



HAL
open science

Clima y variabilidad climática en los Pirineos

Ana Moreno, Blas Valero Garcés, Deborah Verfaillie, Didier Galop, Ernesto Rodriguez, Ernesto Tejedo, Fernando Barreiro-Lostres, Jean-Michel Soubeyrou, Jordi Cunillera, José M Cuadrat, et al.

► **To cite this version:**

Ana Moreno, Blas Valero Garcés, Deborah Verfaillie, Didier Galop, Ernesto Rodriguez, et al.. Clima y variabilidad climática en los Pirineos. El Cambio climático en los Pirineos : impactos, vulnerabilidades y adaptación Bases de conocimiento para la futura estrategia de adaptación al cambio climático en los Pirineos, OPCC-CTP, pp.6-17, 2018. hal-03185743

HAL Id: hal-03185743

<https://hal.science/hal-03185743>

Submitted on 30 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



El Cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación

Bases de conocimiento para la futura estrategia
de adaptación al cambio climático en los Pirineos



OPCC-CTP (2018). El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación
Bases de conocimiento para la futura estrategia de adaptación al cambio climático en los Pirineos

ISBN: 978-84-09-06268-3

Coordinación y edición de textos: Juan Terrádez e Idoia Arauzo

Diseño de la portada: La Page Original

Edición gráfica y maquetación: Collserola

Foto de portada: © OPCC

Aviso legal

El contenido de esta publicación no refleja necesariamente las opiniones oficiales del Observatorio Pirenaico del Cambio climático u otras instituciones de la Unión Europea. Ni el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático ni ninguna persona que actúe en nombre del OPCC es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en este informe.

Aviso de copyright



Reconocimiento-NoComercial (CC BY-NC)

Esta licencia permite a otros entremezclar, ajustar y construir a partir de su obra con fines no comerciales, y aunque en sus nuevas creaciones deban reconocerle su autoría y no puedan ser utilizadas de manera comercial, no tienen que estar bajo una licencia con los mismos términos.

Descarga el informe completo y el resumen ejecutivo en ES, FR, CAT o EN en el portal de información del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático: <https://opcc-ctp.org/>

Informe sobre el cambio climático en los Pirineos

Desde su lanzamiento en 2010 bajo la presidencia de Midi-Pyrénées, el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático de la Comunidad de Trabajo de los Pirineos (CTP) ha trabajado analizando la vulnerabilidad al cambio climático de las distintas poblaciones, sectores sociales, económicos y naturales del espacio pirenaico transfronterizo, a través del desarrollo de metodologías adecuadas para ello y bajo el prisma de la cooperación. Durante 2018 y siguiendo la línea de trabajo del Observatorio, la CTP ha elaborado un informe en el que se actualiza el conocimiento sobre las repercusiones del cambio climático en el territorio pirenaico transfronterizo. Este informe recoge las bases científicas sobre los impactos del cambio climático y su repercusión en el territorio, así como un compendio de recomendaciones sectoriales de adaptación formuladas en consecuencia. Estas bases de conocimiento son indispensables para orientar las políticas en materia de adaptación al cambio climático de manera más eficaz, para aprovechar las oportunidades emergentes y maximizar las sinergias positivas con otras políticas sectoriales. Su valor añadido reside sin lugar a duda en el espíritu de cooperación que ha marcado tanto su concepción como su redacción. En él han participado alrededor de 100 científicos y expertos de referencia provenientes de ambas vertientes de los Pirineos. Han colaborado en su redacción así como en los varios procesos de revisión que otorgan a este documento un amplio consenso científico. Es necesario subrayar que sin la larga trayectoria de cooperación, trabajo en red y proyección internacional con organismos como la Convención de los Alpes, la Convención de los Cárpatos o la Agencia Europea de Medio Ambiente, sería imposible crear documentos de referencia como el presente informe. La visión de este informe es la propia del Observatorio, que concibe los Pirineos como una única "bioregión" que no entiende de límites administrativos y cuyos sistemas socioeconómicos y biofísicos presentan una especial vulnerabilidad al cambio climático. Las evidencias científicas recogidas en este informe ponen de manifiesto, lo mismo que otros estudios ya han demostrado en otros territorios: las zonas de montaña están experimentando aumentos de temperatura superiores a las zonas llanas y por lo tanto los impactos del cambio climático son más intensos. En concreto para los Pirineos ya se están observando impactos en todos los sectores naturales y socioeconómicos como la desaparición acelerada de ecosistemas sensibles y elementos iconográficos como los glaciares; la alteración del ciclo de vida de muchas especies, entre ellas algunas endémicas; la incidencia del cambio climático en los riesgos naturales, en las actividades ligadas al turismo, en la agricultura o los cambios observados en el ciclo hidrológico. El cambio climático se posiciona como un factor de estrés añadido que agrava los problemas ya conocidos en el territorio pirenaico como la despoblación, los cambios de usos del suelo o la falta de relevo generacional en el sector primario. Desde la CTP se entiende la lucha contra el cambio climático y la adaptación a sus impactos como instrumentos transversales que ofrecen multitud de oportunidades para abordar los desafíos de los Pirineos que son a la vez desafíos globales. De esta manera, la CTP, desde la acción local, contribuye a la consecución del Objetivo 13, Acción por el Clima, de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.



D. Francisco Javier Lambán Montañés
Presidente de la CTP

1. Clima y Variabilidad Climática en los Pirineos	6
1.1 El clima del periodo glacial y la deglaciación	6
1.1.1 El clima del Holoceno	6
1.1.2 Los últimos 2000 años	7
1.2 El clima actual	10
1.2.1 Evolución de la temperatura media anual y estacional	10
1.2.2 Evolución de la precipitación anual y estacional	11
1.2.3 Evolución del manto de nieve en los Pirineos	13
1.3 Proyecciones de cambio climático en los Pirineos	16
2. El Impacto del CC en los sectores biofísicos	18
2.1 El cambio climático durante el Holoceno	18
2.2 Biodiversidad de montaña: fauna	22
2.2.1 Cambios en la productividad y abundancia de las especies	22
2.2.2 Modificaciones del ciclo de vida (alteraciones fenológicas) y de las interacciones entre especies	24
2.2.3 Modificaciones en la distribución geográfica	26
2.2.4 Alteraciones de las interacciones ecológicas y del funcionamiento de los ecosistemas	30
2.2.5 Mayor riesgo de invasión y/o expansión de especies exóticas	32
2.2.6 Impacto en la interconexión entre las redes de espacios protegidos	33
2.2.7 Conclusiones y recomendaciones	33
2.3 Biodiversidad de montaña: flora	36
2.3.1 Alteraciones fisiológicas y cambios en la productividad y abundancia de las especies	37
2.3.2 Cambios del ciclo vital (cambios fenológicos)	37
2.3.3 Alteraciones ecológicas y del funcionamiento de los ecosistemas	38
2.3.4 Cambios en la composición y en las interacciones entre especies en la comunidad ecológica	38
2.3.5 Vulnerabilidades y servicios ecosistémicos	41
2.3.6 Conclusiones y recomendaciones	42
2.4 Bosques	44
2.4.1 Los impactos potenciales del cambio climático en la diversidad de comunidades vegetales y sobre la distribución de las especies forestales	44
2.4.2 Alteración de la productividad de los bosques y papel de los bosques como sumideros de carbono	47
2.4.3 El impacto del cambio climático sobre el papel de los bosques en la atenuación de los riesgos naturales	49
2.4.4 Alteración de las condiciones de salud de los bosques y posible desequilibrio con las comunidades de agentes patógenos	51
2.4.5 Impacto del cambio climático sobre el riesgo de incendios forestales en los Pirineos	54
2.4.6 Conclusiones y recomendaciones	56
2.5. Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas	58
2.5.1 Características de los lagos y turberas pirenaicos	58
2.5.2 Procesos en lagos y turberas de alta montaña en un contexto de cambio climático	59
2.5.3 Impactos previstos	62
2.5.4 Principales desafíos	64
2.5.5 Conclusiones y recomendaciones	64
2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos	66
2.6.1 Cambios en las aguas superficiales: aportación anual	68
2.6.2 Cambios en las aguas superficiales: régimen mensual	70
2.6.3 Cambios en las aguas subterráneas y en las surgencias	70
2.6.4 Cambios en las características físico-químicas de las masas de agua	73
2.6.5 Cambios en la composición biológica de las masas de agua	74
2.6.6 Conclusiones y recomendaciones para la adaptación	76

