

# EL CANVI CLIMÀTIC EN L'ALTA MUNTANYA

Una perspectiva internacional amb una mirada als Pirineus

Nerea Bilbao Barrenetxea i Sérgio Henrique Faria

Les altes muntanyes són una de les regions més afectades pel canvi climàtic. La complexa xarxa d'interaccions que existeix en aquestes regions entre les estructures climàtiques, biològiques i socioculturals s'està veient alterada. Mitjançant aquest treball tractem de posar en el punt de mira els reptes a què s'enfronten aquestes regions singulars. Analitzem per què són importants i quina és la seua problemàtica en l'escenari climàtic i polític actual, amb un enfocament especial a la regió dels Pirineus.

Paraules clau: alta muntanya, canvi climàtic, criosfera, escalfament dependent de l'elevació, punts calents de biodiversitat, sistemes d'alerta primerenca.

## ■ INTRODUCCIÓ

Sovint ens imaginem les muntanyes com a paratges remots, salvatges i intactes, com els últims racons del planeta on l'impacte de l'ésser humà encara no hi ha arribat. Però la realitat és una altra: les altes muntanyes estan patint els impactes del canvi climàtic d'una forma particularment intensa. I és que la complexa xarxa d'interaccions que existeix entre els hàbitats d'alta muntanya i les espècies que els habiten s'està veient alterada per diversos factors; entre altres, els efectes del canvi climàtic. En aquest article, tractem de posar en el punt de mira els reptes a què s'enfronten avui dia aquestes regions tan singulars.

### Què són les altes muntanyes?

No és senzill trobar una definició exacta de les altes muntanyes. La raó principal és que la condició perquè siguin considerades «altes» depèn de múltiples factors que no estan exclusivament relacionats amb l'elevació. En la literatura científica es poden trobar una gran varietat de definicions, depenent de l'enfocament i l'objectiu de cadascun

dels estudis. En qualsevol cas, una definició adequada ha d'identificar l'alta muntanya com un relleu i un entorn particular i diferenciat dels elements topogràfics inferiors que l'envolten.

En aquest treball, definim les altes muntanyes com a estructures geològiques on els elements criosfèrics representen un paper protagonista. Entre aquests elements es troben la neu, el permafrost i les glaceres. Així mateix, hi han de concórrer una altra sèrie de característiques addicionals, essencialment el clima extrem i la complexitat del terreny. Un altre element protagonista que no hem d'oblidar és la llunyania espacial i institucional. Aquestes característiques fan que percebem les altes muntanyes com a llocs llunyans i aliens a la nostra vida i al funcionament de les nostres societats. Però res

**«Les altes muntanyes  
estan patint els impactes  
del canvi climàtic d'una manera  
particularment intensa»**

més lluny de la realitat, les altes muntanyes constitueixen la font i el refugi de recursos i béns de què depenem dia a dia. En aquest sentit, la importància d'aquestes regions és indubtable des d'un punt de vista ecològic, social i econòmic (Figura 1).

### COM CITAR AQUEST ARTICLE:

Bilbao Barrenetxea, N., & Faria, S. H. (2021). El canvi climàtic en l'alta muntanya. Una perspectiva internacional amb una mirada als Pirineus. *Metode Science Studies Journal*. <https://doi.org/10.7203/metode.12.20509>

 <p>W. Jisten de Vascancellos / Unsplash</p> <p><b>DIPÒSITS D'AIGUA DEL PLANETA</b></p>	 <p>S. Hemelin / Unsplash</p> <p><b>PUNTS CALENTS DE BIODIVERSITAT</b></p>	 <p>Alphas Tay</p> <p><b>CONeixEMENT TRADICIONAL I ANCESTRAL</b></p>
<p><b>ASPECTES CRIOSFÈRICS</b></p> <p>La presència de glaceres, permafrost i neu és un tret principal de les regions d'alta muntanya. Aquests elements representen a més un paper important en el cicle hidrològic del planeta. Tant és així que contribueixen a l'emmagatzematge estacional i a llarg termini dels recursos hídrics d'aproximadament la meitat de la humanitat. Per aquesta raó, es consideren les «torres d'aigua» del planeta (Viviroli et al., 2007).</p>	<p><b>ASPECTES ECOSISTÈMICS</b></p> <p>A les regions tropicals i subtropicals d'alta muntanya coexisteixen una gran varietat d'ecosistemes diferents en una àrea reduïda, que van des de condicions tropicals fins a polars. Això dona lloc a uns endemismes particulars de les altes muntanyes i és un dels factors responsables de la gran diversitat, encara que no l'únic. Les mateixes dinàmiques geològiques de la creació de la muntanya, en interactuar amb els complexos canvis climàtics, representen una oportunitat inigualable perquè es desenvolupen processos evolutius específics (Rahbek et al., 2019).</p>	<p><b>ASPECTES SOCIALS</b></p> <p>Les estructures socials que alberguen les altes muntanyes també constitueixen un aspecte clau. S'estima que la població que hi vivia l'any 2010 vorejava els 670 milions de persones, la qual cosa representa un 10% de la població mundial. Més enllà de proveir-nos de recursos materials, com ara aigua i aliment, les regions d'alta muntanya representen el refugi d'un patrimoni tradicional i ancestral únic de les comunitats indígenes i tradicionals que les habiten.</p>

