UN WATER

unesco

Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2025

Montagne e ghiacciai Torri d'acqua

unesco
World Water Assessment Programme

Food and Agriculture Organization of the United Nations

ESCAP, UNECE, UNECLAC, UNESCWA

unesco
Intergovernmental Hydrological Programme

UN HABITAT
FOR A BETTER URBAN FUTURE

UNIDO

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION

fondazione UniVerde
www.fondazioneuniverde.it

Pubblicato nel 2025 dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura, 7, place de Fontenoy, 75352 Parigi 07 SP, Francia, e dalla Fondazione UniVerde, Via Antonio Salandra, 6 – 00187 Roma, Italia.

© UNESCO 2025 e Fondazione UniVerde 2025

Questo rapporto è pubblicato dall'UNESCO per conto di UN-Water. L'elenco dei membri e dei partner di UN-Water è disponibile sul sito web: www.unwater.org.

ISBN: 978-92-3-000244-2
https://doi.org/10.54679/ECFE9448

Questa pubblicazione è disponibile in Open Access con licenza Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/deed.it). Utilizzando il contenuto di questa pubblicazione, gli utenti accettano di essere vincolati dai termini di utilizzo del Repository Open Access dell'UNESCO (www.unesco.org/en/open-access/cc-sa).

La presente licenza si applica esclusivamente al contenuto testuale della pubblicazione. Per l'utilizzo di qualsiasi materiale non chiaramente identificato come appartenente all'UNESCO, è richiesta la preventiva autorizzazione del titolare del copyright.

Sezione 7.2 di Jos Timmerman e Hanna Plotnykova © 2024 Nazioni Unite.

Le foto contrassegnate da un asterisco (*) non sono coperte dalla licenza CC-BY-SA e non possono essere utilizzate o riprodotte senza la preventiva autorizzazione del titolare del copyright.

Titolo originale: *The United Nations World Water Development Report 2025 – Mountains and glaciers: Water towers.*

Pubblicato nel 2025 dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura, 7, place de Fontenoy, 75352 Parigi 07 SP, Francia.

Le designazioni utilizzate e la presentazione del materiale in questa pubblicazione non implicano in nessun modo l'espressione di alcuna opinione da parte dell'UNESCO riguardo allo status giuridico di qualsiasi paese, territorio, città o area o delle sue autorità, o riguardo alla delimitazione delle sue frontiere o confini. Allo stesso modo, i confini e i nomi indicati e la designazione utilizzata sulle mappe non implicano l'approvazione o l'accettazione ufficiale da parte delle Nazioni Unite. Esiste una controversia tra i governi dell'Argentina e del Regno Unito di Gran Bretagna e Irlanda del Nord riguardo alla sovranità sulle Isole Falkland (Malvinas).

Le idee e le opinioni espresse in questa pubblicazione sono quelle degli autori; non sono necessariamente quelle dell'UNESCO e non impegnano l'organizzazione. I contenuti sono stati forniti dai membri e dai partner di UN-Water e da altri soggetti elencati all'inizio di ogni capitolo. L'UNESCO e il Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO (UNESCO WWAP) non sono responsabili di eventuali errori nei contenuti forniti o di discrepanze nei dati e nei contenuti tra i capitoli. UNESCO WWAP ha offerto l'opportunità alle singole persone di essere elencate come autori e contributori o di essere riconosciute in questa pubblicazione. UNESCO WWAP non è responsabile di eventuali omissioni al riguardo.

Citazione suggerita:

Nazioni Unite, *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2025. Montagne e ghiacciai: Torri d'acqua.* UNESCO, Parigi.

Edizione italiana a cura di Massimo Boddi

Traduzione di Massimo Micheli

Copertina di Davide Bonazzi

Progetto grafico di Marco Tonsini

Impaginazione di libreriauniversitaria.it Edizioni – TxT Spa

Stampato da Bona Digital Print Srl, Strada Settimo 370/30, 10156 Torino, Italia

Questa pubblicazione è realizzata con materia prima da foreste gestite in maniera responsabile e da fonti controllate.

I N B R E V E

Miliardi di persone dipendono dall'acqua dolce che sgorga da ambienti montani sempre più fragili

Le risorse idriche che le montagne ci offrono si stanno letteralmente sciogliendo sotto i nostri occhi.

Le montagne e i ghiacciai alpini, spesso definiti "torri d'acqua" del mondo, stanno diventando sempre più vulnerabili ai cambiamenti climatici e alle attività umane non sostenibili; ciò mette in pericolo le risorse idriche da cui dipendono miliardi di persone e innumerevoli ecosistemi.

Fino al 60% dell'acqua dolce del Pianeta ha origine dalle montagne

Il *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2025*, ***Montagne e ghiacciai: torri d'acqua***, richiama l'attenzione sui servizi e sui benefici essenziali che le acque di montagna e i ghiacciai alpini forniscono alle comunità, alle economie e all'ambiente. Concentrandosi sulle soluzioni tecniche e sulle politiche necessarie per migliorare la gestione dell'acqua in montagna, il rapporto affronta questioni fondamentali come l'approvvigionamento idrico e i servizi igienico-sanitari, la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici, la sicurezza alimentare ed energetica, l'industria, la riduzione del rischio di disastri naturali e la protezione degli ecosistemi.

Per affrontare la crisi idrica globale occorre iniziare dall'alto.

unesco

UN WATER

«Poiché le guerre hanno origine nello spirito degli uomini e delle donne, è nello spirito degli uomini e delle donne che si debbono innalzare le difese della pace»

Montagne e ghiacciai Torri d'acqua

Indice

Prefazione di Audrey Azoulay, *Direttrice generale dell'UNESCO* x

Prefazione di Álvaro Lario, *Presidente di UN-Water e IFAD* xii

Prefazione di Michela Miletto, *Coordinatrice dell'UNESCO WWAP* **e Richard Connor**, *Curatore editoriale* xiii

Prefazione di Alfonso Pecoraro Scanio, *Presidente della Fondazione UniVerde* xv

Gruppo di lavoro del WWDR 2025 xvii

Ringraziamenti xviii

Sintesi 1

Prologo 10

Tendenze della domanda e della disponibilità di acqua 11

I progressi verso il conseguimento dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 13

Riferimenti bibliografici 17

Capitolo 1: Introduzione 18

1.1 Le aree montane nel mondo 20

1.2 Uso di acque montane e dipendenza da esse 22

1.3 Popolazioni e comunità di montagna 24

1.4 Criosfera montana, compresi i ghiacciai 24

Riferimenti bibliografici 26

Capitolo 2: Cambiamenti nella criosfera e impatti sull'acqua 27

2.1 Dinamiche della criosfera montana 29

2.2 Impatti del cambiamento delle condizioni di neve e ghiaccio in montagna 33

2.3 Sfide della gestione dell'acqua 40

2.4 Conclusioni 41

Riferimenti bibliografici 42

Capitolo 3: Alimentazione e agricoltura 46

3.1 Sicurezza alimentare e agricoltura 47

3.2 Sfide 52

3.3 Risposte 56

3.4 Conclusioni 60

Riferimenti bibliografici 61

Capitolo 4: Insediamenti umani e riduzione del rischio di disastri 64

4.1 Sfide 65

4.2 Risposte 68

4.3 Conclusioni 71

Riferimenti bibliografici 72

Indice

Capitolo 5: Industria ed energia 74
- 5.1 Sfide 76
- 5.2 Impatto dell'inquinamento industriale sulla qualità dell'acqua 76
- 5.3 Esempi di utilizzo dell'acqua in ambito industriale ed energetico 78
- 5.4 Energia idroelettrica nelle aree montane 80
- 5.5 Risposte per uno sviluppo industriale inclusivo e sostenibile 82
- Riferimenti bibliografici 84

Capitolo 6: Ambiente 87
- 6.1 Servizi ecosistemici della criosfera montana 88
- 6.2 Tendenze dei servizi ecosistemici della criosfera e della montagna 89
- 6.3 Risposte 93
- Riferimenti bibliografici 98

Capitolo 7: Prospettive regionali 100
- 7.1 Africa subsahariana 101
- 7.2 Europa e Asia centrale 106
- 7.3 America Latina e Caraibi 113
- 7.4 Asia e Pacifico 119
- 7.5 La regione araba 126
- Riferimenti bibliografici 132

Capitolo 8: Sviluppo di conoscenze e competenze 139
- 8.1 Lacune di dati e di conoscenze sulle zone di alta montagna 140
- 8.2 Contributi delle conoscenze indigene, di genere e locali 147
- 8.3 Potenziamento delle competenze 149
- 8.4 Condivisione delle informazioni e comunicazione 151
- 8.5 Conclusioni 153
- Riferimenti bibliografici 154

Capitolo 9: Governance e finanziamenti 156
- 9.1 La governance dell'acqua nelle zone montane a livello internazionale 157
- 9.2 La governance dell'acqua nelle zone montane a livello regionale 159
- 9.3 La governance dell'acqua nelle zone montane a livello nazionale e locale 162
- 9.4 Valutazione e finanziamenti 164
- Riferimenti bibliografici 167

Capitolo 10: Conclusioni 169
- Perché le montagne sono importanti per tutti 170
- Strategie di risposta: la via da seguire 171
- Epilogo 173

Acronimi 174

Riquadri, figure e tabelle

Riquadri

Riquadro 1.1 Delimitazione delle regioni montane 22
Riquadro 2.1 Impatto della deposizione di *black carbon*, polvere e altro particolato sulla fusione di neve e ghiaccio 31
Riquadro 2.2 Prudenza nell'applicazione del concetto di "picco idrico" nelle politiche idriche 35
Riquadro 2.3 *Feedback* tra scarsità di neve, incendi boschivi e colate detritiche 38
Riquadro 2.4 Gestione delle inondazioni da collasso di laghi glaciali (GLOF nell'acronimo inglese) in Perù 39
Riquadro 3.1 Sicurezza alimentare e Obiettivi di sviluppo sostenibile 48
Riquadro 3.2 Il sistema dei terrazzamenti di riso di Honghe Hani 51
Riquadro 3.3 La dipendenza del bacino indo-gangetico dall'acqua di fusione della criosfera per l'irrigazione 55
Riquadro 3.4 Una misura di adattamento innovativa allo scioglimento dei ghiacciai che influisce sulla disponibilità di acqua per l'agricoltura irrigua 57
Riquadro 3.5 Il Global Mountain Participatory Guarantee System Network (PGS) 59
Riquadro 4.1 Impatti del disastro alluvionale in Nepal del 2021 66
Riquadro 4.2 Un sistema di approvvigionamento idrico e igienico-sanitario alimentato a gravità e basato sulla comunità 71
Riquadro 5.1 Proteggere i ghiacciai dall'impatto delle attività estrattive: Pascua-Lama, Cile 79
Riquadro 6.1 I parami: un ecosistema montano unico in America meridionale 89
Riquadro 6.2 Approcci alla neutralità in termini di degrado del territorio in montagna 95
Riquadro 6.3 Acción Andina: il ripristino del paesaggio forestale nelle Ande 95
Riquadro 6.4 Costruire la resilienza in montagna: ripristino di un bacino idrografico nelle montagne del Pamir in Afghanistan 96
Riquadro 7.1 L'importanza delle torri d'acqua per l'agricoltura in Madagascar 103
Riquadro 7.2 Protezione dei ghiacciai con coperte isolanti 108
Riquadro 7.3 Un sistema transfrontaliero di allerta precoce per le alluvioni basato sulla comunità (CBFEWS) 125
Riquadro 8.1 L'International Network for Alpine Research Catchment Hydrology (INARCH) 143
Riquadro 8.2 Lo sviluppo congiunto di una strategia per la ricerca sull'acqua per le popolazioni indigene e le comunità locali (IPLC) 148
Riquadro 8.3 Research Centre for Alpine Ecosystems (CREA)-Mont Blanc: un'eredità di scienza partecipata nel contesto delle Alpi 151
Riquadro 8.4 Oltre la competenza tecnica: l'importanza della fiducia per il successo di un progetto 153
Riquadro 9.1 Elementi costitutivi delle iniziative di governance delle zone di montagna a livello regionale 159
Riquadro 9.2 *Task force* di alto livello per l'Hindu Kush Himalaya 161
Riquadro 9.3 Perdite economiche dovute ai pericoli naturali in montagna 164
Riquadro 9.4 Fattori che incoraggiano gli investimenti finanziari nelle zone di montagna 165