3. Impacto del cambio climático en los sectores socioeconómicos	78
3.1. Turismo	78
3.1.1 Reducción del atractivo turístico invernal de las estaciones de esquí	78
3.1.2 Alteración de elementos iconográficos del paisaje Pirenaico	82
3.1.3 Incremento del riesgo de las infraestructuras turísticas a los fenómenos hidrológicos, geológicos y eventos climáticos extremos	83
3.1.4 Prolongación de la estación de turismo de montaña	83
3.1.5 Conclusiones y recomendaciones	85
3.2. Cultivos agrícolas y agropastoralismo de montaña	87
3.2.1 Impactos y vulnerabilidades en el sector agrícola	87
A. Desplazamiento de las áreas de idoneidad de los cultivos	87
B. Cambios en los rendimientos de los cultivos	88
C. Expansión de plagas y enfermedades agrícolas	92
3.2.2 Pastos naturales de montaña: impactos y vulnerabilidades	94
A. Cambios en la producción y la calidad de los pastos	94
B. Alteraciones en la composición florística y de la diversidad	95
3.2.3 Sector ganadero extensivo: Impactos y vulnerabilidades	96
A. Reducción del bienestar animal y de la producción ganadera	96
B. Nuevas zoonosis y difusión de enfermedades del ganado	97
3.2.4 Conclusiones y recomendaciones	98
3.3 Energía	102
3.3.1 Disminución de la capacidad de producción de energía hidroeléctrica	102
3.3.2 Disminución de la eficiencia en la producción de energía termoeléctrica	104
3.3.3 Cambio climático y energías renovables	104
3.3.4 Variación estacional de la demanda energética	106
3.3.5 Incremento del riesgo de daños a las infraestructuras energéticas	107
3.3.6 Conclusiones y recomendaciones	108
3.4 Riesgos naturales	111
3.4.1 Aumento de los fenómenos meteorológicos extremos	111
3.4.2 Aumento de la frecuencia de inundaciones y crecidas	113
3.4.3 Aumento de los deslizamientos y desprendimientos de rocas	115
3.4.4 Mayores riesgos relacionados con la degradación del permafrost	115
3.4.5 Avalanchas	117
3.4.6 Diseñar una estrategia de adaptación a los riesgos naturales en el futuro	118
3.4.7 Conclusiones y recomendaciones	119
Bibliografía	124
1. Clima y Variabilidad Climática en los Pirineos	124
1.1. El clima del periodo glacial y la deglaciación	124
1.2. El clima actual	125
1.3. Proyecciones de cambio climático en los Pirineos	125
2. El Impacto del CC en los sectores biofísicos	128
2.1 El cambio climático durante el Holoceno	128
2.2 Biodiversidad de montaña: fauna	128
2.3 Biodiversidad de montaña: flora	131
2.4 Bosques	133
2.5 Ecosistemas sensibles de alta montaña: lagos y turberas	136
2.6 Ciclo hidrológico y recursos hídricos	137
3. Impacto del cambio climático en los sectores socioeconómicos	140
3.1 Turismo	140
3.2. Cultivos agrícolas y agropastoralismo de montaña	142
3.3 Energía	143
3.4 Riesgos naturales	143

1. Clima y variabilidad climática en los Pirineos

Coordinadores: José María Cuadrat (UNIZAR), Blas Valero Garcés (IPE-CSIC)

Autores: Ana Moreno (IPE-CSIC), Blas Valero Garcés (IPE-CSIC), Deborah Verfaillie (METEO-FRANCE), Didier Galop (CNRS), Ernesto Rodríguez (AEMET), Ernesto Tejedor (UNIZAR), Fernando Barreiro-Lostres (IPE-CSIC), Jean-Michel Soubeyroux (METEO-FRANCE), Jordi Cunillera (SMC), José M. Cuadrat (UNIZAR), José María García-Ruiz (IPE-CSIC), Juan Ignacio López-Moreno (IPE-CSIC), Laura Trapero (CENMA), Marc Pons (CENMA), Marc Prohom (SMC), Miguel A. Saz (UNIZAR), Penélope González-Sampérez (IPE-CSIC), Petra Ramos (AEMET), Pilar Amblar (AEMET), Ramón Copons (CENMA), Roberto Serrano-Notivoli (UNIZAR), Simon Gascoïn (CESBIO), Yolanda Luna (AEMET).

1.1 El clima del periodo glacial y la deglaciación

Los cambios climáticos durante el Cuaternario (últimos 2,6 millones de años), y en particular la sucesión de periodos glaciales e interglaciales, han tenido importantes repercusiones en los procesos superficiales (modelado del paisaje, geomorfología) y en los ecosistemas pirenaicos, incluyendo la formación de grandes artesas y circos glaciares, depósitos glaciolacustres y formas de detalle. En el Pirineo hay evidencias de glaciaciones anteriores al último máximo glacial global (UMG)¹ que sucedió hace unos 22.000 años, sincrónico al Estadio Isotópico Marino y contemporáneo a la máxima extensión de los casquetes glaciares continentales. Así, en el Valle del Aragón hay depósitos morrénicos y fluvioglaciares de hace 171 ka, y 263 ka (García-Ruiz et al., 2013), en el valle del Gállego de hace 170 ka (Lewis et al., 2009) y en el Valle de Ariège, con avances hacia 79 ka y 35 ka (Delmas et al., 2011).

Aunque la sucesión de periodos fríos y cálidos es sincrónica a escala planetaria, la máxima extensión de los glaciares pirenaicos no sucedió hace 20000 años durante el UMG sino hace unos 60.000 años (Lewis et al., 2009), con ligeras variaciones entre diferentes valles. Esta asincronía se debe a que el clima en los Pirineos ha estado controlado por la interacción existente entre los procesos atmosféricos y oceánicos del Atlántico

Norte, la dinámica atmosférica subtropical, y por los cambios en la radiación solar (insolación) derivados de las variaciones en la órbita de la Tierra (parámetros orbitales) (Bartolomé et al., 2015; González-Sampérez et al., 2017).

Durante el UMG (hace entre 22 y 19 ka) los glaciares pirenaicos también experimentaron un crecimiento, aunque es probable que se tratase de un periodo relativamente seco, de manera que no superó la máxima extensión alcanzada entre 30 y 40 ka antes. El comienzo de la última deglaciación, hace unos 19.000 años, se corresponde con un incremento rápido de la temperatura y la humedad, bien documentado en registros glaciares (Palacios et al., 2017), en lagos (Millet et al., 2012; González-Sampérez et al., 2017) y en depósitos en cuevas como espeleotemas (Bartolomé et al., 2015). Los glaciares pirenaicos retrocedieron mucho hasta acantonarse en las áreas de cabecera. La deglaciación fue un periodo de clima inestable, con cambios tanto a escala milenaria como eventos de cambios abruptos causados en última instancia por la inestabilidad de los casquetes glaciares y la dinámica del Atlántico Norte. Tras un periodo inicial relativamente seco y árido, se produjo una nueva expansión de los glaciares hace unos 17.000 años seguida de condiciones más cálidas y húmedas (hace 14700-12900 años), interrumpidas de nuevo por un periodo de vuelta a condiciones casi glaciales durante una fase conocida como Younger Dryas, que conllevó un descenso de la temperatura de casi 2°C en el Pirineo (Bartolomé et al., 2015) y el crecimiento de glaciares de pequeña entidad en ambas vertientes (Pallàs et al., 2010). Este periodo fue el final de la última glaciación y el comienzo del interglacial actual: el Holoceno.

1.1.1 El clima del del Holoceno

El comienzo del Holoceno, hace 11700 años, supuso un cambio sustancial del clima a escala global, con un aumento generalizado de las temperaturas en latitudes medias, asociado al incremento de la insolación durante el verano en el hemisferio norte y a la desaparición de los casquetes glaciares. En la vertiente sur del Pirineo central, el aumento de las precipitaciones asociado

(1) El Último Máximo Glacial (UMG) se define como el periodo en el que los casquetes glaciares continentales tuvieron su máxima extensión en el hemisferio norte. Los estadios isotópicos marinos definen periodos glaciares (números pares) e interglaciares (números impares) basados en la composición isotópica de los fósiles de foraminíferos acumulados en el fondo del mar.

1.1 LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO EN LOS PIRINEOS

La Pequeña Edad del Hielo fue la última fase climática a escala global del Holoceno, y sucedió entre ca. 1300 - 1850 CE, antes del calentamiento global actual (Oliva et al., 2018). En nuestras latitudes se caracterizó por temperaturas más frías y un aumento de los fenómenos extremos, aunque con gran variabilidad regional. Tres fases frías en torno a 1650, 1770 y 1850 CE parecen asociadas a mínimos de la actividad solar (mínimos de manchas solares de Maunder, Spörer y Dalton), aunque otros factores como las grandes erupciones volcánicas (Tambora en Indonesia en 1815) también contribuyeron al descenso de las temperaturas. Durante esos siglos, muchos glaciares pirenaicos se reactivaron y avanzaron hasta alcanzar su máxima extensión en todo el Holoceno, de modo que los paisajes y ecosistemas pirenaicos se adaptaron a condiciones más frías antes del Calentamiento Global del siglo XX. Las temperaturas medias, estimadas a partir de las Líneas de Equilibrio Glaciar, fueron unos 0.9°C inferiores a las actuales (López Moreno, 2000)

al comienzo del Holoceno a escala global parece haberse retrasado, produciéndose hace tan sólo 9500 años (Leunda et al., 2017). En general, el clima durante el Holoceno temprano (hasta hace unos 8000 años) fue más cálido y húmedo en el Pirineo que durante la deglaciación, pero probablemente con diferencias entre ambas vertientes y entre las zonas mediterráneas y atlánticas (González-Sampérez et al., 2017). El clima durante el Holoceno temprano estuvo caracterizado por la alta estacionalidad causada por la configuración de los parámetros orbitales lo que provocó un aumento en la acumulación de nieve en las cumbres pirenaicas durante el invierno y unas altas tasas de fusión durante el verano. En la vertiente sur del Pirineo central (secuencia de Basa de la Mora) la inestabilidad climática del Holoceno temprano (entre 9800 y 8100 años) se marca con cuatro eventos rápidos y de corta duración que tuvieron lugar hace 9700, 9300, 8800 y 8300 años.

Desde hace 8100 años aproximadamente y hasta 5700 años, el clima fue más estable y con precipitaciones más abundantes. Tal como sucedió en muchas áreas de montaña del hemisferio norte, seguramente la mayoría de los glaciares pirenaicos desapareció durante el Holoceno temprano, cuando las temperaturas en Europa fueron probablemente las más elevadas de todo el periodo interglacial (Rius et al., 2012; CLIVAR, 2010). Las máximas temperaturas en el Pirineo probablemente ocurrieron a la par que en el resto de Europa entre hace

unos 7000 y 6000 años (Millet et al., 2012).

El progresivo descenso de las precipitaciones durante el Holoceno medio llevó a una transición a condiciones más secas y probablemente más frías entre los 7000 y 5500 años. En los Pirineos hay indicios de que este cambio se produjo antes en las regiones más atlánticas que en la mediterráneas (González-Sampérez et al., 2017; Leunda et al., 2017). En el Pirineo central (Marboré) se han encontrado evidencias de un periodo de avance de los glaciares denominado Neoglacial y que ocurrió entre hace 5100 y 4600 años (García-Ruiz et al., 2016).