Figura 1. Aspectes clau de les regions d'alta muntanya.

## ■ PROBLEMÀTICA

Les condicions geogràfiques i ambientals descrites anteriorment, que fan de les altes muntanyes regions valuoses i úniques, són les mateixes que les converteixen en regions molt vulnerables al canvi climàtic. Els seus relleus abruptes i els seus pendents escarpats amaguen una fragilitat intrínseca. Vulnerabilitat que es relaciona amb una resposta més ràpida i intensa als canvis en comparació amb les regions no muntanyenques (Díaz et al., 2003). Aquesta vulnerabilitat és concebuda per molts experts i expertes com una possible eina d'alerta primerenca. És a dir, els impactes que comencem a albirar en les altes muntanyes avui servirien de presagi de les pitjors conseqüències que podríem patir en un futur no gaire llunyà.

### El canvi climàtic

Les altes muntanyes ja són i continuaran sent algunes de les regions més afectades pel canvi climàtic. Segons es conclou en l'informe SROCC (sigles en anglès d'*In-*

*forme especial sobre els oceans i la criosfera en un clima canviant*; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2019), l'augment de les temperatures de l'aire superficial que prediuen els models climàtics per al segle XXI es pot veure intensificat en les altes muntanyes per les dinàmiques regionals i per l'anomenat *escalfament dependent de l'elevació* (EDW en les seues sigles en anglès). Aquest procés fa referència al fet que la taxa d'escalfament (per exemple, en °C per dècada) no és la mateixa en totes les bandes d'elevació (Pepin et al., 2015). L'increment de temperatura té un impacte directe en la relació pluja/neu en totes les regions d'alta muntanya i, per tant, incidirà en una disminució de les nevades, sobretot en elevacions menors. L'IPCC (2019) qualifica de probable que la capa de neu a altituds menors en regions com els Alps europeus, els Himàlaies i els Andes subtropicals per a finals de segle (2081–2100) es veja reduïda en un 30% en el millor dels escenaris i en un 80% en el pitjor respecte al nostre passat pròxim (1986–2005).

### «L'increment de temperatura incidirà en una disminució de les nevades, sobretot en elevacions menors»

ment de temperatura té un impacte directe en la relació pluja/neu en totes les regions d'alta muntanya i, per tant, incidirà en una disminució de les nevades, sobretot en elevacions menors. L'IPCC (2019) qualifica de probable que la capa de neu a altituds menors en regions com els Alps europeus, els Himàlaies i els Andes subtropicals per a finals de segle (2081–2100) es veja reduïda en un 30% en el millor dels escenaris i en un 80% en el pitjor respecte al nostre passat pròxim (1986–2005).