Figure

Figura P.1 Prelievi totali di acqua a livello mondiale per settore di utilizzo principale, 2000-2021 (km^3/anno) 11
Figura P.2 Prelievo di acqua per settore (% del prelievo totale di acqua dolce) per livello di reddito, 2020 12
Figura P.3 Stato di avanzamento verso i traguardi dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6, 2024 13
Figura P.4 Percentuale di popolazione che utilizza servizi di acqua potabile gestiti in modo sicuro, 2022 14
Figura P.5 Percentuale di popolazione che utilizza servizi igienico-sanitari gestiti in modo sicuro (indicatore dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6.2.1a) in diverse regioni, 2022 15
Figura 1.1 Delimitazione delle regioni montane e densità di popolazione, 2015 21

Figura 1.2 Previsioni relative alla rilevanza delle regioni montane e alla dipendenza della popolazione, 2041-2050 (SSP2-RCP6.0) ... 23
Figura 1.3 Variazioni della massa dei ghiacciai a livello mondiale, 1950-2020 ... 25
Figura 2.1 Processi idrologici e della criosfera di alta montagna che regolano l'approvvigionamento idrico ... 29
Figura 2.2 Principali cambiamenti criosferici e idrologici nelle regioni di alta montagna dovuti al riscaldamento globale nel XXI secolo ... 32
Figura 2.3 Variazione percentuale per 1 °C di riscaldamento nella frequenza degli eventi di fusione per pioggia su neve in alta montagna a livello mondiale, 1982-2014 ... 33
Figura 2.4 Variazioni della superficie globale dei ghiacciai, 2000-2019 ... 34
Figura 2.5 Contributo della fusione dei ghiacciai e delle precipitazioni alla portata dei fiumi in alcuni grandi bacini con sorgenti montane ... 36
Figura 2.6 Impatto dei cambiamenti climatici, idrici e della criosfera sulle popolazioni indigene e sulle comunità locali nelle regioni fredde ... 40
Figura 3.1 Schema in sezione di un pendio terrazzato ... 50
Figura 5.1 Vie di trasporto e processi di deposizione dei contaminanti in ambienti glaciali ... 77
Figura 6.1 Servizi ecosistemici forniti dalla criosfera montana e dagli ecosistemi degli altipiani (a) e collegamenti tra questi e gli Obiettivi di sviluppo sostenibile (b) ... 90
Figura 7.1 Torri d'acqua in Africa ... 102
Figura 7.2 Mappa topografica delle Alpi ... 107
Figura 7.3 Catene montuose del Tian Shan e del Pamir in Asia centrale ... 112
Figura 7.4 Principali catene montuose e fiumi in America Latina e Caraibi ... 114
Figura 7.5 Bilancio di massa dei ghiacciai a livello regionale, espressi in metri d'acqua equivalente (m w.e.) all'anno, relativi a diverse aree della regione dell'Hindu Kush Himalaya nei periodi 1975-1999, 2000-2009 e 2010-2019 ... 120
Figura 7.6 Numero di inondazioni da collasso di laghi glaciali registrate per decennio nelle regioni di alta montagna dell'Asia, 1830-2020 ... 121
Figura 7.7 Diminuzione dell'acqua rinnovabile pro capite relativa al passato e a previsioni future in base alla crescita demografica stimata nella regione araba, 2002-2050 ... 126
Figura 7.8 Cime e catene montuose nella regione araba ... 127
Figura 7.9 Serie temporale della durata della copertura nevosa annuale sul Monte Libano (oltre i 2.000 metri sul livello del mare), 1970-2100 ... 129
Figura 7.10 Serie temporale della durata della copertura nevosa annuale sulle montagne dell'Atlante (oltre i 2.000 metri sul livello del mare), 1970-2100 ... 129
Figura 7.11 Variazione dello spessore medio stagionale della neve (ottobre-marzo) sul Monte Libano nei periodi 1981-2000, 2021-2040 e 2041-2060 ... 130
Figura 7.12 Variazione dello spessore medio stagionale della neve (ottobre-marzo) sulle montagne dell'Atlante nei periodi 1981-2000, 2021-2040 e 2041-2060 ... 130
Figura 8.1 Distribuzione storica globale delle stazioni idrometeorologiche per altitudine, 1750-2024 ... 141
Figura 8.2 Componenti di un sistema informativo idrologico ... 145
Figura 8.3 Quadro concettuale che integra gli effetti della riduzione della criosfera sui servizi ecosistemici culturali, di approvvigionamento e di regolazione ... 146

Tabelle

Tabella P.1 Prelievi globali di acqua dolce per settore, 2000 e 2021 ... 11
Tabella 5.1 Impronta idrica annuale del processo di creazione di bitcoin a livello mondiale, 2020-2021 ... 78

Prefazione

di **Audrey Azoulay**, *Direttrice generale dell'UNESCO*

Indipendentemente dal luogo in cui viviamo, tutti dipendiamo in qualche modo da montagne e ghiacciai, le torri d'acqua del nostro Pianeta.

Le montagne occupano 33 milioni di chilometri quadrati della superficie terrestre e sono fondamentali per la vita. Oltre 1,1 miliardi di persone, pari al 15% della popolazione mondiale, vivono nelle regioni montuose e altri due miliardi vivono a valle e dipendono da queste riserve idriche naturali fornite dallo scioglimento dei ghiacciai.

I ghiacciai – compresi oltre tre miliardi di persone e innumerevoli ecosistemi che dipendono da essi, come foreste, zone umide, terreni e fiumi – corrono un grave rischio. Il *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2025* offre una panoramica completa dello stato attuale dei ghiacciai e della criosfera, evidenziando le immense minacce di natura economica, ambientale e sociale che stiamo affrontando.

Il rapporto rivela in particolare che le Ande, da cui proviene la metà del volume d'acqua del Rio delle Amazzoni, hanno perso tra il 30% e il 50% dei loro ghiacciai dagli anni '80. Se non si interverrà, si prevede che i ghiacciai del Monte Kenya, del Rwenzori e del Kilimangiaro scompariranno del tutto entro il 2040; mentre il "Terzo Polo", noto anche come sistema Hindu Kush-Karakoram-Himalaya, potrebbe perdere la metà del volume dei suoi ghiacciai, che attualmente si estendono per 100.000 chilometri quadrati, entro il 2100.

Il rapporto sottolinea che molte delle questioni relative all'adattamento al clima e alla gestione dell'acqua sono transnazionali, il che significa che le soluzioni più efficaci richiedono un approccio multilaterale.

L'UNESCO, in quanto agenzia delle Nazioni Unite specializzata nelle scienze dell'acqua e nella cooperazione, svolge un ruolo cruciale nella ricerca di queste soluzioni, attraverso la produzione e la condivisione delle conoscenze, l'educazione in materia di risorse idriche e come piattaforma per il dialogo internazionale.

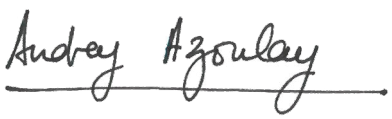
Senza una corretta gestione, i sistemi idrici alimentati dalle montagne e dai ghiacciai rischiano di essere oggetto di frequenti conflitti, soprattutto perché queste risorse preziose si trovano ad affrontare problemi crescenti. Tuttavia, riteniamo che una governance transfrontaliera delle risorse idriche rafforzata e sostenuta dalla cooperazione internazionale possa essere un potente vettore di pace tra paesi vicini. Con questo spirito, nel 2022 è stata lanciata, presso la sede dell'UNESCO, la Coalizione per la cooperazione idrica transfrontaliera, allo scopo di fornire una piattaforma di cooperazione tra i paesi che dipendono da risorse idriche condivise, come acquiferi, laghi e fiumi.

Il nostro Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche, che ha coordinato la produzione di questo rapporto, è all'avanguardia nel sintetizzare e diffondere le conoscenze sulla gestione sostenibile dell'acqua su scala globale. Tale lavoro ci aiuta a capire qual è la posta in gioco e quali azioni possiamo intraprendere.

È necessario che la comunità internazionale si unisca e si mobiliti per proteggere i ghiacciai e la criosfera. Per sensibilizzare e promuovere l'azione, l'Assemblea generale delle Nazioni Unite ha dichiarato il 2025 Anno internazionale per la conservazione dei ghiacciai. Questo è anche il primo anno del Decennio d'azione per le scienze della criosfera, per il quale l'UNESCO è stata nominata agenzia leader.

Questo rapporto, pubblicato a nome dell'intera famiglia di UN-Water, non sarebbe stato possibile senza il sostegno di tutti i nostri partner. In particolare, l'UNESCO ringrazia il Governo italiano, che ha sostenuto la pubblicazione del rapporto per quasi due decenni.

Siamo a un punto cruciale per la protezione dei sistemi idrici mondiali. Spero che questo rapporto serva da catalizzatore, a livello locale, nazionale e internazionale, per un'azione rapida e collettiva.



Audrey Azoulay

Prefazione

di **Álvaro Lario**, *Presidente di UN-Water e del Fondo internazionale per lo sviluppo agricolo (IFAD)*

Per miliardi di persone, l'acqua proveniente dalla fusione dei ghiacciai montani è essenziale per garantire l'acqua potabile e i servizi igienico-sanitari, per la sicurezza alimentare ed energetica e per l'integrità dell'ambiente.

Eppure, oggi, mentre il Pianeta si riscalda, i ghiacciai si stanno sciogliendo più rapidamente che mai, rendendo il ciclo dell'acqua più imprevedibile ed estremo.

A causa del ritiro dei ghiacciai, fenomeni come inondazioni, siccità, frane e innalzamento del livello del mare si stanno intensificando, con conseguenze devastanti per le persone e la natura.

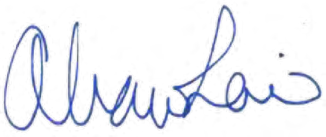
Il *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2025*, *Montagne e ghiacciai: Torri d'acqua*, offre soluzioni che possono aiutarci a mitigare e ad adattarci ai rapidi cambiamenti delle nostre risorse idriche conservate sotto forma di ghiaccio.

Il rapporto fornisce una chiara panoramica della situazione attuale e raccomandazioni sui cambiamenti che dobbiamo introdurre.

Illustrando nel dettaglio le connessioni tra acqua dolce di montagna, servizi essenziali e mondo naturale, questa pubblicazione mette in evidenza l'importanza fondamentale della conservazione della criosfera per il raggiungimento degli Obiettivi di sviluppo sostenibile. Viene inoltre ribadita con forza l'urgenza di ridurre drasticamente le emissioni di carbonio.

Salvare i nostri ghiacciai è una strategia di sopravvivenza che dobbiamo perseguire insieme. Per contribuire al coordinamento del sistema delle Nazioni Unite, il 2025 è stato dichiarato Anno internazionale per la conservazione dei ghiacciai e segna l'inizio del Decennio d'azione per le scienze della criosfera (2025-2034).

Desidero ringraziare sentitamente i vari membri e partner di UN-Water e le persone che hanno contribuito, con la loro esperienza, a questo importante e tempestivo rapporto. Desidero inoltre esprimere apprezzamento per l'inestimabile lavoro di coordinamento dell'UNESCO e del suo Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche ai fini della produzione di questo rapporto.



Álvaro Lario

Prefazione

di **Michela Miletto**, *Coordinatrice dell'UNESCO WWAP*
e **Richard Connor**, *Curatore editoriale*

«*Dimmi cosa posso fare, per favore. Dev'esserci qualcosa che posso fare.*»

Ernest Hemingway, *Le nevi del Kilimangiaro*

Come le immagini degli orsi polari seduti su lastre di ghiaccio in mare sempre più piccole, le foto drammatiche che documentano il rapido ritiro dei ghiacciai alpini sono diventate emblematiche dell'impatto che gli esseri umani hanno sul nostro Pianeta e sul suo ambiente.