1.1.2 Los últimos 2000 años

La variabilidad climática durante los últimos 2000 años ha estado controlada principalmente por las interacciones entre los procesos atmosféricos (NAO, Oscilación del Atlántico Norte y EA, Oscilación del Atlántico Oriental y SCAN, Oscilación de Escandinavia), la insolación y el vulcanismo (Giralt et al., 2017). Estas interacciones pueden explicar además los gradientes regionales y temporales de humedad y temperatura. En los dos últimos milenios han tenido lugar cuatro fases climáticas bien caracterizadas a escala global: el Periodo Cálido y Húmedo Ibero-Romano (desde 250 años antes de nuestra era, CE, hasta el año 500 CE), la Baja Edad Media (o "Edades Oscuras", conocidas por su nombre en inglés, Dark Ages: 500-900 CE), la Anomalía Climática Medieval (ACM ó MCA por sus siglas en inglés, Medieval Climate Anomaly: 900-1300 CE) y la Pequeña Edad de Hielo (PEH ó LIA, del inglés "Little Ice Age": 1300-1850 CE). Tanto la intensidad como la cronología de estas fases, muestra una gran variabilidad en la Península Ibérica (Cisneros et al., 2016; Moreno et al., 2012; Giralt et al., 2017).

Durante el Periodo Ibero-Romano, en los Pirineos se detecta una tendencia al aumento de la temperatura tanto en altitudes altas (Pla y Catalán, 2011), como medias (Morellón et al., 2012). En cuanto a la humedad, en los Pirineos se dan condiciones más áridas que en el sur de la península Ibérica (Morellón et al., 2012). Durante la Baja Edad Media, las temperaturas medias descendieron, aunque las condiciones de humedad mantuvieron una gran variabilidad regional, caracterizadas en general por la mayor aridez en el Mediterráneo (Menorca, Cisneros et al., 2016) y en el Pirineo (Morellón et al., 2012). No obstante, algunos registros pirenaicos sugieren un aumento de las precipitaciones o de los eventos extremos (tormentas) (Corella et al., 2016). La ACM podría servir como un análogo del presente periodo de Calentamiento Global y podría evaluar la variabilidad natural del clima antes del gran impacto humano que está ocurriendo

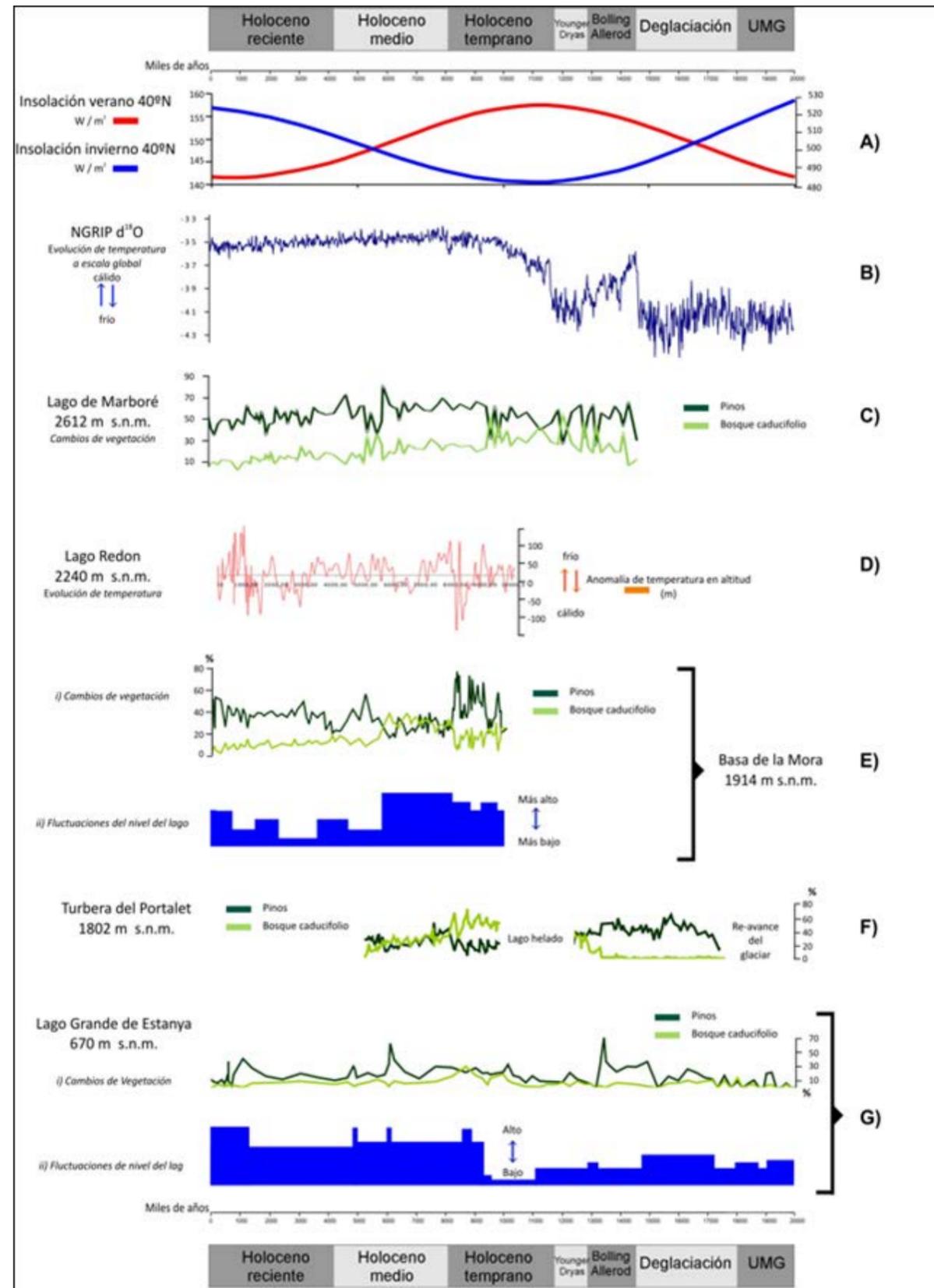


Figura 1.1.1 Registros pirenaicos de variabilidad climática desde el último máximo glacial. Las curvas y escala temporal están organizadas en miles de años, siendo lo más antiguo lo que está a la derecha de la figura y el presente a la izquierda. La barra inicial y final incluye los principales periodos climáticos reconocidos para los últimos 20.000 años y sus límites cronológicos (las siglas UMG corresponden a "último máximo glacial"). Las curvas están ordenadas por altitud y comenzando en la parte superior por las que representan indicadores de escala global (orbital y planetaria). Corresponde, de arriba hacia abajo: A) evolución de la insolación (cantidad de energía que llega a la Tierra desde el Sol), en verano (rojo) e invierno (azul), a 40° latitud Norte; B) evolución de temperatura a escala global reconstruida a partir de isótopos de oxígeno del sondeo de hielo NGRIP de Groenlandia (los valores más negativos implican temperaturas más bajas y corresponden al periodo glacial); C) Cambios de vegetación arbórea dominante basados en la proporción de granos de polen de pino (verde oscuro) y de especies típicas de bosque caducifolio (abetul, avellano, roble, fresno, olmo, tilo, etc., en verde claro) del sondeo del lago de Marboré D) reconstrucción de la anomalía de temperatura de invierno-primavera durante los últimos 10.000 años en cotas altas de los Pirineos centrales a partir del registro de crisofíceas del lago Redón; E) Cambios de vegetación arbórea dominante (polen de pinos en verde oscuro y de bosque caducifolio en verde claro) y fluctuaciones del nivel del lago reconstruidos a partir del registro sedimentario de la Basa de la Mora; F) Cambios de vegetación arbórea dominante (polen de pino, verde oscuro y de especies típicas de bosque caducifolio, verde claro) de la turbera de El Portalet y G) Cambios de vegetación arbórea dominante (polen de pinos en verde oscuro y de bosque caducifolio en verde claro) y fluctuaciones del nivel del lago reconstruidos a partir del registro sedimentario del Lago Grande de Estanya. Todas las referencias detalladas de cada una de estas secuencias y los indicadores incluidos pueden encontrarse en González-Sampéiz et al., (2017).

durante el Antropoceno. Este periodo muestra, en la zona mediterránea de la Península Ibérica, un acentuado carácter árido y cálido (Moreno *et al.*, 2012). Hacia el norte, las condiciones fueron secas (Morellón *et al.*, 2012), aunque en algunos lugares de alta montaña como los Pirineos, se han documentado fases húmedas (Pla y Catalán, 2011), además de una mayor frecuencia de tormentas incluso en altitudes medias (Corella *et al.*, 2016).

La PEH (1300 – 1850 CE) fue un periodo más frío que comenzó acompañado por un aumento en la frecuencia de tormentas (Corella *et al.*, 2016) y está caracterizado por fases más húmedas alternadas con otras de intensa sequía, mostrando una gran variabilidad en las zonas de montañas de la Península (Morellón *et al.*, 2012; Oliva *et al.*, 2017). Las fases más frías (1645-1706, 1796-1830 y 1810-1838 CE) coinciden con algunos periodos de reducción de manchas solares (menor radiación solar). Por otro lado también tuvieron lugar periodos más cálidos, ocurridos entre 1626-1637, 1800-1809 y 1845-1859 CE. Algunos registros sugieren que el periodo más húmedo, al menos en altitudes medias, fue durante el siglo XIX (Morellón *et al.*, 2012). Las reconstrucciones basadas en anillos de árboles (dendroclimatológica) muestran que el siglo XVIII se caracterizó por una alta frecuencia de eventos extremos, que disminuyó durante el siglo XIX (Oliva *et al.*, 2018). En este momento, con un descenso de la temperatura media de casi 1°C, los glaciares pirenaicos avanzaron en ambas vertientes (López-Moreno, 2000).