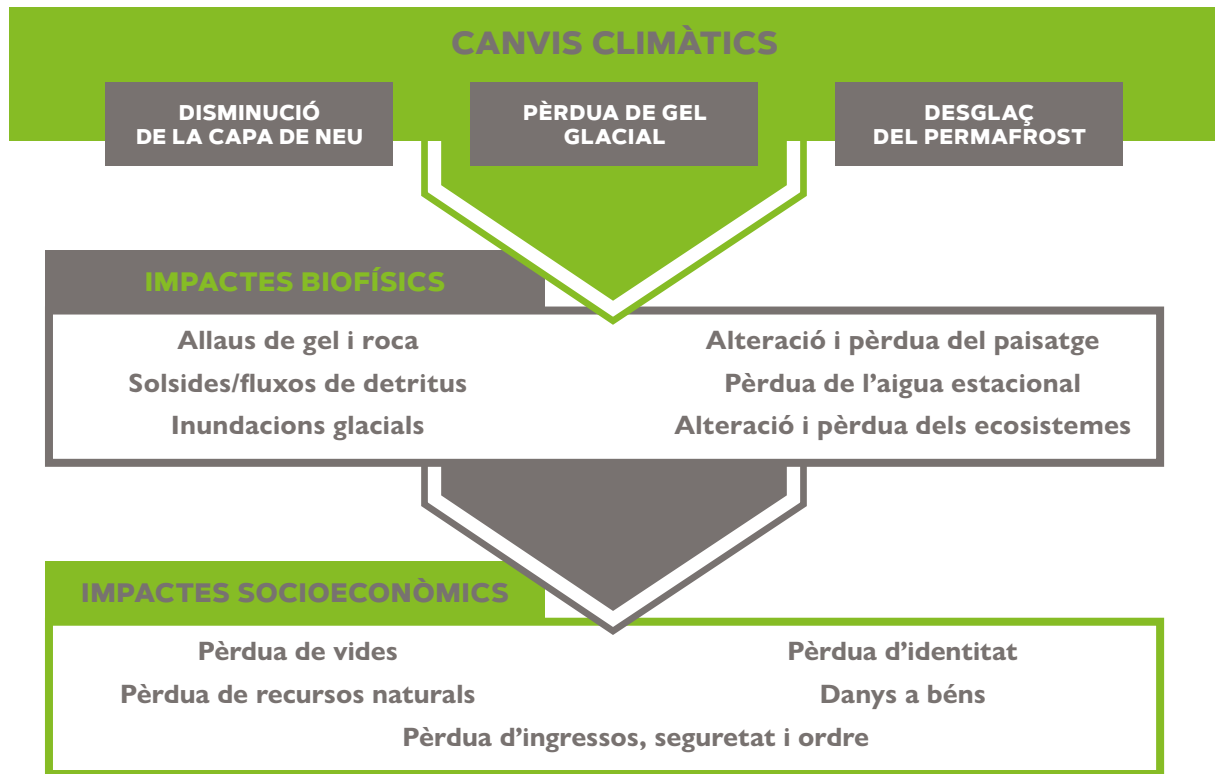


Figura 2. Canvis climàtics en les altes muntanyes i els impactes biofísics i socioeconòmics associats.

FONT: Basat en Huggel et al. (2019)

També les glaceres estan accelerant la seua pèrdua de massa (Hugonnet et al., 2021). I és que, encara que la reducció de massa glacial varia en gran manera entre regions, les projeccions realitzades per al millor i el pitjor escenari (en funció de la concentració de CO<sub>2</sub> en l'atmosfera) indiquen que en el segle XXI les glaceres polars i de muntanya perdran respectivament a escala global un 18 % i un 36 % respecte a l'any 2015 (IPCC, 2019). La comunitat científica afirma que aquesta pèrdua de gel i neu en les altes muntanyes és deguda a l'augment de la temperatura mitjana de la Terra per l'emissió antropogènica constant de gasos d'efecte d'hivernacle des de la revolució industrial.

Trobem diferents exemples d'aquests canvis. És el cas de la serralada Blanca (Andes peruans), on ha desaparegut més del 30 % de la massa glacial en el període de 1930 fins a 2014 (Schauwecker et al., 2014). Un altre exemple il·lustratiu el trobem al Kilimanjaro, on entre els anys 1912 i 2011 s'ha observat una reducció severa del 85 % de l'àrea glacial (Cullen et al., 2013). No obstant això, no cal buscar llocs tan remots per a observar els efectes del canvi climàtic. En regions dominades per glaceres d'una grandària menor, entre les quals es troben els Alps europeus, el Caucas i els Pirineus, entre altres, les glaceres perdran més del 80 % de la seua

massa (IPCC, 2019) per a l'any 2100 en el pitjor dels escenaris definit per l'IPCC (escenari RCP8.5), mentre que moltes de les glaceres d'aquestes serralades desapareixeran totalment en un futur amb l'actual increment de temperatura global.