L'Assemblea generale delle Nazioni Unite ha proclamato il 2025 Anno internazionale per la conservazione dei ghiacciai per sensibilizzare l'opinione pubblica sul ruolo vitale che ghiacciai, neve e ghiaccio svolgono nel sistema climatico e nel ciclo dell'acqua, nonché sugli impatti di vasta portata causati dal rapido scioglimento di queste masse. Tuttavia, la criosfera alpina non è l'unica componente dei sistemi montuosi soggetta ai cambiamenti climatici e alle attività umane non sostenibili, che vanno a influenzare le cosiddette "torri d'acqua" così importanti a livello globale. Le montagne di tutto il mondo, comprese quelle dei tropici e dei piccoli Stati insulari, stanno subendo cambiamenti senza precedenti. E tutti noi, in ultima analisi, viviamo ai piedi di una montagna.

Dodicesima di una serie di rapporti tematici annuali, l'edizione 2025 del *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche* si propone di esplorare l'importanza delle acque di montagna per lo sviluppo sostenibile, nonché le politiche e le misure di gestione che devono essere adottate, non solo per garantire la sostenibilità di questa risorsa, ma anche per ottimizzare le numerose opportunità che essa offre in un contesto in rapida evoluzione, dove la domanda di acqua continua a crescere mentre la scarsità idrica aumenta.

Come sempre, il rapporto offre analisi approfondite sul tema attraverso diverse prospettive sociali, economiche e ambientali, che vanno dalla sicurezza alimentare ed energetica all'approvvigionamento idrico, ai servizi igienico-sanitari e alla riduzione del rischio di disastri naturali. L'analisi dimostra come gli interventi nelle regioni montane si ripercuotano sulle persone e sugli ecosistemi a valle, evidenziando la necessità di proteggere e gestire, in modo sostenibile, le nostre fragili e vulnerabili torri d'acqua. Non si tratta solo di una sfida a livello locale o regionale, ma anche globale.

L'edizione 2025 del rapporto presenta le conoscenze scientifiche più all'avanguardia in merito al ruolo delle montagne e dei ghiacciai per far fronte alla crisi idrica globale. Anche in questa edizione, ci siamo impegnati per fornire un resoconto equilibrato, basato sui fatti e neutrale, sullo stato attuale delle conoscenze, tale da rappresentarne gli sviluppi più recenti.

Sebbene sia rivolto principalmente a chi è responsabile delle politiche e dei processi decisionali, ai gestori delle risorse idriche, al mondo accademico e alla più ampia comunità per lo sviluppo, ci auguriamo che questo rapporto sia ben accolto anche dal pubblico non strettamente specializzato. Il nostro pensiero va a

tutti coloro che, a vario titolo, sono impegnati nell'alleviare la povertà e le crisi umanitarie, nel perseguire i diritti umani all'approvvigionamento idrico e ai servizi igienico-sanitari e nel portare avanti i progressi relativi agli obiettivi dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile.

L'edizione di quest'anno del rapporto è il risultato di un impegno congiunto delle agenzie responsabili dei capitoli elencati nei ringraziamenti. Il rapporto ha inoltre tratto grande beneficio dagli input e dai contributi di diversi altri membri e partner di UN-Water, nonché di numerose università, istituti di ricerca, associazioni scientifiche e organizzazioni non governative, che hanno fornito un'ampia gamma di materiali rilevanti.

A nome del Segretariato del Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO (UNESCO WWAP), esprimiamo il nostro più profondo apprezzamento alle sopracitate agenzie, ai membri e ai partner di UN-Water, agli autori e alle autrici e a coloro che hanno dato il loro contributo per aver realizzato collettivamente questo rapporto unico e autorevole.

Siamo profondamente grati al Governo italiano per aver finanziato l'UNESCO WWAP e, dal 2008, la produzione del rapporto e alla Regione Umbria per aver generosamente ospitato, a Perugia, il Segretariato dell'UNESCO WWAP. I loro contributi sono stati fondamentali per la stesura del rapporto.

Un ringraziamento speciale va a Audrey Azoulay, Direttrice generale dell'UNESCO, per il suo costante sostegno all'UNESCO WWAP e alla produzione del rapporto, e ad Álvaro Lario, Presidente del Fondo internazionale per lo sviluppo agricolo e di UN-Water.

Infine, esprimiamo la nostra più sincera gratitudine a tutte le colleghe e a tutti i colleghi del Segretariato dell'UNESCO WWAP, i cui nomi sono elencati nei ringraziamenti. L'elaborazione del rapporto non sarebbe stata possibile senza la loro professionalità e dedizione.

Michela Miletto

Richard Connor

Prefazione

di **Alfonso Pecoraro Scanio**, *Presidente della Fondazione UniVerde*

La progressiva scomparsa dei ghiacciai rende ancora più tangibili gli effetti del cambiamento climatico. Laddove i "giganti bianchi", nel corso delle ere geologiche, hanno scolpito montagne e scavato valli ora emergono terreni, trasformando radicalmente la fisionomia dei paesaggi ed implicando la perdita di continuità dei servizi ecosistemici forniti dalla natura.

L'edizione 2025 del *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche* restituisce un quadro reale e preoccupante del declino di montagne e ghiacciai in un Pianeta che sta soffrendo.

Le conseguenze sono gravissime e non possono essere ignorate. Le montagne sono riserve essenziali di acqua dolce che forniscono sostentamento agli habitat, alla biodiversità e a miliardi di persone in tutto il mondo. Il futuro delle nostre torri d'acqua è in pericolo.

Le vulnerabilità ambientali chiamano in causa anche altri aspetti: la perdita dei ghiacciai, e lo scioglimento del permafrost, aumentano il rischio di disastri naturali. Sono ancora davanti ai nostri occhi le immagini della valanga di ghiaccio e detriti che sulla Marmolada, nel luglio 2022, causò la morte di 11 persone. Se, da un lato, i laghi glaciali, alimentati dall'acqua di fusione, possono fornire un utile apporto all'approvvigionamento idrico e alla generazione di energia idroelettrica; dall'altro, è riconosciuta l'emergente minaccia di possibili, devastanti, inondazioni a valle.

I limiti nella capacità di contenimento degli eventi catastrofici sono evidenti. Per rendere più efficaci le misure di riduzione del rischio dei disastri, strategie di mitigazione e adattamento (come la riforestazione e la gestione del territorio) vanno incrementate. Si pensi, ad esempio, che il 30% delle foreste mondiali si trova proprio nelle regioni montane: in qualità di presidi naturali, svolgono una straordinaria azione di difesa contro frane e valanghe. Senza contare la loro capacità di assorbimento della CO_2, compensando le emissioni e fornendoci aria pulita. I benefici della loro presenza sono inestimabili e la garanzia di tutela è fondamentale: se non vogliamo perdere l'aiuto che ci viene fornito dalla natura, questi polmoni verdi vanno protetti da una gestione intensiva e insostenibile e dalle trasformazioni indotte dal clima negli ambienti montani.

Le sfide sono davvero senza precedenti. Comprendere le montagne alla luce dei rapidi mutamenti che stanno subendo, individuando adeguate soluzioni, è l'obiettivo del meticoloso lavoro alla base di questo rapporto. Il crescente stress idrico, in ogni parte del mondo, ha conseguenze di vasta portata sia sulla salvaguardia degli ecosistemi che sul mantenimento della sicurezza alimentare. Pensiamo agli impatti su attività tradizionali come l'agricoltura, la pastorizia e la pesca: poiché il flusso e l'accessibilità di queste fonti d'acqua dolce vengono alterati dal ritiro dei ghiacciai, i mezzi di sostentamento delle comunità rurali sono più che mai compromessi, con indiscutibili ripercussioni anche per le popolazioni nelle pianure. Lo spopolamento è uno dei risvolti più rilevanti di queste dinamiche, dato che il presidio umano assicura la custodia del patrimonio ambientale e la cura del territorio: l'abbandono delle terre alte aumenta le fragilità della montagna.

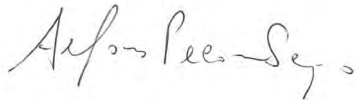
Prevedere l'impatto del cambiamento climatico sulle risorse idriche conservate in alta quota è decisivo per rafforzare le misure di sostegno allo sviluppo socioeconomico delle aree montane. Se non invertiamo questa tendenza, continueremo ad assistere a migrazioni di massa di intere popolazioni, e a feroci competizioni per acqua e terra. I buoni propositi non bastano, servono azioni. Per vincere davvero la sfida dell'eradicazione della povertà, i Paesi in via di sviluppo devono poter contare sulla certezza di risorse finanziarie, utili per adattarsi alla crisi climatica e costruire resilienza. Trattati e Convenzioni sono strumenti importanti ma, ancor prima degli orientamenti politici ed economici, devono perseguire veri obiettivi di solidarietà duratura.

La sicurezza idrica è essenziale per lo sviluppo sostenibile, sancito dall'Obiettivo 6 dell'Agenda 2030: «Garantire a tutti la disponibilità e la gestione sostenibile dell'acqua e delle strutture igienico-sanitarie». L'accesso all'acqua potabile di qualità è la spina dorsale del benessere umano e della conservazione degli ecosistemi, in un contesto di pace e cooperazione. È sulla base di questi propositi che, dal 2018, si rinnova la traduzione ufficiale in italiano dell'UN WWDR, sostenuta da partner virtuosi e frutto della collaborazione tra la Fondazione UniVerde e l'UNESCO WWAP. Di anno in anno, la pubblicazione ha notevolmente contribuito alla diffusione di una maggiore informazione e a un più alto grado di sensibilizzazione intorno al tema dell'acqua, a tutti i livelli, permettendo all'Italia di elevarsi verso le prime posizioni al mondo per numero di download del Documento e di stimolare i necessari interventi di istituzioni e imprese a favore della tutela della risorsa idrica e per il conseguimento dell'Obiettivo 6.

Rafforzare le capacità di monitoraggio sui cambiamenti attuali e previsti della criosfera significa potenziare gli strumenti a disposizione per definire piani, strategie e priorità. In quanto torri d'acqua del mondo, il ruolo critico delle montagne nello sviluppo sostenibile non può essere trascurato. Sviluppare misure di adattamento efficaci, per mitigare l'impatto dello scioglimento dei ghiacciai sull'approvvigionamento idrico mondiale, deve fondare l'impegno concertato tra volontà politica e capacità del settore privato di rispondere alle urgenze del nostro tempo. Non a caso, le Nazioni Unite hanno dichiarato il 2025 Anno internazionale per la conservazione dei ghiacciai.

Le tecnologie eco-digitali possono fornire dati accurati e affidabili per elaborare sistemi di allerta precoce, funzionali alle criticità naturali come frane, valanghe e alluvioni, e a prevenzione delle siccità. I potenziali benefici di soluzioni basate sull'intelligenza artificiale, offrendo nuove capacità di analisi, automazione, correlazione in tempo reale e previsione, permettono di fornire un rilevante supporto al legislatore per la pianificazione di opportune politiche di adattamento. Solo così si potrà assicurare alle future generazioni giustizia climatica, resilienza, accesso garantito e sostenibile alle risorse idriche.

Con questo rapporto, ci auguriamo pertanto che attraverso la ricerca scientifica, il dibattito a livello nazionale e internazionale, l'innovazione eco-digitale e l'impegno delle Istituzioni, a tutti i livelli, decisori, *players*, *stakeholders* e cittadini siano ancora più consapevoli del ruolo cruciale che le montagne e i ghiacciai svolgono per la sicurezza globale di acqua, energia rinnovabile e cibo, nonché dell'importanza delle nostre azioni collettive nella lotta al cambiamento climatico.