1.2 UN CALENTAMIENTO GLOBAL RECIENTE INUSUAL

La variabilidad climática durante el Cuaternario ha esculpido el territorio pirenaico y controlado la evolución de sus ecosistemas. Durante la deglaciación, los cambios en temperatura media fueron de hasta 6°C, con periodos de cambio climático rápido de más de 1°C en unas pocas décadas (Informe CLIVAR, 2010).

Durante el Holoceno, los cambios de las temperaturas fueron menores, pero se ha registrado la alternancia de numerosas fases húmedas/secas. En el último milenio, se produjo una fase particularmente seca y cálida (ACM, 900 -1300 CE) seguida de la PEH, última fase fría (1300- 1850 CE) antes del calentamiento global que estamos viviendo en nuestros días. La tasa de aumento de temperatura durante el calentamiento global del siglo XX es superior a la de las transiciones glacial/interglacial y a los cambios vividos durante el Holoceno.

1.2 El clima actual

La disponibilidad actual de información meteorológica instrumental permite una mayor aproximación al conocimiento del clima de los Pirineos y a la evaluación del impacto del cambio climático. No obstante, el estudio es complejo en áreas montañosas, pues la topografía genera una gran diversidad de ambientes locales, en los que el valor de las variables climáticas es difícil de determinar. A ello se une la falta de datos con series largas y la disminución del número de observatorios con la altitud, siendo muy pocas las estaciones localizadas en cotas elevadas. Por esta razón, la comprensión de lo que ocurre por encima de un determinado umbral resulta muy complicada, pese a la importancia de la información climática en alta montaña tanto desde un punto de vista científico como aplicado, ya que algunas de las actividades humanas y numerosos procesos ecológicos se concentran en estas zonas.

En la vertiente francesa el interés por la observación meteorológica se manifiesta desde finales del siglo XVIII con el registro de mediciones en Mont-Louis, a 1600 m de altitud; más tarde con la creación del Observatorio du Pic du Midi, el año 1880, a 2880 m; y posteriormente con nuevos observatorios a lo largo del siglo XX. Pero hasta el desarrollo de las redes automatizadas, en la década de 1990, las mediciones son irregulares y escasas por encima de los 1500 m. En el lado español la situación es muy similar. El establecimiento reciente de estaciones automáticas y de una red climatológica apoyada en las observaciones de refugios de montaña constituyen una valiosa base de datos para el estudio de la evolución de los cambios climáticos, pero la longitud temporal reduce el alcance del diagnóstico. Para minimizar este problema, se requiere disponer de más observatorios, impulsar actuaciones de rescate de datos y asegurar la pervivencia de las observaciones ya existentes, así como de su buena calidad. En este sentido, es destacable el ejemplo de la cordillera de los Alpes, donde a partir del proyecto HISTALP se trabaja desde hace años en la recuperación de series climatológicas (Böhm *et al.*, 2009).

A pesar de estas limitaciones, existen numerosos estudios del clima de los Pirineos, en particular sobre las precipitaciones y temperaturas (entre otros, los trabajos de Balseinte, 1966; Creus, 1983; Gottardi, 2009; Pérez Zanón *et al.*, 2017), también de la nieve (Esteban *et al.*, 2005; López Moreno, 2005 y 2009; Durand *et al.*, 2012), el clima y las actividades de ocio (Pons *et al.*, 2012 y 2015; Gilaberte *et al.*, 2014), la variabilidad y el cambio climático (Bücher y Dessens, 1991; Vicente Serrano *et al.*, 2007; López Moreno y Vicente Serrano, 2007; Espejo *et al.*, 2008; López

Moreno *et al.*, 2011; Esteban *et al.*, 2012; Buisán *et al.*, 2015) y las proyecciones climáticas (López Moreno *et al.*, 2011; Verfaillie *et al.*, 2017 y 2018). Sin embargo, la mayoría de los trabajos presenta conclusiones limitadas por su aproximación únicamente regional, francesa, andorrana o española; es decir, considerando tan solo una vertiente de los Pirineos, lo cual no permite la comprensión global de los procesos climáticos a escala del conjunto de la cordillera. Las acciones desarrolladas por el Observatorio Pirenaico han permitido superar estas limitaciones, además de optimizar la utilización de las fuentes de información y consolidar una mayor aproximación interdisciplinar. Un paso fundamental ha sido la creación de una primera base de datos única, con control de calidad y homogeneizada, del periodo 1950-2010, y utilizar una metodología común para caracterizar el clima pirenaico y observar su variabilidad. Con esta información, generada en el marco del OPCC, se están realizando las primeras aproximaciones al conocimiento de los patrones temporales y espaciales de las temperaturas y precipitaciones del conjunto de los Pirineos, y el análisis de sus tendencias (Soubeyroux *et al.*, 2011; Miquel, 2012; Cuadrat *et al.*, 2013; Deaux *et al.*, 2014).

1.2.1 Evolución de la temperatura media anual y estacional

Tanto los estudios regionales sobre Andorra, España y Francia, como los generales del conjunto de la cordillera, indican un claro aumento de las temperaturas en cualquier momento del año (Spagnoli *et al.*, 2002; Maris *et al.*, 2009; López Moreno *et al.*, 2010; El-Kenawy *et al.*, 2011; Esteban *et al.*, 2012); además, este ascenso ha sido regular y cada vez más marcado en las últimas tres décadas, en consonancia con el diagnóstico global que realiza el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2013).

En Andorra, la estimación de la tendencia realizada a partir de la información de tres observatorios indica, para el periodo 1935-2008, el aumento significativo de la temperatura máxima media anual (0,13 a 0,15 °C / década), la máxima estival (0,22 °C / década) y la mínima estival (0,11 °C / década). Dichas tendencias al incremento térmico se refuerzan cuando el análisis se centra en el subperiodo 1950-2008 (Esteban *et al.*, 2012). En el Pirineo central español Pérez Zanón *et al.* (2017) han encontrado anomalías regionales de 0,11 °C / década para las temperaturas máximas y de 0,06 °C / década para las mínimas para el periodo 1910-2013, que aumentarían hasta 0,57 y 0,23 °C / década en el periodo 1970-2013 respectivamente. Estos valores son en parte coincidentes con los observados en la vertiente francesa: Deaux *et al.* (2014), para la serie

de Tarbes-Ossun, indican un calentamiento de las temperaturas medias de 0,25 a 0,36 °C / década, con un rango de incertidumbre de 0,15 a 0,48 °C / década, según el periodo de tiempo considerado; e indican también que la señal de aumento es especialmente fuerte desde la década de 1980, al igual que ocurre en otros observatorios pirenaicos.

Cuando el análisis se realiza para el conjunto de los Pirineos, el resultado es idéntico: en las últimas décadas la temperatura ha experimentado un claro aumento. Esta es la conclusión de la investigación desarrollada en la acción Clima del proyecto OPCC-POCTEFA EFA 235/11, a partir del estudio de 32 series de temperaturas de alta calidad y homogeneizadas para el periodo 1959-2010. La tendencia del indicador de temperatura media anual para el global del periodo analizado es positiva y estadísticamente significativa, siendo su valor del orden de 0,2 °C por década. Este aumento térmico es general en toda la cordillera, con anomalías sistemáticamente positivas desde 1980 hasta la actualidad, y con pocas diferencias entre la vertiente norte y la vertiente sur de la misma.

De toda la serie considerada, 1959-2010, el año más cálido fue 1997, con una temperatura media superior en 1,5 °C al valor promedio de 1961-1990, seguido de los años 2006 y 2003. En sentido contrario, 1972 fue el

más frío, siendo 0,8 °C inferior a la media de referencia, seguido de los años 1963 y 1980. El indicador de temperatura media para las cuatro estaciones muestra que el aumento térmico a lo largo de las últimas cinco décadas es muy marcado en verano: del orden de 0,4 °C por década, valor que supera los umbrales estadísticos de significación. En primavera es algo más bajo: del orden de 0,2 °C por década; también estadísticamente significativo. La anomalía estacional en otoño e invierno es bastante menor y, además, la tendencia no es estadísticamente significativa en estas dos estaciones, de modo que su valor está sujeto a un mayor grado de incertidumbre. A escala estacional también se observan pocas diferencias en este indicador entre la vertiente norte y la vertiente sur de los Pirineos.

Del análisis de eventos concretos se observa que entre las anomalías cálidas (positivas) destaca especialmente la temperatura media del verano de 2003, con valores 3,6 °C por encima de la media de 1961-1990 (en el contexto de una notable ola de calor que afectó a buena parte del continente europeo) y la del invierno de 1990, con 2,8 °C por encima de la media. En sentido contrario, las anomalías frías (negativas) más importantes son la del invierno de 1963, que se situó -2,5 °C por debajo de la media, y la del otoño de 1974, con una anomalía de -2,2 °C.