Aquests canvis en la criosfera provocats pel canvi climàtic generen uns impactes biofísics, com la pèrdua d'aigua estacionària, que afecten directament els ecosistemes i provoquen impactes socioeconòmics sobre els habitants d'aquestes regions (Figura 2). Els impactes biofísics es materialitzen en una gran varietat de formes: des d'allaus de gel i roca fins a la desaparició d'espècies. Un dels fenòmens més perillosos és l'anomenat GLOF (*glacier lake outburst flood*), que es defineix com una inundació violenta que ocorre quan els elements de contenció d'un llac glacial (és a dir, gel glacial) col·lapsen. Solament a la regió de l'Hindukush–Himàlaia, l'any 2010, es van identificar més de 200 llacs potencialment afectats per aquest perill (Ives et al., 2010). Una altra amenaça que naix d'aquests canvis climàtics és la transformació d'àrees que ja eren sensibles al foc, com les serralades costaneres de Califòrnia o les Blue Mountains d' Austràlia, en regions exposades a un risc d'incendis continuat i la conversió d'àrees com el Tibet o Mongòlia en regions propenses a la desertificació (IPCC, 2019).

A més dels impactes biofísics esmentats, els canvis climàtics produeixen desequilibris significatius en les estructures ecològiques, socials i econòmiques de les altes muntanyes que, a vegades, poden costar vides humanes. Un exemple clar són les víctimes mortals per allaus de neu i solses de roques o per les sequeres i inundacions. Encara que ja s'estiguen desenvolupant iniciatives, és possible que moltes comunitats no puguin adaptar-se a moltes d'aquestes noves circumstàncies, la qual cosa podria generar conflictes relacionats amb l'accés a l'aigua i a altres recursos. Les pèrdues econòmiques associades a aquests impactes, que es relacionen amb la producció hidroelèctrica i amb els desastres climàtics, ascendeixen a milers de milions de dòlars. S'estima que entre els anys 1985 i 2014 les pèrdues econòmiques derivades dels desastres hidrometeorològics a la regió de l'Hindukush-Himàlaia van ser de 45.000 milions de dòlars, seguida per la regió dels Alps europeus, on les pèrdues van ser de 7.000 milions de dòlars (Stäubli et al., 2018).

Però més enllà dels costos monetaris, juntament amb els ecosistemes de les altes muntanyes també es perdria un patrimoni que ens pertany a tots. Les comunitats tradicionals de regions de muntanya rurals ja estan veient alterats els seus mitjans de subsistència, com el pasturatge o l'agricultura, associat a un canvi en els règims hídrics. En regions remotes d'alta muntanya les comunitats indígenes estan experimentant una pèrdua de béns i d'identitat cultural. Per exemple, als voltants de l'Ausangate, al Perú, la comunitat quítxua ha deixat de celebrar els ritus tradicionals relacionats amb la deïtat d'una glacera ja desapareguda. Un altre dels elements que s'està veient alterat és el paisatge. Aquest constitueix no sols un element estretament vinculat a la identitat cultural sinó també a l'economia de les societats de muntanya, ja que el turisme moltes vegades representa la major activitat econòmica en aquestes regions (Palomo, 2017).

### Les grans desconegudes

Malgrat l'evidència dels efectes perjudicials, i a vegades fins i tot catastròfics, que el canvi climàtic pot produir en les altes muntanyes, el desconeixement que en l'actualitat es té sobre les seues dinàmiques pot influir negativament en l'adopció de mesures destinades a pal·liar aquests efectes. Les muntanyes continuen sent grans desconegudes en el context del canvi climàtic.

Són dos els motius principals d'aquest desconeixement: la inaccessibilitat del terreny i la gran fragmentació dels actors que s'evidencia, per exemple, en l'escassetat d'iniciatives amb caràcter transfronterer. Les dades observacionals són en nombroses ocasions escasses o massa recents, i a vegades fins i tot de mala qualitat. Això influeix perquè la informació de què disposem en l'actualitat siga esbiaixada i inexacta i tendisca a no copsar cor-



### «Les muntanyes continuen sent grans desconegudes en el context del canvi climàtic»

rectament els canvis a petites escales (IPCC, 2019). És important ressaltar, però, que en moltes regions de muntanya es troben casos concrets amb realitats diferents. En les serralades situades en regions riques i desenvolupades amb un llarg historial d'investigació de muntanya hi ha una major quantitat i millor qualitat de dades climàtiques que abasten una escala temporal suficient per a realitzar estudis robustos sobre el clima.