Prof. Avv. Alfonso Pecoraro Scanio

Gruppo di lavoro del WWDR 2025

Direttori della pubblicazione
Michela Miletto (fino a gennaio 2025) e Miguel Doria

Curatore editoriale
Richard Connor

Coordinatore del processo
Engin Koncagül

Assistente di pubblicazione
Valentina Abete

Disegnatore grafico
Marco Tonsini

Copyeditor (edizione originale in inglese)
Caren Brown

Per l'edizione in lingua italiana

Cura editoriale e comunicazione
Massimo Boddi

Traduttore
Massimo Micheli

Coordinatore del processo
Giuseppe Di Duca

Segretariato del Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche (WWAP) dell'UNESCO (2024-2025)

Coordinatore a.i: Miguel Doria

Coordinatrice (fino a gennaio 2025): Michela Miletto

Programmi: Chorong Ahn, Richard Connor, Laura Veronica Imburgia, Beobkyung Kim, Engin Koncagül, Teresa Liguori, Bhanu Neupane e Laurens Thuy

Pubblicazioni: Valentina Abete, Martina Favilli e Marco Tonsini

Comunicazione: Simona Gallese

Amministrazione e supporto: Barbara Bracaglia, Lucia Chiodini e Arturo Frascani

IT e sicurezza: Michele Brensacchi

Ringraziamenti

Questo rapporto è pubblicato dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO), per conto di UN-Water, e la sua produzione è coordinata dal Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO (UNESCO WWAP). Si ringraziano i membri e i partner di UN-Water e tutte le persone che hanno collaborato redendo possibile la preparazione dei contenuti di questo rapporto.

Agenzie responsabili dell'elaborazione dei capitoli

Commissioni regionali delle Nazioni Unite (Commissione economica per l'Europa – UNECE, Commissione economica per l'America Latina e i Caraibi – UNECLAC, Commissione economica e sociale per l'Asia e il Pacifico – ESCAP, Commissione economica e sociale per l'Asia occidentale – UNESCWA), Programma delle Nazioni Unite per gli insediamenti umani (UN-Habitat), Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO), UNESCO (Programma idrologico intergovernativo – IHP, Ufficio UNESCO di Nairobi e WWAP), Organizzazione meteorologica mondiale (WMO) e Organizzazione delle Nazioni Unite per lo sviluppo industriale (UNIDO).

Organizzazioni che hanno offerto il loro contributo

Autorità di gestione dei bacini idrologici dei fiumi Bug occidentale e Sian, Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna (ICIMOD), Centro scientifico-informativo della Commissione interstatale per il coordinamento delle risorse idriche dell'Asia centrale (SIC ICWC), ESCAP, Politecnico di Danzica, Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP), Rural Water Supply Network (RWSN), Segretariato della Convenzione delle Nazioni Unite per la lotta alla desertificazione (UNCCD), UNESCO IHP, UNIDO, United Nations University Institute on Comparative Regional Integration Studies (UNU-CRIS), Università di Berna, UNU Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS), UNU Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology (UNU-MERIT) e WMO.

Donatori

La realizzazione del rapporto è stata sostenuta finanziariamente dal Governo italiano e dalla Regione Umbria. Il progetto editoriale in lingua italiana è stato curato e valorizzato dalla Fondazione UniVerde d'intesa con UNESCO WWAP grazie al contributo di Acquedotto Pugliese S.p.A., G.M.T. S.p.A., E.P.M. S.r.l. e CiviSmart S.p.A. Si ringraziano, altresì, tutti coloro che hanno fornito contributi di qualsiasi tipo e i relativi donatori.

Sintesi

A seguito della proclamazione del 2025 quale Anno internazionale per la conservazione dei ghiacciai e in linea con la risoluzione dell'Assemblea generale delle Nazioni Unite sullo sviluppo sostenibile delle montagne del 2022, questa edizione del rapporto intende richiamare l'attenzione a livello globale sull'importanza delle acque di montagna, ivi compresi i ghiacciai alpini, nel quadro dello sviluppo sostenibile delle regioni montane e delle società a valle che da queste dipendono, nel contesto di una criosfera in rapido cambiamento.

Lo stato delle risorse idriche mondiali

In base alle stime globali più recenti (2021), il settore agricolo registra i prelievi di acqua dolce più consistenti (72%), seguito dal settore industriale (15%) e dagli utilizzi domestici o civili (13%). I prelievi di acqua dolce da parte dei vari settori variano notevolmente a seconda del livello di sviluppo economico dei paesi. I paesi a più alto reddito utilizzano maggiori quantitativi di acqua per il settore industriale, mentre nei paesi a più basso reddito il 90% (o anche percentuali superiori) dell'acqua viene utilizzato per l'irrigazione agricola.

Le montagne costituiscono le "torri d'acqua" del mondo e rappresentano una fonte essenziale di acqua dolce

Nel periodo 2000-2021 i prelievi mondiali di acqua dolce sono aumentati del 14%, con un tasso di crescita medio dello 0,7% all'anno. Buona parte di questo incremento è stato registrato nelle città, nei paesi e nelle regioni caratterizzate da un rapido sviluppo economico. La crescita della popolazione non sembra contribuire in modo particolarmente rilevante all'aumento della domanda di acqua. In effetti, i paesi in cui l'utilizzo pro capite di acqua si attesta ai livelli più bassi, ivi compresi diversi paesi dell'Africa subsahariana, sono spesso quelli con una più rapida crescita demografica.

Venticinque paesi che ospitano un quarto della popolazione mondiale sono soggetti ogni anno ad uno stress idrico estremamente elevato. Circa quattro miliardi di persone, pari alla metà della popolazione mondiale, devono far fronte ad una scarsità idrica grave almeno per parte dell'anno.

I cambiamenti climatici accrescono la variabilità stagionale di acqua e l'incertezza della sua disponibilità nella maggior parte delle regioni. L'inquinamento, il degrado dei terreni e degli ecosistemi e le catastrofi naturali possono ulteriormente compromettere la disponibilità di risorse idriche.

Progressi verso il conseguimento dei traguardi dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6

L'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 si propone di garantire la disponibilità e la gestione sostenibile di acqua e servizi igienico-sanitari per tutti.

I progressi verso il conseguimento di tutti i traguardi dell'Obiettivo 6 presentano ritardi, in alcuni casi anche gravi.

Ad esempio, si stima che 2,2 miliardi di persone (pari al 27% della popolazione mondiale) non avessero accesso ad acqua potabile gestita in sicurezza nel 2022. Di queste, quattro persone su cinque vivevano in zone rurali, sprovviste persino di servizi essenziali di fornitura di acqua potabile.

La situazione relativa ai servizi igienico-sanitari è addirittura più grave, con 3,5 miliardi di persone in tutto il mondo che nel 2022 non avevano a disposizione servizi igienico-sanitari gestiti in sicurezza. Appena la metà della popolazione aveva accesso a questi servizi in America Latina e nei Caraibi, così come in Asia centrale e meridionale. La copertura nell'Africa subsahariana era pari ad appena il 24%.

La carenza di dati e le lacune nelle attività di monitoraggio continuano a ostacolare una valutazione accurata degli altri traguardi dell'Obiettivo 6, ad esempio con riferimento alla gestione delle risorse idriche, alla qualità dell'acqua, agli ecosistemi idrici e a un ambiente ad essi favorevole.

Regioni montane

Le montagne costituiscono le "torri d'acqua" del mondo e rappresentano una fonte essenziale di acqua dolce. Rivestono un ruolo vitale per soddisfare i bisogni primari dell'essere umano, come l'accesso all'acqua e ai servizi igienico-sanitari. Le acque di montagna sono fondamentali anche al fine di garantire la sicurezza alimentare ed energetica a miliardi di persone che vivono nelle zone montane e nelle aree circostanti, come pure nelle aree a valle.

Il riscaldamento globale sta accelerando la fusione dei ghiacciai, riducendo il manto nevoso, provocando piogge sempre più estreme e catastrofi naturali

Le principali attività economiche delle regioni montane sono l'agricoltura, la pastorizia, la silvicoltura, il turismo, l'estrazione mineraria, il commercio transfrontaliero e la produzione di energia. Le regioni montane garantiscono la fornitura di prodotti di alto valore, come ad esempio piante officinali, legname e altri prodotti forestali, oltre a capi di allevamento tipici delle zone di montagna e specialità agricole. Si tratta di zone di riferimento a livello mondiale per l'agrobiodiversità, dato che una percentuale consistente del *pool* genetico mondiale delle piante officinali e in generale delle colture agricole viene conservata nelle montagne.

Le montagne sono caratterizzate da un'ampia gamma di zone ecologiche differenti; ciascuna di queste è il risultato di una combinazione specifica di fattori, tra cui l'altitudine, la geomorfologia, il livello di isolamento e le condizioni microclimatiche (inclusa l'esposizione al sole). Di conseguenza, spesso le montagne presentano una biodiversità endemica maggiore rispetto alle zone di pianura, con una notevole varietà genetica di colture agricole e di animali. Inoltre, presentano una varietà di culture umane altrettanto ampia.

Criosfera di montagna e ghiacciai

La criosfera delle montagne costituisce una delle componenti del sistema terrestre più sensibili ai cambiamenti climatici. In generale, le montagne garantiscono un maggiore ruscellamento superficiale per unità di superficie rispetto alle pianure, in ragione delle precipitazioni più elevate e di una minore evaporazione. I ghiacciai alpini garantiscono lo stoccaggio e il rilascio dell'acqua, sebbene in un arco temporale assai più lungo. In numerose regioni di alta montagna la formazione del manto nevoso stagionale costituisce gran parte dello stoccaggio di acqua dolce.

La maggior parte dei ghiacciai del mondo, ivi compresi quelli montani, si sta sciogliendo ad un ritmo crescente. Tuttavia, nella maggior parte dei bacini idrografici caratterizzati da una componente di criosfera, la fusione della neve contribuisce al deflusso in modo più significativo rispetto alla fusione dei ghiacciai, e spesso è nettamente superiore a quest'ultima.

Il riscaldamento globale sta accelerando la fusione dei ghiacciai, riducendo il manto nevoso, aumentando lo scioglimento del permafrost, provocando piogge sempre più estreme e catastrofi naturali. I flussi di acqua provenienti dalle montagne diventeranno sempre più imprevedibili, incerti e variabili. I cambiamenti nei tempi e nei volumi dei flussi massimi e minimi, oltre all'erosione e ai carichi di sedimenti, influenzeranno le risorse idriche a valle in termini di quantità, regolarità e qualità.

La presenza di polveri, i depositi di fuliggine legati alla combustione, incluso il *black carbon*, e la crescita di microbi e alghe sulle superfici della neve e dei ghiacciai diventano sempre più comuni in ragione dell'aumento della frequenza e/o dell'intensità delle tempeste di polvere, dell'inquinamento dell'aria e degli incendi; inoltre, possono accelerare la velocità di fusione a fronte della riduzione dell'albedo superficiale fino alla nevicata successiva.

Le conseguenze dei cambiamenti climatici, tra cui l'aumento delle temperature, la recessione dei ghiacciai, lo scioglimento del permafrost e il cambiamento dei regimi delle precipitazioni, possono aggravare i rischi di inondazione e frane. I processi collegati con questi rischi, tra cui le colate di detriti e le inondazioni, le valanghe, le cascate di ghiaccio e i crolli di roccia, le inondazioni da collasso delle dighe a causa di frane e le inondazioni da collasso di laghi glaciali (GLOF nell'acronimo inglese), possono costituire minacce significative per comunità, infrastrutture, animali e piante selvatiche.

Alimentazione e agricoltura

L'agricoltura e la pastorizia costituiscono fonti essenziali per la sopravvivenza delle popolazioni delle zone rurali montane. Nei paesi in via di sviluppo una persona che vive nelle zone rurali montane su due è esposta all'insicurezza alimentare. Le distanze e le difficoltà di accesso, oltre al degrado dei terreni (con conseguente scarsa qualità dei suoli) e alla notevole variabilità nella disponibilità stagionale di acqua, si combinano dando luogo a sfide significative per l'agricoltura nelle aree di montagna.