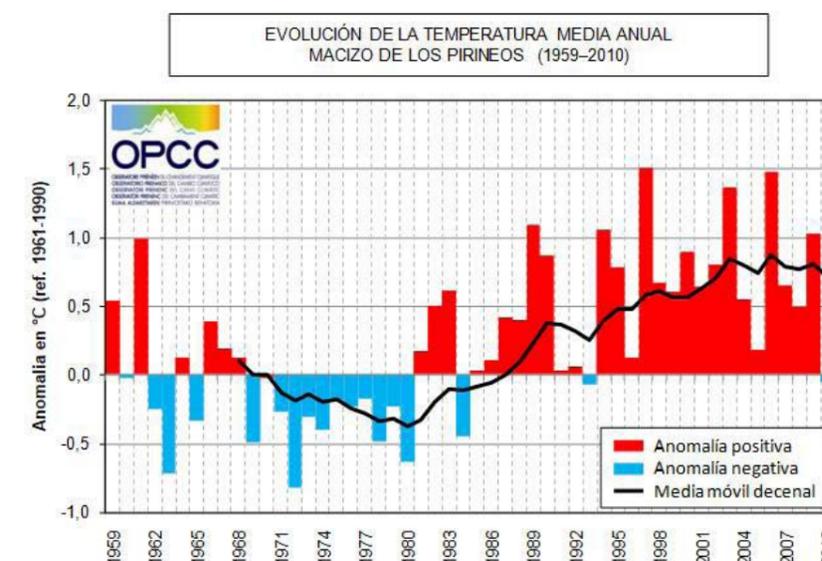


Figura 1.2.1 Evolución de la temperatura media anual en el conjunto de los Pirineos durante el periodo 1959-2010. Se muestra la anomalía anual respecto al valor medio del periodo de referencia 1961-1990 (en rojo, positiva; en azul, negativa) y la evolución de la media móvil para un periodo de 10 años (línea negra). Fuente: OPCC, 2013

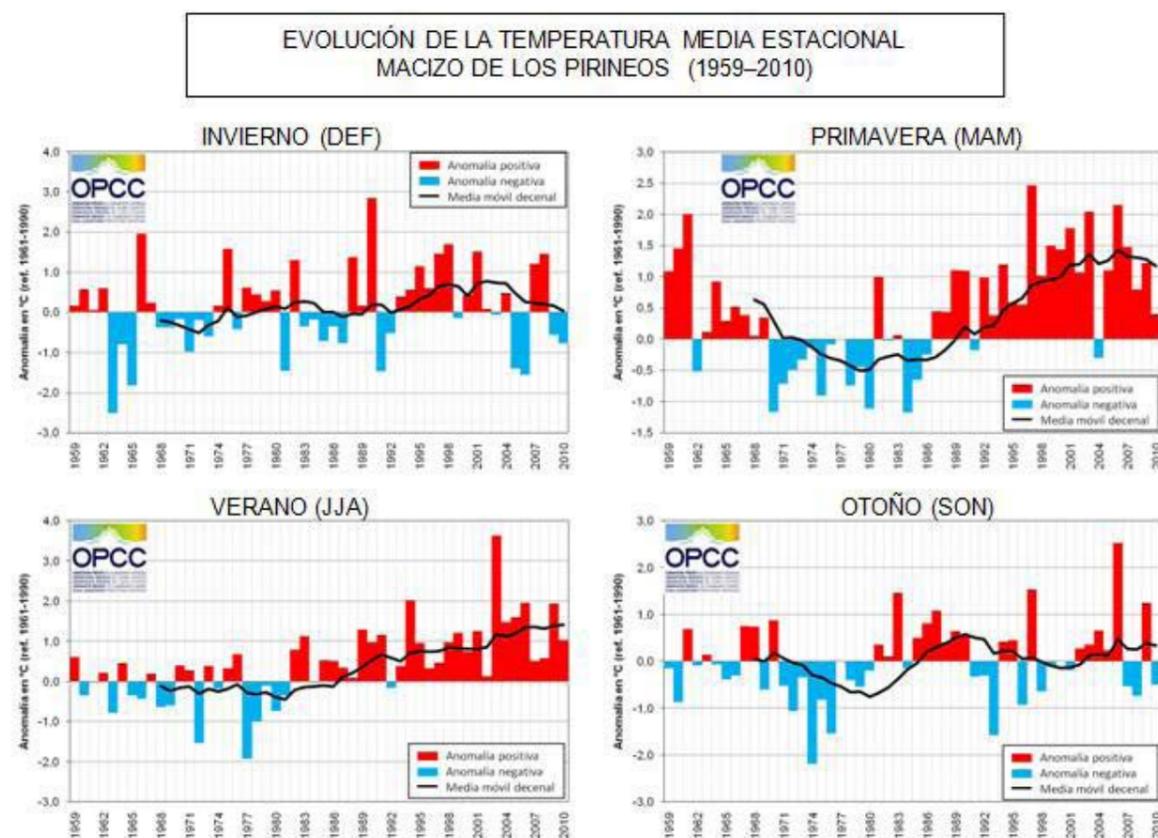


Figura 1.2.2 Evolución de la temperatura media estacional en el conjunto de los Pirineos durante el periodo 1959-2010. Se muestra la anomalía estacional respecto al valor medio del periodo de referencia 1961-1990 (en rojo, positiva; en azul, negativa) y la evolución de la media móvil para un periodo de 10 años (línea negra). Fuente: OPCC, 2013

La tendencia al calentamiento parece que se mantendrá a lo largo del siglo XXI y a escala temporal anual podría oscilar entre los 2,8 y 4 °C, según los peores escenarios; además, los efectos del cambio climático serán más pronunciados en la vertiente meridional de la cordillera y en las zonas costeras (López Moreno *et al.*, 2008). No obstante, hay que reconocer que nuestra capacidad para estimar con la precisión adecuada los posibles cambios futuros es muy limitada.

1.2.2 Evolución de la precipitación anual y estacional

Los patrones temporales y espaciales de la precipitación muestran una cierta tendencia a la disminución de los totales pluviométricos, y en particular al descenso en la frecuencia de los eventos de mayor intensidad y la mayor frecuencia de rachas secas de larga duración. Sin embargo, la elevada

diversidad espacial de la región pirenaica obliga a tomar estos patrones de cambio con reservas, ya que la modificación que introduce el relieve en la circulación atmosférica puede resultar muy relevante.

Así parece observarse en Andorra, donde Esteban *et al.* (2012) confirman tendencias decrecientes y estadísticamente significativas para el periodo 1935-2008, e incluso se generaliza y refuerza entre 1950-2008. En cambio, en los índices de precipitación no se detecta ninguno con tendencia significativa para el periodo 1935-2008, mientras que varios de ellos sí que presentan valores decrecientes con significación estadística para el sub-periodo 1950-2008. En el sector central de los Pirineos españoles Pérez Zanón *et al.* (2016) observan una importante variabilidad interanual, sin tendencia significativa, con alguna diferencia entre el comportamiento estacional. El porcentaje de años con precipitaciones anuales normales disminuye

en el período 1950-2013 respecto al período 1910-1949, aumentando al mismo tiempo los años secos y húmedos. El descenso mayor se observa en invierno, en torno a 2.25% por década, lo que coincide con las investigaciones de López Moreno *et al.* (2005), quien identificó una disminución notable de la capa de nieve para el período 1950-1999. En cambio, se detecta un aumento en otoño de 2.25 % por década.

La disminución de las lluvias se observa igualmente en los Pirineos españoles a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, tanto en el volumen total como en el número de días de precipitación, rachas secas y precipitaciones extremas: en el sector central se comprueba que la disminución es mayor en primavera y verano; en otoño son escasos los observatorios que muestran tendencias significativas, y en invierno se constata un evidente descenso, aunque con marcados contrastes espaciales (Vicente Serrano *et al.*, 2007). En el Pirineo y Prepirineo oriental parece también evidente el descenso de la precipitación anual desde 1950, con una tendencia estadísticamente significativa entre el 3 y 5 % por decenio; y de hasta el 8% por decenio en verano (BAIC, 2018).

Estos análisis son en buena parte coincidentes con los resultados del estudio de la acción Clima del OPCC, para el conjunto los Pirineos, con los datos de 101 series, para el periodo 1959-2010. En los últimos 50 años el descenso de la pluviometría anual es del orden del 2,5% por década. El valor es estadísticamente significativo, pero presenta gran variabilidad interanual: durante las últimas dos o tres décadas han predominado los años secos, con cantidades anuales de precipitación bastante inferiores a la media del período de referencia, seguidos de varios años lluviosos, que destacan sobre el dato promedio. En cuanto a diferencias espaciales, la disminución de la precipitación anual es mayor en la vertiente sur que en la vertiente norte, aunque los contrastes no son importantes. Años particularmente lluviosos de la serie analizada fueron 1992 (con una media 23.2% superior a la del periodo de referencia 1961-1990), así como los años 1979 y 1996; mientras que los años más secos de las últimas cinco décadas son 1989 (un 23.1% inferior a la media de referencia), 1985 y 1983. El indicador para las cuatro estaciones del año no tiene un comportamiento claro, aunque en todas ellas se observa una ligera disminución, algo más marcada en invierno y verano. Conviene destacar que las tendencias estacionales no son estadísticamente significativas, de manera que a esta escala temporal no se pueden deducir conclusiones muy sólidas. Una gran variabilidad interanual se observa en todas las estaciones del año, intercalando periodos secos con estaciones lluviosas; si bien durante las dos últimas décadas predominan las rachas de periodos secos,

como fueron los inviernos de los periodos 1989-1993 y 2005-2008. No obstante, y con la prudencia necesaria para la interpretación de los resultados, este patrón general de descenso pluviométrico se puede poner en relación con comportamientos similares observados en otras regiones del área mediterránea.

Esta tendencia parece que va a continuar en los próximos años según reflejan los modelos de cambio climático. Las predicciones para los Pirineos muestran un acusado descenso de las precipitaciones a lo largo del siglo XXI, con un descenso en la frecuencia de días lluvioso, un aumento de la intensidad de los fenómenos más extremos y un notable aumento en la duración de las rachas secas (Vicente Serrano *et al.*, 2007). No obstante, hay que tener en cuenta que la resolución espacial de los actuales modelos no permite representar toda la diversidad climática que caracteriza a los Pirineos como consecuencia de su diversidad topográfica, sus importantes gradientes altitudinales y su interacción con la circulación atmosférica, por lo que los resultados de dichas predicciones para áreas de montaña tan complejas debe tomarse con reservas.