D'altra banda, els canvis a futur es prediuen per mitjà de models climàtics generals i regionals encara incapaces de reproduir amb exactitud els detalls de les dinàmiques mesoescalars i subkilometrals en zones de terreny complex. Com, per exemple, els sistemes convectius de mesoescala, que representen un paper crític en regions de muntanya i controlen variables meteorològiques com la precipitació (Gutowski et al., 2020). Gràcies als avanços



en les tècniques computacionals i a l'esforç de la comunitat científica ja s'estan realitzant grans progressos en la inclusió d'aquests processos en els models. No obstant això, i sobretot en regions menys estudiades, les eines disponibles avui dia són de vegades insuficients a l'hora de fer una avaluació exhaustiva dels impactes derivats del canvi climàtic.

Un altre punt que dificulta conèixer la situació de l'alta muntanya en el context del canvi climàtic és el fet que tradicionalment les recerques s'han centrat a entendre la dinàmica de cadascuna de les serralades muntanyenques de manera separada i independent. Això s'explica perquè cadascuna de les regions es veurà afectada de formes diverses en funció de característiques com la posició geogràfica, extensió, altitud i règims climàtics. Tanmateix, aquestes regions singulars també comparteixen elements comuns que són clau per a comprendre-les a escala global.

Per aquesta raó, la comunitat científica ha posat el focus a estudiar les regions d'alta muntanya, no sols en les seues singularitats, sinó també en el seu conjunt, com a regions estretament relacionades per les seues característiques comunes que formen part d'un mateix tot. Aquest punt de vista holístic suposa incloure en la seua avaluació una perspectiva transdisciplinària que ens permeta analitzar de manera conjunta les causes i efectes del canvi climàtic en l'alta muntanya.

### Les oblidades

Encara que en contextos locals i regionals particulars fa dècades que es dona a les regions de muntanya una gran importància, la situació és una altra a escala internacional. Va ser l'any 2015 quan es van establir les bases d'una nova acció global per a afrontar de manera unificada els problemes a les regions d'alta muntanya. Aquell any es van adoptar tres programes clau: l'Acord de París, en què es fa un esment especial a la protecció de zones d'alerta primerenca, l'Agenda per al Desenvolupament Sostenible de Nacions Unides, acompanyada dels seus ODS (Objectius de Desenvolupament Sostenible) i el Marc de Sendai per a la Reducció de Riscos de Desastres.

No obstant això, encara que les bases ja existisquen, segons l'informe SROCC (IPCC, 2019) els experts asseguren que hi ha poques proves per a avaluar sistemàticament l'eficàcia d'aquests programes internacionals a l'hora d'abordar els reptes específics que plantejen els canvis en els ecosistemes d'alta muntanya i en la seua criosfera.

Amb l'objectiu d'evitar que les altes muntanyes de regions més remotes continuen sent «les oblidades» des del punt de vista de la política internacional, sorgeix la necessitat de redirigir el seu plantejament i focalitzar-lo en el context de les regions muntanyoses (Bracher et al., 2018). Hi ha ja iniciatives en desenvolupament, com ara la definició de les consideracions específiques clau per a millorar les condicions sota les quals els ODS poden tindre un propòsit a les regions de muntanya.

### ■ UNA MIRADA ESPECIAL ALS PIRINEUS

Aquestes tres amenaces esmentades a escala global (canvi climàtic, desconeixement i oblit) no es veuen reflectides de la mateixa manera en totes les regions muntanyoses del món. En el cas concret de la serralada dels Pirineus, els efectes del canvi climàtic s'han anat observant en l'últim segle. Ací, la temperatura mitjana ha experimentat un clar augment en els últims cinquanta anys. A més, s'observa un descens en la precipitació de l'ordre de 2,5 % per dècada (Amblar-Francés et al., 2020). D'acord amb les estimacions basades en models climàtics, la temperatura màxima anual dels Pirineus per a l'horitzó 2030 augmentaria entre 1,0 i 2,7 °C respecte a nivells de 1961-1990 en l'escenari RCP8.5 (Amblar-Francés et al., 2020). Per a l'horitzó 2050, l'escalfament seria major, de l'ordre de 2,0 a 4,0 °C (Amblar-Francés et al., 2020). Les glaceres també estan en perill. Concretament, en els últims 150 anys, la glacera del Mont Perdut (Pirineu d'Osca) ha experimentat una fosa de gel més accentuada que en els últims 2.000 anys i tot apunta que, sota aquestes condicions climàtiques, acabarà desapareixent (Moreno et al., 2021).