Le comunità montane si adoperano per conservare molte delle varietà più rare delle colture e delle piante officinali. Hanno sviluppato tecniche e conoscenze tradizionali di grande valore in relazione alla coltivazione, alla produzione zootecnica e alla raccolta dell'acqua, che permettono di sostenere interi ecosistemi.

Le popolazioni indigene che vivono nelle aree montane sono depositarie di conoscenze uniche e di estremo valore, oltre che di tradizioni e pratiche culturali che contribuiscono allo sviluppo di sistemi alimentari sostenibili, alla gestione della terra e alla conservazione della biodiversità. La coltivazione a terrazza può adattarsi alle condizioni locali dei pendii. I suoi numerosi vantaggi includono la diminuzione del deflusso delle acque superficiali, la promozione della conservazione delle risorse idriche, la riduzione dell'erosione dei suoli, la stabilizzazione dei pendii, il miglioramento dell'habitat e della biodiversità e il sostegno al patrimonio culturale.

Le strategie di risposta agli impatti dei cambiamenti climatici sulle montagne variano significativamente in termini di obiettivi e priorità, rapidità dell'attuazione, governance e tipologia di processi decisionali, oltre alla consistenza delle risorse, incluse quelle finanziarie, per la loro messa in pratica. Le azioni di adattamento di norma prevedono modifiche alle pratiche agricole, il potenziamento delle infrastrutture, incluse quelle per lo stoccaggio dell'acqua, il ricorso alle conoscenze locali, lo sviluppo di competenze a livello di comunità e l'adattamento basato sugli ecosistemi.

Insediamenti umani e riduzione del rischio di disastri

Circa 1,1 miliardi di persone vivono in regioni di montagna; di queste, due terzi abitano in paesi e città. La lontananza delle comunità montane, la complessità dei terreni e la maggiore esposizione ai rischi di catastrofi naturali comportano spesso costi più elevati per trasporti, infrastrutture, beni e servizi. Si tratta di sfide importanti anche per il finanziamento, lo sviluppo e la manutenzione dei sistemi di fornitura idrica e dei servizi igienico-sanitari, delle reti di drenaggio e di altre infrastrutture idrauliche essenziali.

La lontananza delle comunità montane, la complessità dei terreni e la maggiore esposizione ai rischi di catastrofi naturali comportano spesso costi più elevati per trasporti, infrastrutture, beni e servizi

L'urbanizzazione rapida e priva di pianificazione delle zone di montagna sta inoltre causando una pressione sui fragili ecosistemi montani, con conseguenze sulla disponibilità, sulla qualità e sulla sicurezza dell'acqua. Il decentramento delle reti idriche e degli impianti igienico-sanitari può rivelarsi particolarmente efficace nelle regioni montane, riducendo il rischio di danni infrastrutturali causati da terreni frastagliati soggetti a frane frequenti.

Disastri naturali quali frane, terremoti, inondazioni, GLOF e valanghe possono causare danni alle infrastrutture idrauliche e agli impianti igienico-sanitari, ostacolando l'accesso all'acqua e ai servizi igienico-sanitari. Queste catastrofi accrescono la vulnerabilità di comunità montane già vulnerabili e spesso marginalizzate, destabilizzando inoltre alcuni dei settori che generano la loro ricchezza, tra cui agricoltura, turismo e biodiversità.

Tra gli esempi di interventi di adattamento delle regioni montane possiamo citare gli studi di fattibilità per la costruzione di impianti di stoccaggio e di deviazione di emergenza dell'acqua, il rilascio controllato di acqua dai laghi glaciali, la gestione e la pianificazione per l'ottimizzazione dei bacini idrografici, il controllo nel tempo dei cambiamenti dei ghiacciai e l'introduzione di sistemi di riduzione del rischio e di allerta precoce delle GLOF nei bacini idrografici con aree ghiacciate.

Industria ed energia

Le industrie che dipendono dalle risorse idriche si sono sviluppate nelle zone di montagna in cui acqua e altre risorse sono presenti in quantitativi relativamente abbondanti. L'acqua riveste un ruolo essenziale per il settore industriale e per la generazione di energia, come pure per la lavorazione dei minerali, per la produzione di legname e per lo sviluppo del settore turistico nelle zone montane.

La generazione di energia idroelettrica costituisce uno dei principali settori industriali delle aree montane. La presenza di pendii e la forma delle valli montane permette di produrre energia idroelettrica senza che sia necessario costruire dighe e serbatoi di grandi dimensioni. Tuttavia, la costruzione e la presenza di dighe e di serbatoi di stoccaggio, di linee di trasmissione e di centraline potrebbe comportare un significativo impatto negativo sugli ecosistemi montani già fragili.

Al di là della disponibilità di acqua, un'importante sfida per il settore industriale ed energetico è rappresentata dall'altitudine alla quale è possibile operare. Le condizioni correlate con questo fattore possono comportare notevoli investimenti e costi di esercizio; per questa ragione, le attività industriali si limitano di norma a quelle con un elevato ritorno sugli investimenti.

Lo sviluppo del settore industriale ed energetico può influenzare la qualità dell'acqua.

I controlli possono risultare più difficoltosi nelle zone montane più remote, con conseguenti prelievi di acqua e scarichi incontrollati, ivi compreso il rilascio di sostanze inquinanti.

Esistono soluzioni, alcune delle quali attualmente in elaborazione, volte a rendere maggiormente sostenibile la produzione del settore industriale ed energetico nelle zone montane. L'economia circolare promuove la riduzione dell'uso dell'acqua, il riciclaggio dell'acqua utilizzata e il riutilizzo delle risorse idriche. Tecnologie rispettose dell'ambiente includono pratiche quali ad esempio l'impiego di tecnologie meno inquinanti, una migliore gestione delle risorse e un riciclo dei rifiuti efficiente. Rendere più verdi le cosiddette infrastrutture grigie o sostituirle con infrastrutture ecologiche può rivelarsi particolarmente efficace nelle zone montane.

Ambiente

Gli ecosistemi degli altipiani e delle zone di montagna forniscono servizi essenziali alle persone che vivono in questi ambienti, come pure a miliardi di persone che risiedono nelle pianure circostanti. La regolazione delle risorse idriche (inclusi lo stoccaggio dell'acqua e il controllo delle inondazioni) costituisce uno dei servizi di maggiore rilevanza.

Altri servizi ecosistemici essenziali includono la riduzione del rischio di erosione e di frane, la diminuzione delle temperature locali, il sequestro del carbonio, la fornitura di alimenti e fibre e il mantenimento dei *pool* genetici di colture e bestiame adattati alle condizioni locali.

Secondo le stime, le foreste coprono circa il 40% delle aree di montagna, svolgendo così una funzione di protezione contro le calamità naturali grazie alla stabilizzazione dei pendii più ripidi, alla regolazione dei flussi verso gli acquiferi, alla riduzione del deflusso superficiale e dell'erosione del suolo e alla mitigazione del rischio di frane e inondazioni. Una coltivazione arborea insostenibile potrebbe causare l'incremento dell'erosione del suolo e la riduzione dell'infiltrazione dell'acqua in esso.

L'acqua riveste un ruolo essenziale per il settore industriale e per la generazione di energia, come pure per la lavorazione dei minerali, per la produzione di legname e per lo sviluppo del settore turistico nelle zone montane

I suoli delle montagne si sviluppano in condizioni climatiche rigide. Si tratta di suoli notevolmente differenti rispetto a quelli delle pianure, caratterizzati da spessori inferiori e da una maggiore vulnerabilità all'erosione; sono soggetti ad un deterioramento più frequente e più probabile a causa delle attività umane, in particolare in ragione della rimozione della vegetazione, che lascia il suolo scoperto. Il recupero di suoli degradati e dei relativi ecosistemi ad altitudini elevate risulta particolarmente lento.

A livello ecosistemico, molte delle possibilità di intervenire sugli impatti dei cambiamenti della criosfera e dei monti più elevati prevedono la conservazione e il recupero delle funzionalità dell'ecosistema al fine di mantenere o di rafforzare i servizi che esso fornisce a livello locale e regionale grazie a soluzioni basate sulla natura o all'adattamento basato sugli ecosistemi. Si tratta di approcci che vengono ormai considerati comunemente come una componente di adattamento nel quadro dei contributi determinati a livello nazionale da parte di numerosi paesi montani di tutto il mondo.

Prospettive regionali

Africa subsahariana

Il 20% del territorio dell'Africa continentale viene classificato come montuoso con un'altitudine superiore ai 1.000 metri sul livello del mare, con il 5% che si colloca al di sopra dei 1.500 metri. L'Africa orientale è la zona più montuosa dell'intero continente. Le regioni montane sono caratterizzate da elevati livelli di biodiversità; inoltre, sono in grado di fornire servizi ecosistemici e risorse idriche a milioni di persone. Nell'Africa subsahariana tropicale e subtropicale le montagne godono di risorse e di condizioni ambientali più favorevoli rispetto alle pianure circostanti, generalmente molto più aride.

La produzione agricola e la sicurezza alimentare nelle regioni montane e nelle pianure circostanti dipendono strettamente dalle acque montane. Il degrado degli ecosistemi montani ne riduce la capacità di stoccare e fornire acqua a valle. Ciò accade soprattutto quando vengono disboscate zone montane particolarmente importanti.

L'agricoltura costituisce il principale mezzo di sostentamento nelle zone montane dell'Africa subsahariana; per questa ragione, il miglioramento delle pratiche agricole allo scopo di ridurre il degrado dei terreni (conservazione dei suoli) riveste un ruolo essenziale.

La promozione dell'adattamento basato sugli ecosistemi (ad esempio attraverso la riforestazione e la conservazione delle foreste di montagna, con conseguente riduzione dell'erosione del suolo) migliora la conservazione dell'acqua e la ricarica degli acquiferi, oltre a ridurre il rischio di catastrofi naturali.

Le montagne della regione sono caratterizzate da una densità e un tasso di crescita della popolazione elevati, nonché da una povertà diffusa e scarse possibilità di sostentamento alternative e resilienti. In numerose aree le montagne risultano più densamente popolate rispetto alle pianure.

Europa e Asia centrale

Le catene montuose costituiscono la fonte di acqua di numerosi fiumi in Europa e in Asia centrale. La fusione delle nevi alpine e dei ghiacciai consente un lento deflusso di acqua verso le aree a valle. Tuttavia, i cambiamenti climatici stanno causando uno scioglimento stagionale anticipato delle nevi e dei ghiacciai di dimensioni più ridotte, minacciando così la disponibilità di acqua nella stagione estiva. Tutto ciò comporta gravi conseguenze per le popolazioni dei bacini a valle.

I ghiacci alpini stanno scomparendo ad una velocità allarmante

L'acqua proveniente dalle Alpi svolge un ruolo essenziale per numerose regioni del continente europeo. La generazione di energia idroelettrica costituisce la principale causa di prelievo di acqua, che viene utilizzata anche per la produzione industriale, l'irrigazione dei terreni agricoli e gli impianti di innevamento.

I Carpazi ospitano all'incirca il 30% della flora europea. I loro habitat seminaturali, quali pascoli di montagna e prati da fieno, rivestono una grande importanza ecologica e culturale.

Nelle zone montane dell'Asia centrale, mentre i paesi a monte sono interessati da carenze energetiche nei mesi invernali e vorrebbero così espandere la produzione di energia idroelettrica, i paesi a valle dipendono in larga misura dalle acque delle montagne per la produzione agricola nei mesi estivi. Questo conflitto tra le domande stagionali causa tensioni politiche tra i paesi rivieraschi.

Dunque è necessario migliorare e promuovere lo scambio di informazioni e di conoscenze, rafforzare la cooperazione regionale, migliorare le competenze interne di ciascun paese in materia di criosfera e di gestione delle acque di montagna, oltre ad accrescere la consapevolezza e il coinvolgimento delle principali parti interessate nello sviluppo e nell'attuazione dei piani di azione.

America Latina e Caraibi

Le montagne costituiscono circa un terzo del territorio dell'America Latina e dei Caraibi e producono un flusso di acqua per unità di superficie maggiore rispetto a qualunque altro continente. I ghiacciai della regione stanno subendo una notevole riduzione generale del volume: alcuni sono del tutto scomparsi.