1.2.3 Evolución del manto de nieve en los Pirineos

Las limitaciones mencionadas en cuanto a la información climática disponible en zonas de alta montaña se hacen aún más patentes cuando nos referimos a la existencia de registros con longitud y calidad suficiente para analizar la evolución del manto de nieve en los Pirineos durante las últimas décadas. Este hecho explica la ausencia de una valoración de las tendencias del manto de nieve para el conjunto de la cordillera. Hasta la fecha, la única información disponible se basa en unas series sintéticas generadas a partir de una relación estadística robusta entre los datos de espesor de nieve en una red de balizas donde se mide el manto en la vertiente sur del Pirineo central y las series climáticas de la zona. De ellas se pudo inferir un descenso estadísticamente significativo del manto de nieve en este sector para el periodo 1950-2000 (López-Moreno, 2005). Dicho descenso se confirmó para el periodo 1950-2010 (figura 1.2.5) en un estudio posterior (García-Ruiz *et al.*, 2011), siendo este descenso también corroborado por una pérdida significativa de la señal nival en el régimen de los ríos de la vertiente sur del Pirineo (Morán-Tejeda *et al.*, 2013, Sanmiguel-Valladolid, 2017). La disminución de la precipitación en los meses invernales parece la causa principal de la reducción del manto de nieve. Sin embargo, estas tendencias aparecen superpuestas a una elevada variabilidad interanual, que se explica por las fuertes oscilaciones que la temperatura y la precipitación

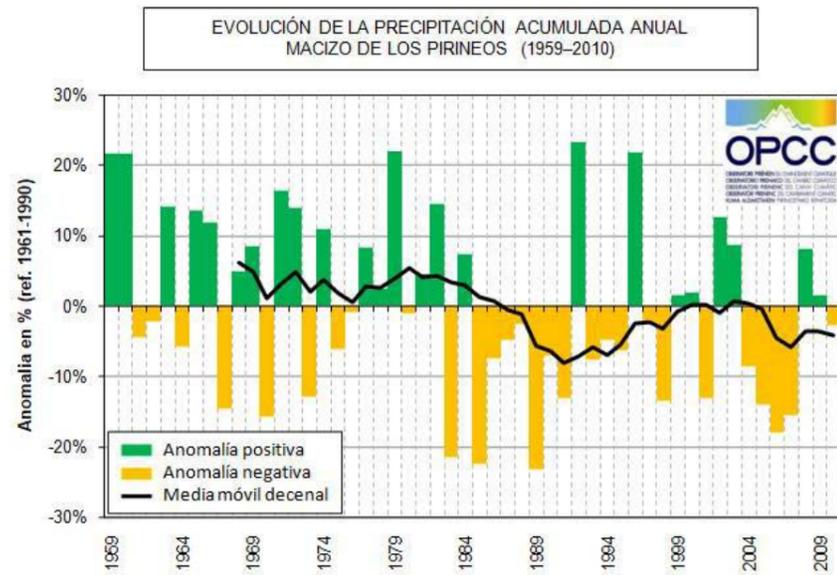


Figura 1.2.3. Evolución de la precipitación anual en el conjunto de los Pirineos durante el período 1959-2010. Se muestra la anomalía anual respecto al valor medio del período de referencia 1961-1990 (en verde si es positiva, en amarillo si es negativa) y la evolución de la media móvil para un período de 10 años (línea negra). Fuente: OPCC, 2013

EVOLUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ACUMULADA ESTACIONAL MACIZO DE LOS PIRINEOS (1959-2010)

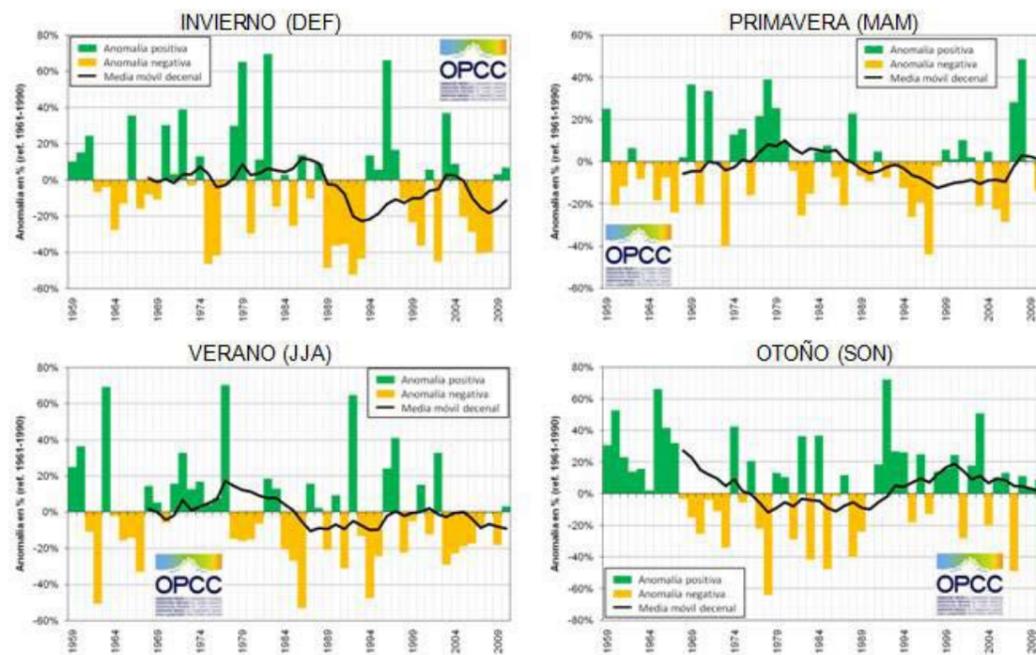
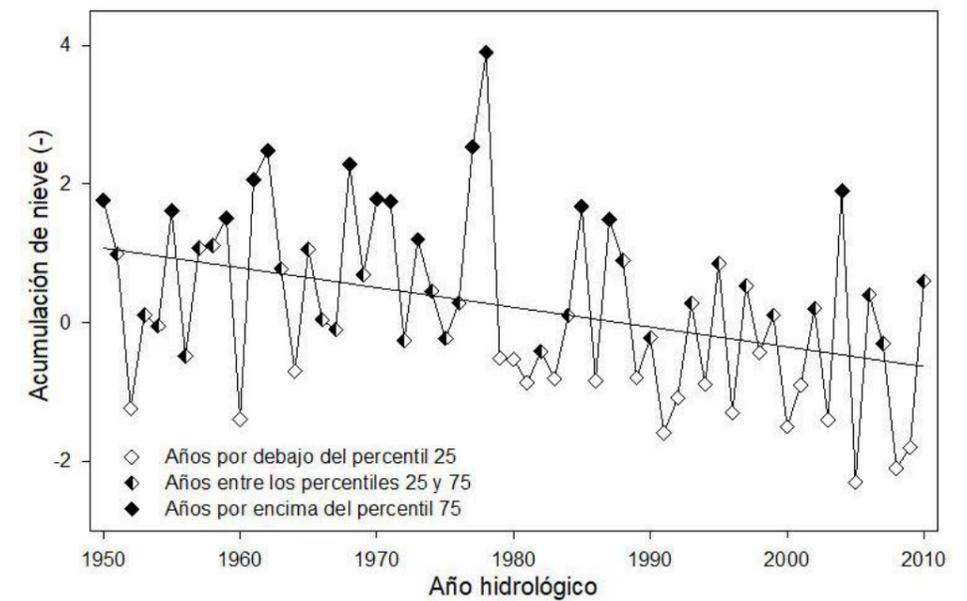


Figura 1.2.4. Evolución de la precipitación estacional en el conjunto de los Pirineos durante el período 1959-2010. Se muestra la anomalía estacional respecto al valor medio del período de referencia 1961-1990 (en verde si es positiva, en amarillo si es negativa) y la evolución de la media móvil para un período de 10 años (línea negra). OPCC, 2013

muestran en el tiempo. Dicha variabilidad se interpreta fundamentalmente por la frecuencia anual de los distintos tipos de tiempo en el sudoeste europeo durante los meses de invierno, controlados en gran medida por la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, López-Moreno *et al.*, 2011). Así, una mayor abundancia de nieve en la vertiente sur del Pirineo central ha sido asociada con una mayor frecuencia de flujos del oeste, suroeste y noroeste que se produce fundamentalmente con años en el que el índice NAO es negativo (López-Moreno y Vicente-Serrano, 2006, Buisán *et al.*, 2015). Si bien el índice NAO ha mostrado una tendencia positiva en el largo plazo, tiene una marcada variabilidad decadal (Vicente-Serrano y López-Moreno, 2008), lo cual explica que en las últimas décadas hayan sido frecuentes importantes anomalías negativas, trayendo a la cordillera pirenaica una importante innivación, especialmente en cotas altas. De hecho, cuando se analizan series de nieve de las últimas dos décadas, la mayor parte de los observatorios no muestran tendencia estadísticamente significativa, e incluso una leve tendencia al incremento (Buisán *et al.*, 2015). A pesar de que no se dispone de estudios específicos para la vertiente francesa, la existencia de tendencias comunes en la precipitación y la temperatura en las dos vertientes sugieren que en ella también se ha producido un descenso en la acumulación de nieve si se considera el largo plazo, pero con una señal muy variable durante las últimas dos décadas.

IDEAS CLAVE

- En el conjunto de los Pirineos la temperatura media anual ha mostrado un claro incremento, calculado en torno a 0,2 °C por década, con pocas diferencias entre ambas vertientes de la cordillera.
- El aumento es muy claro a partir de los años ochenta, siendo la última década la más cálida desde que existen registros instrumentales.
- A escala estacional, el ascenso más significativo se ha dado en verano, del orden de 0,4 °C por década; ha sido algo menor en primavera, cercano a 0,2 °C; con incrementos más moderados en otoño e invierno.
- Se observa una tendencia de disminución de los volúmenes anuales de las precipitaciones, debido al descenso detectado de los totales de invierno y verano, aunque no hay una tendencia bien definida. Existen diferencias espaciales significativas y la variabilidad interanual adquiere magnitudes similares e incluso superiores en ocasiones a las observadas en las fases más álgidas de la Pequeña Edad del Hielo.
- En gran medida, estos resultados son coincidentes con los observados en regiones vecinas y con la tendencia general del clima en la Europa mediterránea.