És per aquests canvis en el clima que l'inici del cicle de vida anual de moltes espècies s'està avançant i les interaccions que hi ha entre elles s'estan veient afectades (Charmantier i Gienapp 2014). Els estanys i torberes, ecosistemes icònics de la serralada pirinenca, estan en risc de desaparèixer a causa de la seua especial vulnerabilitat (Catalan et al., 2006).

Un dels aspectes que adquireix major rellevància en aquesta regió està relacionat amb els recursos hídrics. Entre molts dels valors que aporten els Pirineus, destaca la funció fonamental de proveir de recursos hídrics els territoris adjacents, ja que a la serralada Pirinenca tenen el seu origen una gran part dels afluents superficials i subterranis que nodreixen les conques dels rius Ebre, Bidasoa, Ador, Garona i Aude, entre altres. Concretament, els Pirineus representen el 70 % de les

**«Els impactes biofísics  
es materialitzen  
en una gran varietat de formes:  
des d'allaus de gel i roca fins  
a la desaparició d'espècies»**

aportacions totals al riu Ebre. Aquestes muntanyes són, per tant, una peça clau en el proveïment d'aigua destinada a l'agricultura i la producció d'energia elèctrica, però també a la indústria i al consum domèstic. L'efecte combinat del canvi en el clima i en els usos del sòl alterarà notablement els patrons de gestió i la qualitat dels recursos hídrics dels Pirineus i d'un territori molt més ampli que inclou milions d'habitants. Aquest efecte tindrà un especial impacte a les regions baixes del nord del vessant mediterrani peninsular, que són grans consumidores d'aigua d'aquesta zona, entre les quals es troben regions costaneres amb escassetat d'aigua i alta densitat de població (Observatori Pirinenc per al Canvi Climàtic – Comunitat de Treball dels Pirineus [OPCC-CTP], 2018).

Els Pirineus constitueixen una de les grans cadenes muntanyenques d'Europa i una de les serralades del món amb més densitat d'estacions de mesurament de variables ambientals. Per això, la seua situació és afortunadament més favorable quant a monitoratge dels efectes del canvi climàtic i l'escala temporal d'aquests en comparació amb altres serralades d'alta muntanya del món. A més, en aquesta serralada muntanyenca també hi ha diversos agents que participen activament en els processos de monitoratge, investigació, adaptació, mitigació i divulgació del canvi climàtic, entre els quals es troben l'IPE-CSIC (Institut Pirinenc d'Ecologia) i el CBNPMP (Conservatoire Botanique National des Pyrénées et de Midi-Pyrénées). Així mateix, l'any 2010 va sorgir la iniciativa transfronterera (Espanya-Andorra-França) de l'Observatori Pirinenc del Canvi Climàtic (OPCC), que té com a objectiu impulsar la col·laboració territorial en matèria de canvi climàtic.

No obstant això, no va ser fins a l'any 2020 quan es va realitzar un estudi a alta resolució de l'evolució del clima en la serralada (Amblar-Francés et al., 2020), i encara que som en el camí correcte, hi continua havent molt a fer quant a generar un coneixement científic que integre la totalitat de la serralada en l'avaluació d'impactes biofísics i socioculturals del Pirineu i dels territoris circumdants (OPCC-CTP, 2018).

## ■ CONCLUSIONS

La comunitat científica adverteix de les pèrdues que patiran aquests ecosistemes. És per això que és de vital importància consolidar serveis hidrològics, meteorològics i climàtics de qualitat i que, al seu torn, estiguen dissenyats a mesura dels riscos i les necessitats específiques dels espais de muntanya. De la mateixa manera s'han de revisar i actualitzar les polítiques internacionals de cooperació al desenvolupament i incorporar-hi de manera integral polítiques de desenvolupament sostenible i conservació dels ecosistemes de les munta-

nyes. A escala regional i local és necessari un impuls d'iniciatives capaces de reforçar les relacions entre les decisions polítiques, els resultats científics i el coneixement tradicional i indígena. Aquestes solucions han d'estar basades en la col·laboració amb les parts interessades incloent-les de manera activa en el procés de presa de decisions.

A les regions més privilegiades aquestes accions s'han anat desenvolupant des de fa dècades, no obstant això, hi ha un gran contrast amb les regions de muntanya més pobres i remotes. És essencial traslladar aquests avanços i homogeneïtzar la qualitat i quantitat d'informació sobre el clima de muntanya.