L'acqua proveniente dalle montagne svolge un ruolo essenziale per la produzione di colture agricole di alto valore, tra cui caffè e cacao. Le acque di montagna generano inoltre buona parte dell'energia idroelettrica della regione, garantendo la fornitura di energia alle città e alle più piccole comunità a valle, come pure ai villaggi più remoti delle aree montane.

Le aree montane dell'America Latina e dei Caraibi sono sempre più duramente colpite dai cambiamenti climatici e dalle attività umane. Conflitti sociali correlati con l'acqua si sono verificati in zone ad elevata altitudine nei paesi andini; di questi conflitti, molti si sono verificati almeno in parte a causa delle attività di estrazione mineraria, che possono avere un'influenza negativa sulla disponibilità di acqua per gli utenti a valle.

Numerosi paesi hanno reagito approvando norme e politiche volte a proteggere questi ecosistemi così importanti. Ciò nonostante, alcuni ecosistemi hanno già superato abbondantemente la soglia critica; dunque si rende essenziale l'introduzione di misure di adattamento, tra cui ad esempio soluzioni basate sulla natura come la riforestazione, tecniche colturali e ampliamento delle infrastrutture per la raccolta delle acque. Per poter attuare efficacemente queste misure sono necessari finanziamenti mirati, un attento monitoraggio, lo sviluppo di capacità e una governance inclusiva, promuovendo il dialogo con le comunità locali e il loro coinvolgimento, al fine di applicare le migliori procedure disponibili adatte ai contesti specifici delle regioni montane.

Asia e Pacifico

La regione dell'Asia e del Pacifico ospita alcuni dei monti più alti al mondo e buona parte dei sistemi glaciali di maggiori dimensioni. Il cosiddetto Terzo Polo conserva più ghiaccio e neve rispetto a qualunque altra regione, ad esclusione dell'Antartide e dell'Artide. In questa regione hanno origine oltre dieci sistemi fluviali che svolgono un ruolo essenziale per il sostentamento di quasi due miliardi di persone nei bacini idrografici dell'Asia centrale, nordorientale, meridionale e sudorientale. Il Terzo Polo costituisce anche una delle aree al mondo con maggiore diversità biologica e fragilità ecologica, oltre ad ospitare un'ampia varietà di culture.

I ghiacciai alpini della regione stanno scomparendo ad una velocità allarmante, spesso più rapidamente rispetto alla media mondiale. Nel lungo periodo, la riduzione dei flussi di acqua e l'aumento della siccità potranno mettere in pericolo la sicurezza alimentare, idrica, energetica e il sostentamento della regione dell'Hindu Kush Himalaya.

L'utilizzo dell'energia, il degrado ambientale e le attività umane contribuiscono a creare rischi di altro tipo: nel Terzo Polo si sta registrando una presenza sempre più frequente di *black carbon*, metalli pesanti e inquinanti organici persistenti.

Una collaborazione che consenta la partecipazione di diverse parti interessate e dei vari settori colpiti da queste tendenze risulta essenziale. Lo scioglimento dei ghiacciai e le crisi correlate con l'acqua devono essere affrontati attraverso il rafforzamento delle misure di adattamento, la gestione integrata delle risorse idriche e soluzioni sinergiche su clima, natura e inquinamento, sostenute da una collaborazione transfrontaliera, dal dialogo regionale e da attività di promozione e sensibilizzazione.

La regione araba

Le zone montane della regione araba vengono spesso trascurate, nonostante l'importante ruolo che svolgono nell'offrire risorse idriche e altri servizi ecosistemici. Si tratta di zone che ospitano fiorenti comunità e centri di attività economiche per il turismo, l'agricoltura e il settore industriale, che spesso dipendono da risorse di acqua dolce in costante diminuzione, il che determina una riduzione dei quantitativi di acque rinnovabili pro capite.

L'acqua di fusione può svolgere un ruolo cruciale per il settore agricolo, in particolare a sostegno delle colture nel periodo estivo, quando le precipitazioni sono limitate. Nella regione alcune sorgenti alimentate da acquiferi vengono ricaricate principalmente dallo scioglimento delle nevi. In base alle previsioni, nelle catene montuose del Monte Libano e dell'Atlante le nevicate stagionali e i livelli generali delle precipitazioni diminuiranno; ciò influenzerà la durata e lo spessore del manto nevoso, nonché la disponibilità delle risorse di acqua dolce. La riduzione prevista del manto nevoso comporterà una diminuzione generale della disponibilità di acqua, in particolare durante la stagione secca, quando è maggiormente necessaria per l'irrigazione. L'acqua e i servizi igienico-sanitari potrebbero anch'essi essere negativamente influenzati dalla riduzione generale delle risorse idriche nel lungo periodo.

La ricarica controllata degli acquiferi costituisce una misura di adattamento che potrebbe essere sfruttata. L'acqua raccolta durante l'inverno potrebbe essere utilizzata in estate per mitigare la ridotta disponibilità di acqua dovuta agli impatti dei cambiamenti climatici sulle zone montane della regione, ivi compresa la perdita del manto nevoso.

Sviluppo di conoscenze e competenze

L'elevata variabilità del clima, della topografia, della geologia e della vegetazione delle aree montane – tutti elementi che influenzano il movimento delle acque in questo contesto – comporta la necessità di disporre di reti idrometeorologiche che rappresentino efficacemente le aree in oggetto, oltre a sistemi informativi affidabili.

I limiti del monitoraggio della criosfera nelle regioni montane aggravano le incertezze nelle previsioni idro-glaciologiche, aumentando così il rischio di un'errata gestione delle risorse idriche. Per poter comprendere i cambiamenti della criosfera, al fine di migliorare la sostenibilità delle tecniche di mitigazione e di adattamento, è necessario espandere le infrastrutture di osservazione delle zone di alta montagna, oltre a garantire a tutti la possibilità di accedere ai dati.

È necessario espandere le infrastrutture di osservazione delle zone di alta montagna

La partecipazione delle popolazioni indigene e delle comunità locali e una collaborazione significativa con le stesse, una volta avuto il loro consenso informato, insieme alla volontà di apprendere dalle procedure di tutela dei sistemi idrici che si sono evolute nel corso di generazioni, non faranno che migliorare la capacità collettiva di reagire ai cambiamenti della criosfera nelle aree montane e alle differenti condizioni idrologiche delle aree a valle.

A livello istituzionale, è necessario prevedere i tempi e le risorse necessarie per promuovere l'interazione tra prospettive e persone differenti. I modelli di governance collaborativa spesso comportano compromessi che, per quanto possano essere vantaggiosi per la società nel lungo periodo, potrebbero risultare sgraditi a chi beneficia dello *status quo*.

Il coinvolgimento in progetti di scienza partecipata può permettere di promuovere una partecipazione vincolata all'ambiente locale, migliorando le competenze scientifiche e incoraggiando a intraprendere carriere nel settore della ricerca. La collaborazione tra organizzazioni di ricerca e comunità locali, che consente ai ricercatori e alle ricercatrici di sviluppare metodi e progetti di istruzione e formazione, costituisce un approccio comune volto a garantire la possibilità di soddisfare tale requisito. In questo quadro, le popolazioni locali dovrebbero fornire il proprio contributo in merito agli obiettivi del progetto, al fine di garantire che i risultati in termini di conoscenza siano in linea con le necessità delle loro comunità di appartenenza.

Governance e finanziamento

La governance dell'acqua nelle aree montane non ha suscitato lo stesso interesse delle zone di pianura, sulle quali si è concentrata buona parte delle iniziative, ad esempio attraverso la gestione integrata delle risorse idriche.

Le politiche internazionali offrono un promettente sostegno alla governance dell'acqua e all'adattamento ai cambiamenti climatici nelle zone montane. I trattati e le convenzioni svolgono un ruolo rilevante nella promozione di strategie di cooperazione e nella loro attuazione nelle regioni montane.

In alcuni casi le politiche nazionali in materia di acqua, agricoltura, industria ed energia vengono sviluppate al fine di favorire le regioni pianeggianti dei bacini idrografici

Buona parte dei fiumi di maggiori dimensioni nascono nelle zone montane, spesso attraversando confini internazionali. Una governance delle acque transfrontaliere basata su un approccio a livello di bacino incentrato sulle acque montane può garantire vantaggi ai paesi rivieraschi. La cooperazione regionale tra paesi, ivi comprese le iniziative di governance dei bacini idrografici, costituisce un meccanismo di particolare rilevanza per la promozione dell'adattamento climatico nelle aree montane. Tuttavia, la presenza di conflitti tra interessi nazionali nel contesto degli accordi sulle acque transfrontaliere e l'inefficacia delle istituzioni nel promuovere il coordinamento con il contesto locale hanno ostacolato una cooperazione efficace.

La gestione delle acque montane si svolge principalmente all'interno dei confini dei paesi, attraverso norme di legge, politiche e strategie nazionali. In alcuni casi le politiche nazionali in materia di acqua, agricoltura, industria ed energia vengono sviluppate al fine di favorire le regioni pianeggianti dei bacini idrografici, ad esempio con l'obiettivo di avvantaggiare le aree maggiormente popolate. Spesso le politiche nazionali potrebbero non riflettere appieno le problematiche settoriali relative all'acqua nelle zone montane; piuttosto, tendono a focalizzarsi sulle montagne come fonti per gli utenti localizzati a valle.

Lo sviluppo nelle zone montane risulta generalmente più costoso e complesso rispetto alle zone pianeggianti in ragione dei terreni frastagliati e della scarsa accessibilità, oltre alle limitazioni delle economie di scala, alla notevole distanza dai porti marittimi e dai centri economici e ad uno scarso sviluppo del settore industriale e dei servizi.

I costi relativi a trasporti, infrastrutture, beni e servizi aumentano di pari passo con l'altitudine e l'isolamento. Questi elementi vanno considerati nelle politiche e nelle misure di finanziamento, insieme alla necessità di politiche e programmi specifici per le zone montane nel quadro dei piani di sviluppo nazionali e globali.

Il finanziamento delle misure di adattamento climatico, l'inclusione del settore privato e il contributo di quest'ultimo costituiscono fattori chiave per conseguire potenziali misure di adattamento per le aree montane. Per quanto in teoria siano disponibili finanziamenti sostanziali per investimenti nello sviluppo sostenibile delle regioni montane, l'accesso ai principali programmi di sostegno si è rivelato alquanto limitato. Di conseguenza, le possibilità di intervento in materia non sono state sfruttate in modo adeguato. Più nello specifico, fondi innovativi e accessibili a livello internazionale, regionale, nazionale e locale dovrebbero essere utilizzati a sostegno di una pianificazione in materia di acqua, agricoltura ed energia, nonché per investimenti infrastrutturali.

Epilogo

Le montagne forniscono acqua dolce fondamentale per la vita di miliardi di persone e innumerevoli ecosistemi. Si tratta di vere e proprie torri d'acqua, il cui ruolo essenziale a favore dello sviluppo sostenibile non può assolutamente essere ignorato.

È necessario agire per promuovere una più profonda comprensione e protezione di questi ambienti così fragili, sempre più minacciati dai cambiamenti climatici e da attività umane insostenibili.

Nulla di tutto ciò che accade sulle montagne rimane sulle montagne.

In un modo o in un altro, viviamo tutti ai piedi di qualche montagna.