Evolución del manto de nieve (en metros) en el mes de abril, entre 1959 y 2010, simulado a partir de la relación entre temperatura y precipitación invernal y la acumulación de nieve en una baliza del Canal de Izas, Valle de Aragón. Fuente: Proyecto OPCC, 2013.

1.3 Proyecciones de cambio climático en los Pirineos

El estudio del sistema climático y de su evolución futura se realiza normalmente a través del uso de modelos climáticos. Estos modelos son representaciones numéricas del sistema climático basadas en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de realimentación. Cuando estos modelos abarcan todo el sistema se habla de modelos climáticos globales. Sin embargo, estos modelos no tienen actualmente la resolución necesaria para determinados estudios siendo conveniente la utilización de métodos de regionalización. Estos métodos se suelen agrupar en dos grandes grupos: los métodos dinámicos y los métodos estadísticos. Entre los primeros se encuentran los modelos regionales, los cuales son modelos climáticos pero aplicados a una región determinada.

Entre las causas que pueden inducir un cambio en el clima se encuentran la alteración de la composición de la atmósfera global, existiendo evidencias de que se está produciendo debido a la actividad humana. Para incorporar los posibles efectos de estas alteraciones en los modelos climáticos la comunidad científica ha definido un grupo de escenarios denominados Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways, RCP). Estos escenarios se centran en las emisiones antropogénicas, y representan el forzamiento radiativo total calculado para el año 2100 respecto al año 1750 (por ejemplo, el RCP 2.6 significa 2,6 W/m²). Se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos simples, modelos de química de la atmósfera y modelos de ciclo de carbono; y además, pueden contemplar variedad de políticas climáticas, es decir, cada RCP puede ser resultado de diferentes combinaciones de futuros económicos, tecnológicos, demográficos y políticos. Las simulaciones que se obtienen bajo estos escenarios constituyen las denominadas proyecciones climáticas (IPCC, 2013). En la región pirenaica las proyecciones se están realizando siguiendo dos metodologías complementarias que se apoyan en algoritmos dinámicos y estadísticos, y en la generación de análisis de referencia de las temperaturas y la precipitación diarias con una alta resolución horizontal (rejilla de 5km) (Peral *et al.*, 2017) y vertical (reanálisis SAFRAN por alturas de 300 m) (Verfaillie *et al.*, 2017). Las proyecciones se han obtenido a partir de las salidas de un conjunto de modelos climáticos globales (GCM) del CMIP5 (19 modelos), y de combinaciones con modelos climáticos regionales

(RCM) de Euro-Cordex (13 combinaciones GCM/RCM), considerando cuatro escenarios de emisiones (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5). Este conjunto de proyecciones permite realizar una exploración de las incertidumbres asociadas a los escenarios de emisiones, modelos climáticos y técnicas de regionalización. A partir de una evaluación preliminar de estas proyecciones, una primera aproximación probabilística de predicción de clima futuro ofrece estos resultados:

- Las temperaturas máximas y mínimas diarias aumentarán a lo largo del siglo XXI bajo las tres RCP analizadas (RCP8.5, RCP6.0 y RCP4.5) (figura 1.3.1 a-b), en todas las estaciones del año y en toda la zona pirenaica. Este aumento será más rápido para la RCP8.5, asociada a escenarios más emisivos a lo largo de este siglo.
- Las incertidumbres asociadas a las RCP y a los modelos climáticos globales para las temperaturas van aumentando a lo largo del siglo, apreciándose tanto una separación entre las líneas de evolución (entre RCP) como en el incremento de las zonas sombreadas (entre modelos climáticos globales).
- En cuanto a la evolución de las precipitaciones futuras, bajo los escenarios analizados y metodología empleada, no se obtienen cambios significativos a lo largo del siglo XXI, apreciándose poca influencia de éstos sobre su evolución (figura 1.3.1c). El número de modelos que indican aumentos en las precipitaciones medias es similar al número de modelos que muestran descenso de las mismas. Las incertidumbres van aumentando a lo largo del siglo, sobre todo en el caso de la RCP 8.5.

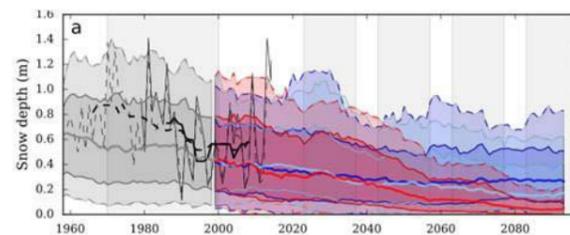


Figura 1.3.2 Evolución de la distribución estadística del espesor medio de nieve en el Pirineo Central (alt 1800m) a partir de las simulaciones hacia el pasado (gris) y del reanálisis Safran (línea gris), para el futuro del ensemble Euro-Cordex con los RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (rosa) y RCP 8.5 (rojo). Fuente: Météo-France

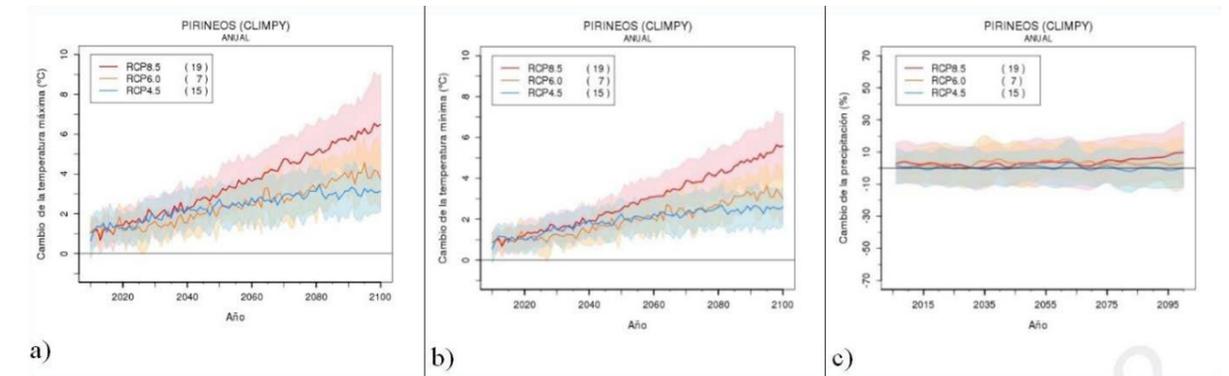


Figura 1.3.1 Evolución de la anomalía media anual de (a) temperatura máxima, (b) temperatura mínima y (c) precipitación promediadas para la región Pirenaica

Tomando ventanas de 15 años centradas en 2030, 2050 y 2090 y estimando la incertidumbre ligada a los modelos a través de los percentiles 17 y 83 se obtiene:

- Para el horizonte 2030, el cambio del valor medio anual de las temperaturas máximas respecto al periodo de referencia (1961-1990) podría estar, en promedio y para la zona pirenaica, entre 1 °C y 2.7 °C para la RCP8.5 (valores muy similares se obtienen para las otras RCP). Aumentos parecidos o ligeramente más bajos se obtienen para las temperaturas mínimas (entre 0.9 °C y 2.2 °C para la RCP8.5).
- Para el horizonte 2050, el calentamiento sería algo mayor, con un desplazamiento de las horquillas de valores hacia valores más altos a la vez que éstas tienden a ampliarse ligeramente. Así, para la temperatura máxima, las horquillas irían de 2.0 °C a 4.0 °C y de 1.4 °C a 3.3 °C para las RCP8.5 y RCP4.5 respectivamente, mientras que, para la temperatura mínima, serían de 1.7 °C a 3.3 °C; y de 1.2 °C a 2.8°C. El aumento de la temperatura mínima continúa siendo ligeramente menor que el de la temperatura máxima.
- Para finales de siglo, los rangos de valores se amplían más, así como la magnitud de los cambios, y la separación entre las evoluciones asociadas a las RCP es más clara. Para la temperatura máxima y para la RCP8.5, en promedio, su cambio anual estaría entre 4.3 °C y 7.1 °C, mientras que para la RCP4.5, oscilaría entre 1.9 °C y 4.2 °C. Para la temperatura mínima, los intervalos correspondientes se situarían entre 3.6 °C y 6.0 °C, en el primer caso, y 1.6 °C y 3.5 °C, en el segundo.

IDEAS CLAVE

- Las proyecciones futuras del clima en la zona pirenaica muestran un aumento progresivo tanto de las temperaturas máximas como de las temperaturas mínimas a lo largo del siglo XXI. Este aumento será más rápido en los escenarios más emisivos.
- Este calentamiento también incidirá en una disminución tanto del espesor de la nieve como en la longitud del periodo en que la nieve cubre el suelo.
- Para el caso de la precipitación, el acuerdo entre las proyecciones es menor que para la temperatura y no puede apreciarse cambios significativos.

Las proyecciones del cambio climático para la nieve se pueden realizar a partir de estos escenarios climáticos y permiten caracterizar su evolución futura respecto al clima actual (Verfaillie *et al.*, 2018). Los primeros resultados para los Pirineos indican un descenso significativo del espesor de nieve a pesar del mantenimiento de la fuerte variabilidad interanual. Así, en el Pirineo Central, a la altura de 1800 m (Figura 1.3.2), el espesor medio de nieve podría disminuir a la mitad en el horizonte del 2050 según la referencia actual, mientras que el periodo de permanencia de la nieve en el suelo se reduciría en más de un mes, compartido entre el otoño y la primavera lo largo de la estación fría.