En el context d'oferir noves solucions, l'Organització Meteorològica Mundial va celebrar la Cimera de les Altes Muntanyes (High Mountain Summit) a l'octubre de 2019, en què van participar nombroses entitats internacionals de pes, com el Grup del Banc Mundial (WBG) i l'Organització de les Nacions Unides (ONU) a través dels organismes FAO (Organisme de l'ONU per a l'Alimentació i l'Agricultura) i la UNESCO (Organització de l'ONU per a l'Educació, la Ciència i la Cultura). El resultat va ser una crida a l'acció sense precedents adreçada a tots els estrats de la societat, incloent-hi entitats governamentals, científicoacadèmiques, privades i la societat civil (World Meteorological Organization [WMO], 2019).

El canvi real, no obstant això, passa per la conscienciació de tota la societat, per això és fonamental que les institucions a tots els nivells, des del local a l'internacional, promoguen activitats que informen i consciencien l'opinió pública de l'incalculable valor d'aquestes regions i dels greus impactes que pateixen i patiran durant els pròxims anys a conseqüència del canvi climàtic. El repte a què s'enfronten els espais d'alta muntanya és real i, en conseqüència, reals han de ser també les accions per a afrontar-lo. 🌀

## REFERÈNCIES

- Amblar-Francés, P., Ramos-Calzado, P., Sanchis-Lladó, J., Hernanz-Lázaro, A., Peral-García, M. C., Navascués, B., Dominguez-Alonso, M., Pastor-Saavedra, M. A., & Rodríguez-Camino, E. (2020). High resolution climate change projections for the Pyrenees region. *Advances in Science and Research*, 17, 191–208. <https://doi.org/10.5194/asr-17-191-2020>
- Bracher, C. P., von Dach, S. W., & Adler, C. (2018). Challenges and opportunities in assessing sustainable mountain development using the UN Sustainable Development Goals. *CDE Working Paper*, 3. Centre for Development and Environment (CDE). <http://doi.org/10.7892/boris.119737>
- Catalan, J., Camarero, L., Felip, M., Pla, S., Ventura, M., Buchaca, T., Bartumeus, F., de Mendoza, G., Miró, A., Casamayor, E. O., Medina-Sánchez, J. M., Bacardit, M., Altuna, M., Bartrons, M., & Díaz de Quijano, D. (2006). High mountain lakes: extreme habitats and witnesses of environmental changes. *Limnética*, 25, 551–584. <http://hdl.handle.net/10261/44375>





Manuel Torres García / Unsplash

## «Els estans i torberes, ecosistemes icònics de la serralada pirinenca, estan en risc de desaparèixer a causa de la seua especial vulnerabilitat»

Charmantier, A., & Gienapp, P. (2014). Climate change and timing of avian breeding and migration: Evolutionary versus plastic changes. *Evolutionary Applications*, 7(1), 15–28. <https://doi.org/10.1111/eva.12126>

Cullen, N. J., Sirguey, P., Mölg, T., Kaser, G., Winkler, M., & Fitzsimons, S. J. (2013). A century of ice retreat on Kilimanjaro: The mapping reloaded. *The Cryosphere*, 7, 419–431. <https://doi.org/10.5194/tc-7-419-2013>

Diaz, H. F., Grosjean, M., & Graumlich, L. (2003). *Climate variability and change in high elevation regions: Past, present and future*. Advances in Global Change Research. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-1252-7>

Gutowski, W. J., Ullrich, P. A., Hall, A., Leung, L. R., O'Brien T. A., Patricola, C. M., Arritt, R. W., Bukovsky, M. S., Calvin, K. V., Feng, Z., Jones, A. D., Kooperman, G. J., Monier, E., Pritchard, M. S., Pryor, S. C., Qian, Y., Rhoades, A. M., Roberts, A. F., Sakaguchi, K., ... Zarzycki, C. (2020). The ongoing need for high-resolution regional climate models: Process understanding and stakeholder information. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(5), E664–E683. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0113.1>

Huggel, C., Muccione, V., Carey, M., James, R., Jurt, C., & Mechler, R. (2019). Loss and damage in the mountain cryosphere. *Regional Environmental Change*, 19(5), 1387–1399. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1385-8>

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., & Kääb, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>

Ives, J., Shrestha, R., & Mool, P. (2010). *Formation of glacial lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF risk assessment*. ICIMOD. [https://www.preventionweb.net/files/14048\\_ICIMODGLOF.pdf](https://www.preventionweb.net/files/14048_ICIMODGLOF.pdf)

IPCC. (2019). *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (Eds.). En premsa.