Prologo

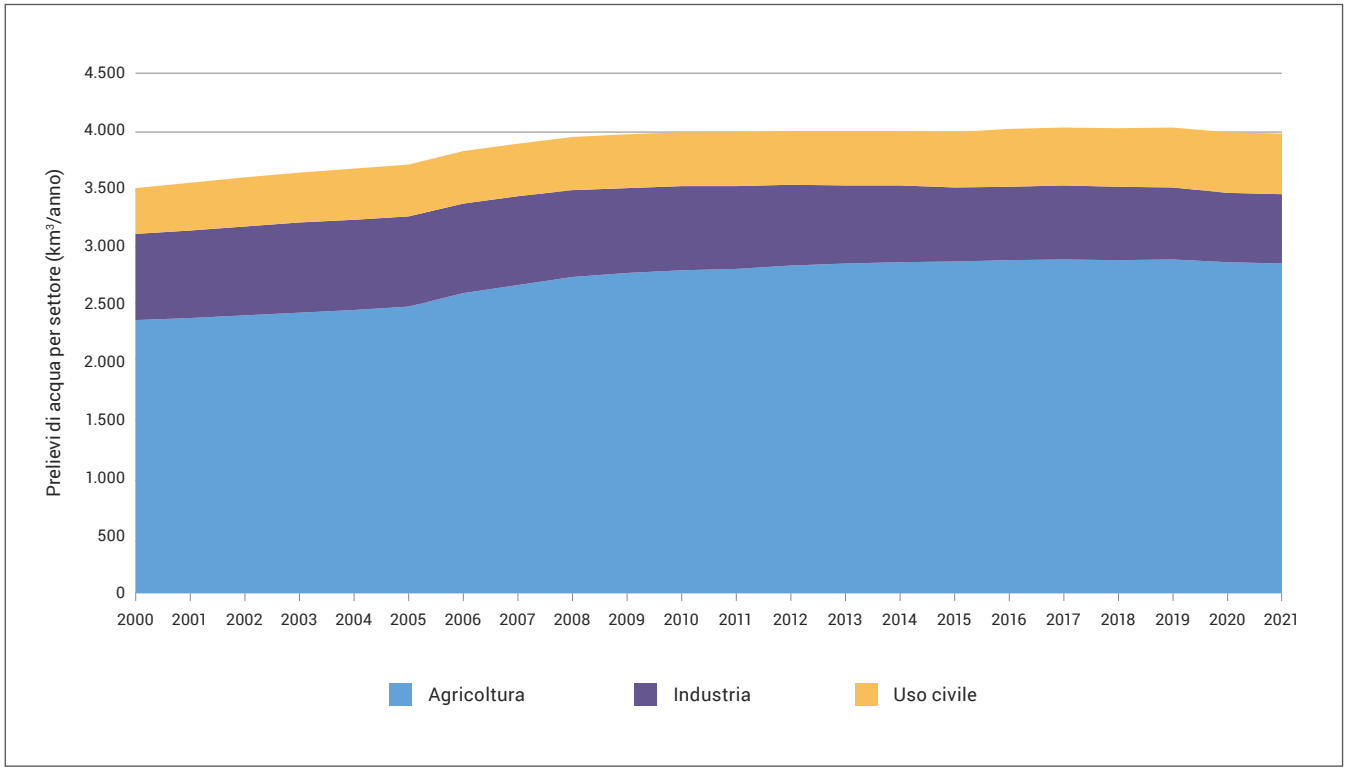
UNESCO WWAP
Richard Connor, Chorong Ahn e Beobkyung Kim

Tendenze della domanda e della disponibilità di acqua

Secondo le più recenti stime a livello mondiale, datate 2021, il settore agricolo si colloca in prima posizione per il totale dei prelievi di acqua (72%), seguito dal settore industriale (15%) e dall'uso domestico (o civile, 13%; FAO, s.d.; figura P.1).

Nel periodo 2000-2021, i prelievi totali di acqua dolce sono cresciuti del 14% a livello globale (da 3.500 chilometri cubi nel 2000 a poco meno di 4.000 nel 2021), con un aumento medio dello 0,7% all'anno. Tuttavia, questa crescita non è stata uniforme tra i vari settori. L'aumento maggiore si è verificato nel settore agricolo (che preleva l'acqua per l'irrigazione, l'allevamento e l'acquacoltura), e ha rigurdato anche gli usi civili (che comprendono soprattutto i prelievi destinati all'uso diretto da parte della popolazione). I prelievi di acqua dolce da parte del settore industriale (autoalimentata) sembrano essere diminuiti nello stesso periodo di circa il 20% (tabella P.1).

Figura P.1 Prelievi totali di acqua a livello mondiale per settore di utilizzo principale, 2000-2021 (km³/anno)



Fonte: autori, sulla base dei dati di AQUASTAT (FAO, s.d.).

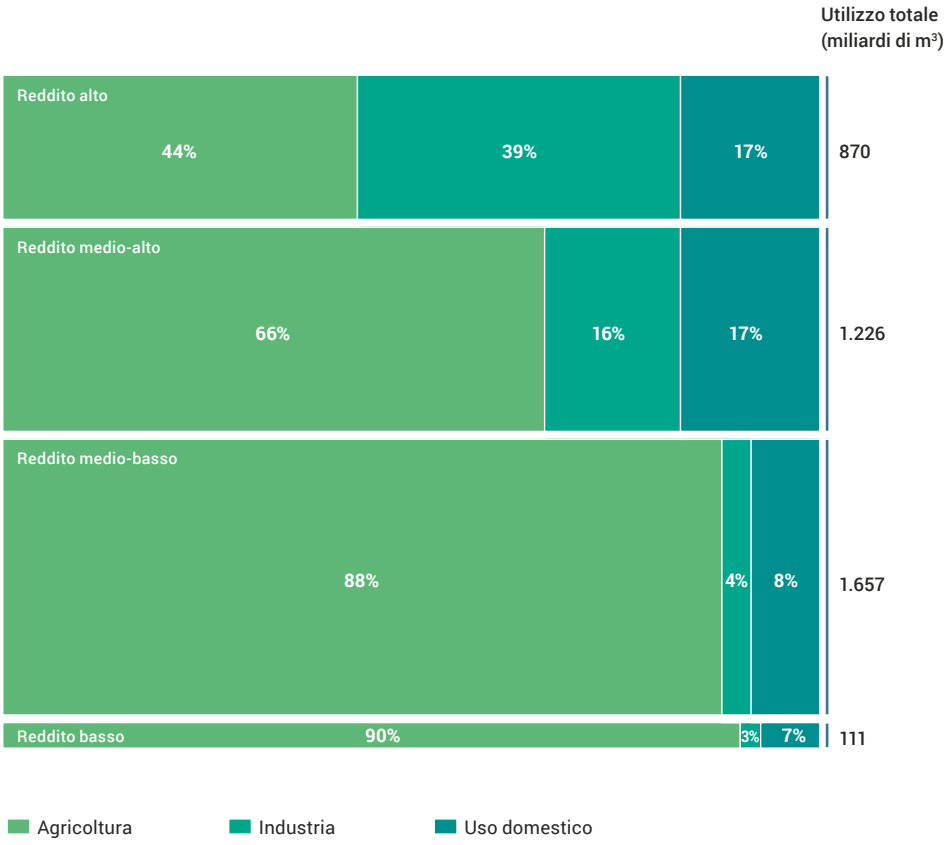
I prelievi di acqua dolce effettuati dai vari settori variano notevolmente in funzione del livello di sviluppo economico dei paesi. I paesi a più alto reddito utilizzano più acqua per l'industria, mentre quelli a più basso reddito utilizzano il 90% (o più) dell'acqua per l'irrigazione agricola (figura P.2).

Tabella P.1 Prelievi globali di acqua dolce per settore, 2000 e 2021

Anno	Settore agricolo		Settore industriale		Uso civile	
	Volume (km³)	Percentuale del totale (%)	Volume (km³)	Percentuale del totale (%)	Volume (km³)	Percentuale del totale (%)
2000	2.365	67	746	21	396	11
2021	2.855	72	601	15	528	13

Fonte: autori, sulla base dei dati di AQUASTAT (FAO, s.d.).

Figura P.2
Prelievo di acqua per settore (% del prelievo totale di acqua dolce) per livello di reddito, 2020



Nota: i dati del settore "domestico" in questa figura sono gli stessi del settore "civile" nella figura P.1 e nella tabella P.1.

Fonte: Kashiwase e Fujs (2023, sulla base dei dati di AQUASTAT). Licenza CC BY 3.0 IGO.

L'aumento della domanda di acqua si verifica soprattutto nelle città, nei paesi e nelle regioni in rapido sviluppo economico

Tuttavia, non è chiaro in quale misura la diminuzione dei prelievi del settore industriale, di cui sopra, sia legata a una maggiore efficienza nell'uso dell'acqua da parte dello stesso settore nei paesi a reddito medio-alto; questo è un argomento che meriterebbe un approfondimento.

Le tendenze future della domanda di acqua sono notoriamente difficili da stimare (Nazioni Unite, 2023). In generale, l'aumento della domanda è dovuto principalmente allo sviluppo socioeconomico e ai relativi cambiamenti nei modelli di consumo, compresa l'alimentazione. Tale aumento si verifica soprattutto nelle città, nei paesi e nelle regioni in rapido sviluppo economico, in particolare nelle economie emergenti. Tuttavia, la crescita della popolazione non sembra svolgere un ruolo molto significativo. Infatti, i paesi in cui l'uso di acqua pro capite è più basso, tra cui diversi Stati dell'Africa subsahariana, sono spesso quelli con la popolazione in più rapida crescita (Nazioni Unite, 2024a).

Sebbene le definizioni siano varie, la disponibilità (o scarsità) di acqua può essere vista come una misura puramente volumetrica, mentre lo stress idrico corrisponde alla disponibilità in funzione della domanda (cioè la capacità o meno di soddisfare la domanda umana ed ecologica di acqua).

Venticinque paesi, che ospitano un quarto della popolazione mondiale, devono affrontare ogni anno uno stress idrico estremamente elevato (Kuzma et al., 2023). Dato che la disponibilità di acqua varia generalmente in base

al luogo e al periodo, le medie annuali possono mascherare gravi carenze (cioè stress) che possono verificarsi durante mesi o stagioni specifiche nel corso dell'anno. Il Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico stima che circa quattro miliardi di persone, ossia la metà dell'intera popolazione mondiale, sarebbero soggetti a una grave scarsità idrica per almeno una parte dell'anno (IPCC, 2023).

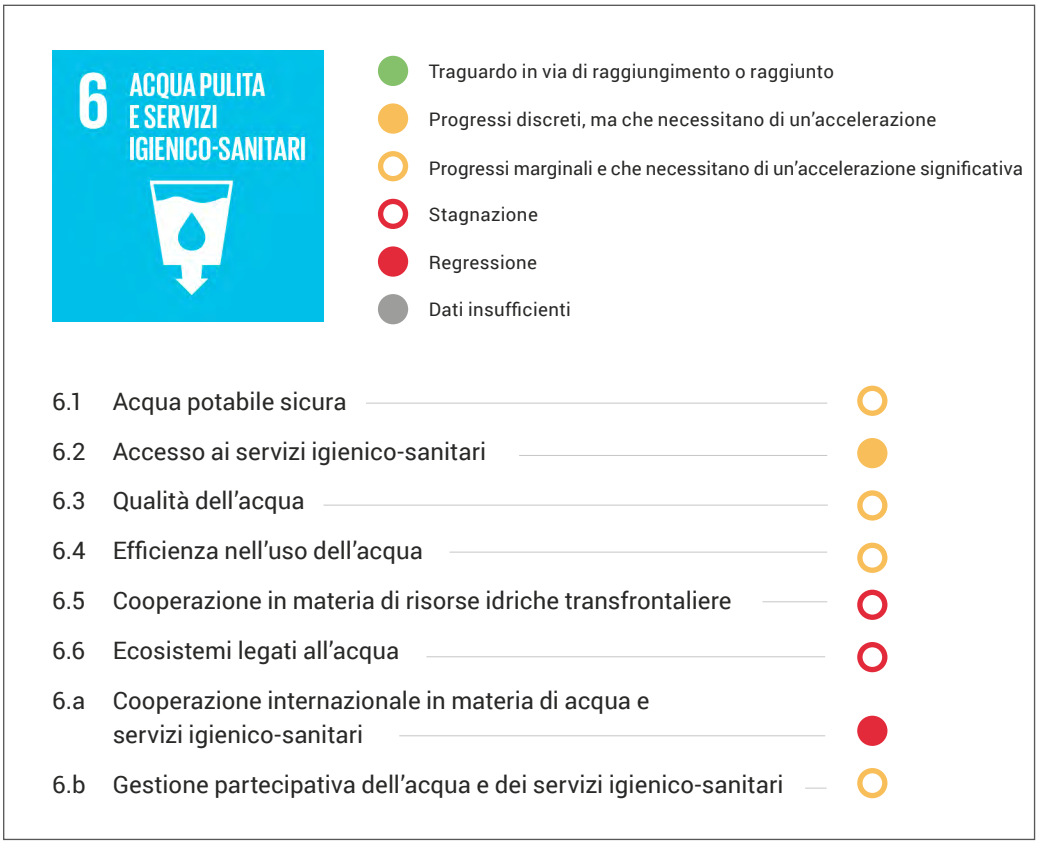
I cambiamenti climatici stanno aumentando la variabilità stagionale di acqua e l'incertezza sulla sua disponibilità nella maggior parte delle regioni (UNESCO/UN-Water, 2020; IPCC, 2023). L'inquinamento, il degrado del suolo e degli ecosistemi, nonché i rischi naturali, possono ulteriormente compromettere la disponibilità delle risorse idriche e i settori che ne dipendono.