Bibliografía

1 Clima y Variabilidad Climática en los Pirineos

1.1 El clima del periodo glacial y la deglaciación

- Bartolomé, M., Moreno, A., Sancho, C., Stoll, H.M., Cacho, I., Spötl, C., Belmonte, A., Edwards, R.L., Cheng, H., Hellstrom, J.C., 2015. Hydrological change in Southern Europe responding to increasing North Atlantic overturning during Greenland Stadial 1. PNAS. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1503990112>.
- Cisneros, M., Cacho, I., Frigola, J., Canals, M., Masqué, P., Martrat, B., Casado, M., Grimalt, J.O., Pena, L.D., Margaritelli, G., Lirer, F., 2016. Sea surface temperature variability in the central-western Mediterranean Sea during the last 2700 years: a multi-proxy and multi-record approach. *Clim. Past* 12, 849–869.
- CLIVAR Report: Pérez, F.; Boscolo, Roberta (eds.). 2010. Climate in Spain: past, present and future. Regional climate change assessment report. [Madrid] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), 83 pp.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente-Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. *Scientific Reports* 6. 38206; doi: 10.1038/srep38206
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Bourlès, D. 2011. Palaeogeography and 10Be exposure age chronology of Middle and Late Pleistocene glacier systems in the northern Pyrenees: implications for reconstructing regional palaeoclimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 305, 109–122. Doi: 10.1016/j.palaeo.2011.02.025.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Peña-Monné, J.L., Sancho, C., Rhodes, E.J., Valero-Garcés, B., González-Samperiz, P., Moreno, A. 2013. Glacial and fluvial deposits in the Aragón Valley, Central-Western Pyrenees: Chronology of the Pyrenean late Pleistocene glaciers- *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography* 95, 15–32. Doi: 10.1111/j.1468-0459.2012.00478.x.
- Giralt, S., Moreno, A., Cacho, I., Valero-Garcés, B.L. 2017. A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history, CLIVAR Exchanges No. 73, 5–10.
- González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., Moreno, A., Jalut, G., García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Delgado-Huertas, A., Navas, A., Otto, T., Dedoubat, J.J. 2006. Climate variability in the Spanish Pyrenees during the last 30,000 yr revealed by the El Portalet sequence. *Quaternary Research* 66, 38–52. Doi: 10.1016/j.qres.2006.02.004.
- González-Sampériz, P.; Aranbarri, J.; Pérez-Sanz, A.; Gil-Romera, G.; Moreno, A.; Leunda, M.; Sevilla-Callejo, M.; Corella, J.P.; Morellón, M.; Oliva, B.; Valero-Garcés, B. 2017. Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. 2017. *Catena* 149, 668 – 688.
- Leunda, M., González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Aranbarri, J., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Sevilla-Callejo, M., y Valero-Garcés, B. 2017. The Late-Glacial and Holocene Marboré Lake sequence (2612 m a.s.l., Central Pyrenees, Spain): Testing high altitude sites sensitivity to millennial scale vegetation and climate variability *Global and Planetary Change* 157: 214–231
- Lewis, C.J., McDonald, E.V., Sancho, C., Peña, J.L., Rhodes, E.J. 2009. Climatic implications of correlated Upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. *Global and Planetary Change* 61, 300–312. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2009.01.001.
- López Moreno, J.I. (2000). Los glaciares del alto valle del Gállego (Pirineo Central) desde la Pequeña Edad del Hielo. Implicaciones en la evolución de la temperatura. *Geofoma Ediciones, Logroño*, 77 pp.
- Millet L., D. Rius, D. Galop, O. Heiri, S.J. Brooks 2012. Chironomid-based reconstruction of Lateglacial summer temperatures from the Ech palaeolake record (French western Pyrenees). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 315–316: 86–99
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. *Clim. Past* 8, 683–700.
- Moreno, A., Pérez, A., Frigola, J., Nieto-Moreno, V., Rodrigo-Gámiz, M., Martrat, B., González-Sampériz, P., Morellón, M., Martín-Puertas, C., Corella, J.P., Belmonte, Á., Sancho, C., Cacho, I., Herrera, G., Canals, M., Grimalt, J.O., Jiménez-Espejo, F., Martínez-Ruiz, F., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B.L., 2012. The Medieval Climate Anomaly in the Iberian Peninsula reconstructed from marine and lake records. *Quaternary Science Reviews* 43, 16–32.
- Oliva, M., J. Ruiz-Fernández, M. Barriendos, G. Benito, J.M. Cuadrat, F. Domínguez-Castro, J.M. García-Ruiz, S. Giralt, A. Gómez-Ortiz, A. Hernández, O. López-Costas, J.I. López-Moreno, J.A. López-Sáez, A. Martínez-Cortizas, A. Moreno, M. Prohom, M.A. Saz, E. Serrano, E. Tejedor, R. Trigo, B. Valero-Garcés, S.M. Vicente-Serrano. 2018. The Little Ice Age in Iberian mountains. *Earth-Science Reviews* 177 (2018) 175–208.
- Palacios, D., García-Ruiz, J.M., Andrés, N., Schimmelpfennig, I., Campos, N., Leanni, L., ASTER Team 2017. Deglaciation in the

- central Pyrenees during the Pleistocene-Holocene transition: Timing and geomorphological significance. *Quaternary Science Reviews* 162, 111–127. Doi: 10.1016/j.quascirev.2017.03.007.
- Pallàs, R., Rodés, A., Braucher, R., Bourlès, D., Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y. 2010. Small, isolated glacial catchments as priority targets for cosmogenic surface exposure dating of Pleistocene climate fluctuations, southeastern Pyrenees. *Geology* 38, 891–894. Doi: 10.1130/G31164.1.
- Pla, S., Catalan, J., 2011. Deciphering chrysophyte responses to climate seasonality. *J Paleolimnol* 46, 139–150
- Rius, D., Vannière, B. and Galop, D. 2012. Holocene history of fire, vegetation and land use from the central Pyrenees (France). *Quaternary Research* 77: 54–64.

1.2 El clima actual

1.3 Proyecciones de cambio climático en los Pirineos

- Balseinte, R. 1966. Climats montagnards et stations climatiques d'altitude en France. Ministère de l'Éducation Nationale et CNRS. Paris
- Bartolomé, M., Moreno, A., Sancho, C., Stoll, H.M., Cacho, I., Spötl, C., Belmonte, A., Edwards, R.L., Cheng, H., Hellstrom, J.C., 2015. Hydrological change in Southern Europe responding to increasing North Atlantic overturning during Greenland Stadial 1. PNAS. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1503990112>.
- Böhm, R., Auer, I., Schöner, W., Ganekind, M., Gruber, C., Jurkovic, C., Orlik, A. and Ungersböck, M. 2009. Eine neue Webseite mit instrumentellen Qualitäts Klimadaten für den Grossraum Alpen zurück bis 1760. *Wiener Mitteilungen Band 216: Hochwässer: Bmessung, Risikoanalyse und Vorhersage*.
- Bordonau, J.; Serrat, D. y Vilaplana, J.M. (1992): Las fases glaciares cuaternarias en los Pirineos. In: Cearreta, A. y Ugarte, F.M. (eds.): *The Late Quaternary in the Western Pyrenean Region*. Servicio Editorial Universidad del País Vasco, Bilbao, pp. 303–312.
- Brunet, M., Casado M. J., Castro, M., Galán, M. P., López, J. A., Martín, J. M., Torres, L. 2008. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino. 158 pp.
- Brunet, M., Jones, P., Sigró, J., Saladié, O., Aguilar, E., Moberg, A., Della-Marta, P.M., Lister, D., Whalther, A. ans López, D. 2007. Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850–2005. *Journal of Geophysical Research*, 112: D12117.
- Bücher, A. and Dessens J. 1991. Secular trend of surface temperature at an elevated observatory in the Pyrenees. *J. Clim.* 4: 859–868.
- Buisan, S.; Saz, M.A.; López-Moreno, J.I., 2015. Spatial and temporal variability of winter snow and precipitation days in the western and central Spanish Pyrenees. *International Journal of Climatology* 35: 259–274.
- Cisneros, M., Cacho, I., Frigola, J., Canals, M., Masqué, P., Martrat, B., Casado, M., Grimalt, J.O., Pena, L.D., Margaritelli, G., Lirer, F., 2016. Sea surface temperature variability in the central-western Mediterranean Sea during the last 2700 years: a multi-proxy and multi-record approach. *Clim. Past* 12, 849–869. doi:10.5194/cp-12-849-2016
- CLIVAR Report: Pérez, F.; Boscolo, Roberta (eds.). 2010. Climate in Spain: past, present and future. Regional climate change assessment report. [Madrid] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), 83 pp.
- Copons, R., Bordonau, J. 1997: El registro glacial correspondiente a la Pequeña Edad del Hielo en la Península Ibérica. En: Ibañez, J.J., Valero Garcés, B.L. i Machado, C. (Eds.): *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación*. Geofoma ediciones, Logroño, p. 295–310.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente-Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. *Scientific Reports* 6. doi:10.1038/srep38206
- Creus, J. 1983. El clima del alto Aragón occidental. Instituto de Estudios Pirenaicos, 109. 421 pp.
- Cuadrat, J.M., Serrano, R., Saz, M.A., Tejedor, E., Prohom, M., Cunillera, J., Esteban, P., Soubeyroux, J.M., Deaux, N. 2013. Creación de una base de datos homogeneizada de temperaturas para los Pirineos (1950–2010). *Geographicalia*, 64: 63–74.
- Deaux, A.; Soubeyroux, J.M.; Cuadrat, J.M.; Cunillera, J.; Prohom, M. 2014. Homogénéisation transfrontalière des températures sur le massif des Pyrénées. *Rev. Climatologie*, vol 24 pp: 67–78.
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Bourlès, D. 2011. Palaeogeography and 10Be exposure age chronology of Middle and Late Pleistocene glacier systems in the northern Pyrenees: implications for reconstructing regional palaeoclimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 305, 109–122. Doi: 10.1016/j.palaeo.2011.02.025.
- Durand, Y., Giraud, G., Goetz, D., Malou, M. and Payen, V. 2012. Modeled snow cover in Pyrenees mountains and cross-comparisons between remote-sensed and land-based observation data. *Proceedings, 2012 International Snow Science Workshop, Anchorage*.
- El-Kenawy, A., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., 2011. Recent changes in daily temperature extremes in Northeastern Spain: 1960–2006. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11: 1–21.