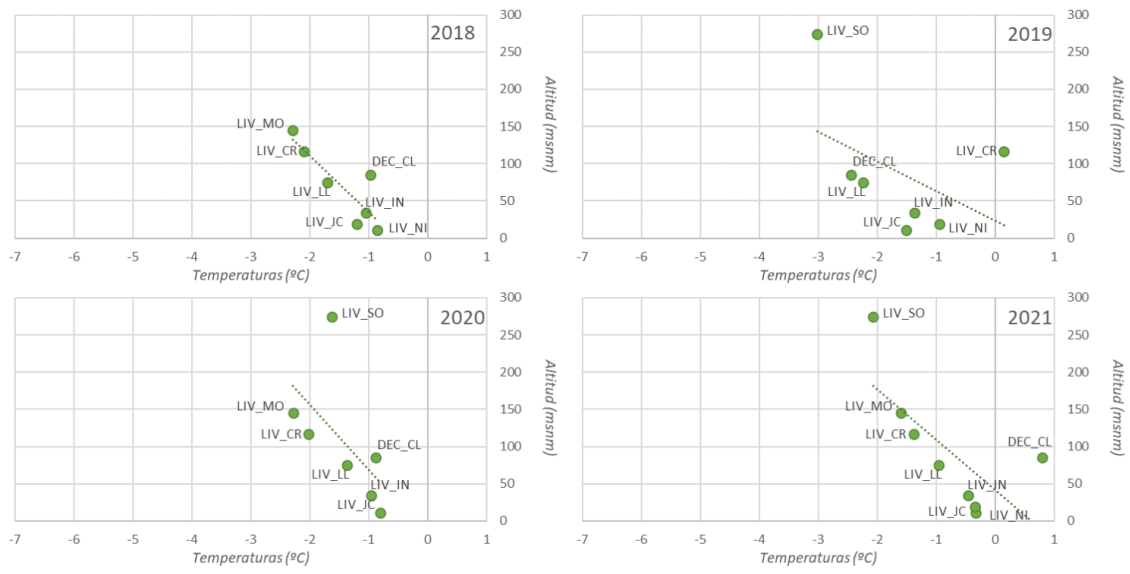


Figura V.2. Temperaturas medias anuales frente a la altura (2018-2021).