Moreno, A., Bartolomé, M., López-Moreno, J. I., Pey, J., Corella, J. P., García-Orellana, J., Sancho, C., Leunda, M., Gil-Romera, G., González-Sampériz, P., Pérez-Mejías, C., Navarro, F., Otero-García, J., Lapazarán, J., Alonso-González, E., Cid, C., López-Martínez, J., Oliva-Urcia, B., Faria, S. H., ... García-Ruiz, J. M. (2021). The case of a southern European glacier disappearing under recent warming that survived Roman and Medieval warm Periods. *The Cryosphere*, 15, 1157–1172. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1157-2021>

Observatorio Pirenaico para el Cambio Climático – Comunidad de Trabajo de los Pirineos [OPCC-CTP]. (2018). *El cambio climático en los Pirineos: Impactos, vulnerabilidades y adaptación*. OPCC-CTP.

Palomo, I. (2017). Climate change impacts on ecosystem services in high mountain areas: A literature review. *Mountain Research and Development*, 37(2), 179–187. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00110.1>

Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Cáceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. B., ... Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>

Rahbek, C., Borregaard, M. K., Antonelli, A., Colwell, R. K., Holt, B. G., Nogues-Bravo, D., Rasmussen, C. M. Ø., Richardson, K., Rosing, M. T., Whittaker, R. J., & Fjeldsø, J. (2019). Building mountain biodiversity: Geological and evolutionary processes. *Science*, 365(6458), 1114–1119. <https://doi.org/10.1126/science.aax0151>

Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C., Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmann, N., & Vuille, M. (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global Planetary Change*, 119, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>

Stäubli, A., Nussbaumer, S., Allen, S. K., Huggel, C., Arguello, M., Costa, F., Hergarten, C., Martínez, R., Soto, J., Vargas, R., Zambrano, E., & Zimmermann, M. (2018). Analysis of weather- and climate-related disasters in mountain regions using different disaster databases. En S. Mal, R. B. Singh, & C. Huggel (Eds.), *Climate change, extreme events and disaster risk reduction* (p. 17–41). Sustainable Development Goals Series. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_2)

Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., & Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, 43(7), W07447. <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>

World Meteorological Organization [WMO]. (2019). *High Mountain Summit*. Consultat l'1 de febrer, 2021, en <https://highmountainsummit.wmo.int/en>

### AGRAÏMENTS

Aquest treball ha sigut finançat pel Ministeri de Ciència i Innovació d'Espanya a través de l'acreditació d'excel·lència María de Maeztu 2018–2022 (Ref. MDM-2017-0714), del projecte predoctoral KVORTEX (MDM-2017-0714-19-3) del programa María de Maeztu, i del projecte iMechPro (RTI2018-100696-B-I00) del programa Reptes d'Investigació.

**NEREA BILBAO BARRENETXEA**. Investigadora Junior i FPI-MdM Fellow. Basque Centre for Climate Change (BC3), Espanya. Enginyera Ambiental per la Universitat d'Enginyeria de Bilbao amb un màster en la mateixa àrea de coneixement. S'ha especialitzat en contaminació i dispersió atmosfèrica. Actualment és investigadora predoctoral en BC3 dins del grup d'investigació Climate Modelling, on realitza una investigació sobre les regions d'alta muntanya en el context d'un clima canviant. ✉ [nerea.bilbao@bc3research.org](mailto:nerea.bilbao@bc3research.org)

**SÉRGIO HENRIQUE FARIA**. Professor d'Investigació Ikerbasque Basque Centre for Climate Change (BC3) i Ikerbasque, Basque Foundation for Science (Espanya). Físic, doctor per la Universitat Tecnològica de Darmstadt, Alemanya (2003). Director del laboratori de baixes temperatures IzotzaLab, líder de la línia d'investigació Physical Basis i director dels grups d'investigació Cryosphere i Climate Modelling del BC3. És també *lead author* i *contributing author* del *Sisè informe d'avaluació* (AR6), Grup de Treball I (WGI), del Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC) i editor de les revistes científiques *Journal of Glaciology* (Cambridge University Press) i *Scientific Reports* (Nature Publishing Group). Ha participat en diverses expedicions a les glaceres més remotes al cor de l'Antàrtida i Groenlàndia. ✉ [sh.faria@bc3research.org](mailto:sh.faria@bc3research.org)