I progressi verso il conseguimento dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6

L'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 mira a garantire la disponibilità e la gestione sostenibile dell'acqua e dei servizi igienico-sanitari per tutti. È dedicato ad acqua potabile, servizi igienico-sanitari e igiene, gestione sostenibile delle risorse idriche, qualità dell'acqua, gestione integrata delle risorse idriche (IWRM nell'acronimo inglese), ecosistemi legati all'acqua e ambiente ad essi favorevole.

I progressi verso il conseguimento di tutti i traguardi dell'Obiettivo 6 presentano ritardi, in alcuni casi anche gravi (figura P.3). Le lacune nei dati e le carenze nelle attività di monitoraggio continuano a impedire una valutazione accurata e un'attuazione efficace degli interventi necessari[1].

Figura P.3
Stato di avanzamento verso i traguardi dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6, 2024



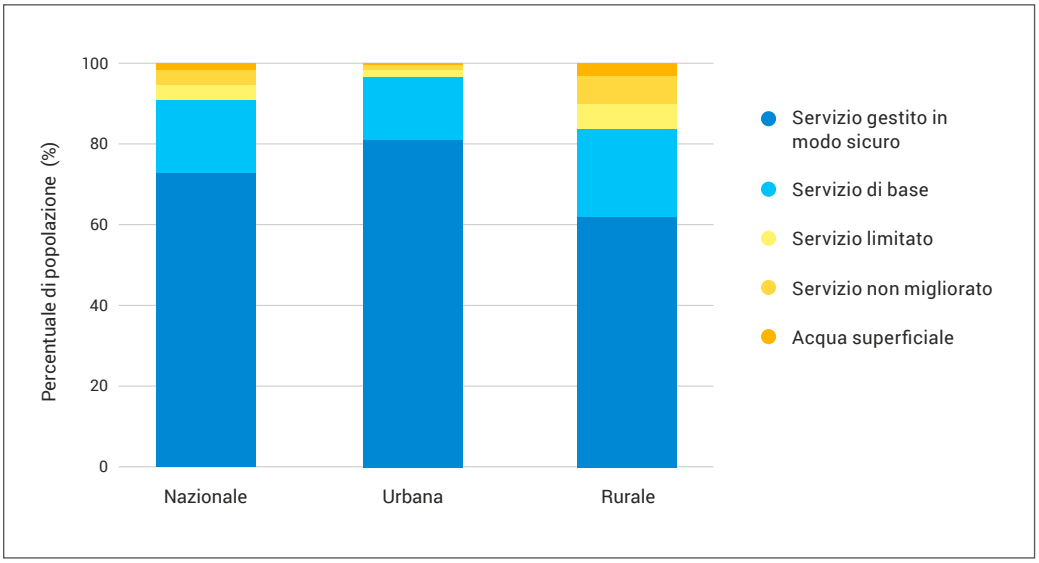
Fonte: Nazioni Unite (s.d.a).

[1] Per metriche dettagliate e aggiornate, informazioni supplementari e link a rapporti di base sui progressi compiuti verso tutti i traguardi e gli indicatori dell'Obiettivo 6, consultare il sito www.sdg6data.org.

Traguardo 6.1: Acqua potabile sicura

Si stima che circa 2,2 miliardi di persone (il 27% della popolazione mondiale) non avessero accesso ad acqua potabile gestita in modo sicuro nel 2022 (figura P4). Quattro persone su cinque sprovviste di servizi di base per la fornitura di acqua potabile vivevano in aree rurali. Il divario riguardo alla copertura tra aree urbane e rurali era maggiore nell'Africa subsahariana e in America Latina e Caraibi (UNICEF/OMS, 2023).

Figura P.4
Percentuale di popolazione che utilizza servizi di acqua potabile gestiti in modo sicuro, 2022



Fonte: Nazioni Unite (s.d.b), sulla base dei dati UNICEF/OMS (2023).

Traguardo 6.2: Accesso ai servizi igienico-sanitari

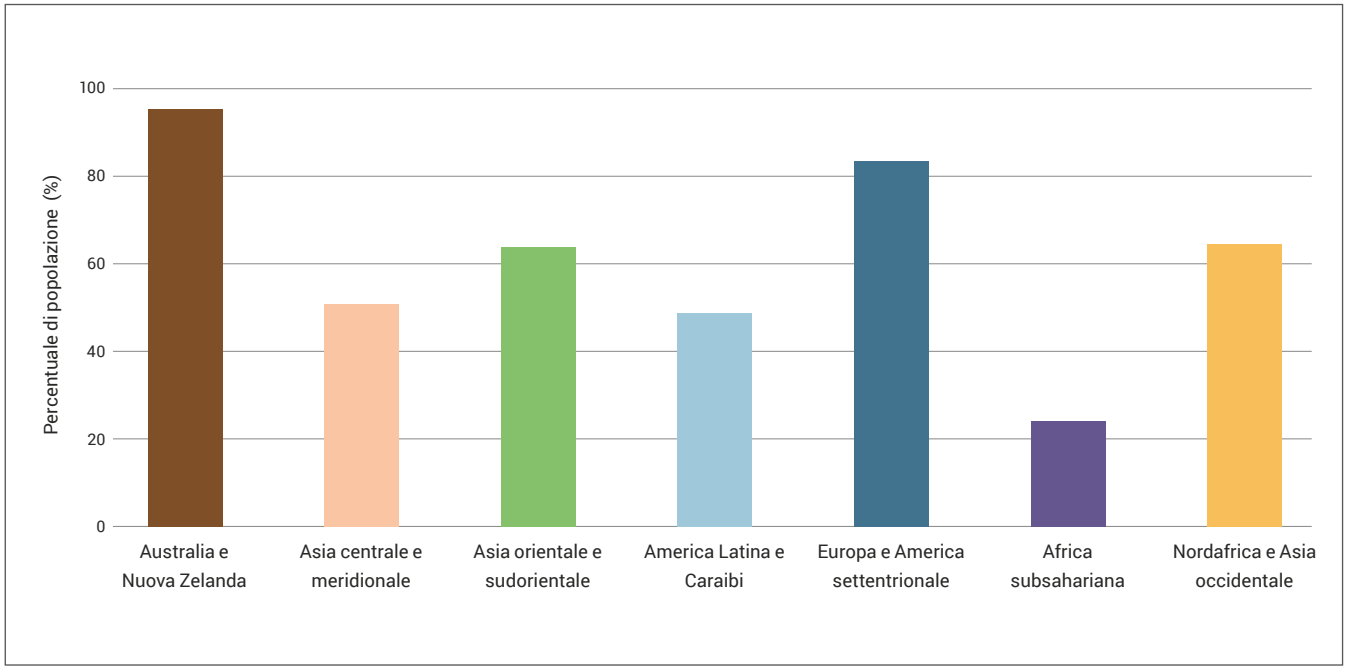
Nel 2022, 3,5 miliardi di persone nel mondo non avevano accesso a servizi igienico-sanitari gestiti in modo sicuro (UNICEF/OMS, 2023). La situazione era particolarmente critica nell'Africa subsahariana, dove solo il 24% della popolazione utilizzava servizi igienico-sanitari gestiti in modo sicuro. Queste limitazioni si registrano anche in altre regioni, come l'America Latina e i Caraibi e l'Asia centrale e meridionale, dove solo il 50% circa della popolazione aveva accesso a questi servizi (figura P.5).

Traguardo 6.3: Qualità dell'acqua

L'indicatore 6.3.1 monitora la percentuale dei flussi di acque reflue totali (industriali e domestiche) trattati in sicurezza, in conformità con gli standard nazionali o locali. La componente domestica comprende le acque reflue e i fanghi fecali, trattati *in loco* e non connessi all'indicatore 6.2.1a, relativo ai servizi igienico-sanitari. Sfortunatamente, «c'è un'allarmante mancanza di statistiche sulle acque reflue nei vari paesi del mondo» e «i dati sono insufficienti per stabilire statistiche globali sulla percentuale di acque reflue totali trattate e di quelle trattate in sicurezza» (UN-Habitat/OMS, 2024, pag. xiii).

Nel 2023, i dati su 91.000 corpi idrici in 120 paesi hanno rivelato che il 56% aveva una buona qualità dell'acqua (Nazioni Unite, 2024b). «Tuttavia, la raccolta dei dati e il *reporting* sui parametri di base della qualità dell'acqua sono al di là delle capacità di molti paesi a basso e medio reddito. Nel 2023, oltre due milioni di misurazioni della qualità dell'acqua sono state utilizzate per fornire informazioni su questo indicatore [6.3.2], ma la metà dei paesi a basso reddito a livello mondiale hanno contribuito per meno del 3% sul totale delle misurazioni (60.000)» (UNEP, 2024a, pagg. ix-x).

Figura P.5 Percentuale di popolazione che utilizza servizi igienico-sanitari gestiti in modo sicuro (indicatore dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6.2.1a) in diverse regioni, 2022



Fonte: Nazioni Unite (s.d.c.), sulla base dei dati UNICEF/OMS (2023).

Traguardo 6.4: Efficienza nell'uso dell'acqua e livello di stress idrico

«Aumentando l'efficienza nell'uso dell'acqua, ad esempio riparando le perdite dei sistemi di distribuzione, utilizzando colture che richiedono meno acqua e investendo in nuove tecnologie, si ottengono sistemi di produzione alimentare e industriale più sostenibili. Il risparmio idrico è spesso associato anche al risparmio energetico, poiché è necessario estrarre, trattare, trasportare e riscaldare meno acqua» (Nazioni Unite, s.d.d.). L'indicatore 6.4.1 monitora la variazione dell'efficienza nell'uso dell'acqua nel tempo, stimata come rapporto tra il valore aggiunto in dollari e il volume d'acqua utilizzato.

L'efficienza varia notevolmente, influenzata dalla struttura economica di un dato paese e dalla distribuzione dell'acqua tra i vari settori. Ad esempio, «nel 2021, le stime variavano da meno di tre dollari al metro cubo nelle economie dipendenti dall'agricoltura a oltre 50 dollari al metro cubo in quelle altamente industrializzate e basate sui servizi. Nonostante l'efficienza nell'uso dell'acqua sia mediamente aumentata a livello globale, nel 58% circa dei paesi risulta ancora bassa (meno di 20 dollari al metro cubo)» (Nazioni Unite, 2024b, pag. 21).

Il monitoraggio dei livelli di stress idrico fornisce una stima della pressione esercitata da tutti i settori sulle risorse rinnovabili di acqua dolce di un dato paese. L'indicatore 6.4.2 ha raggiunto il 18,6% nel 2021, con un aumento del 2,7% dal 2015 (FAO/UN-Water, 2024).

Traguardo 6.5: Cooperazione in materia di risorse idriche transfrontaliere

Su 153 paesi che condividono fiumi, laghi e acquiferi transfrontalieri, solo 43 hanno accordi operativi sul 90% o più delle loro acque transfrontaliere; solo 26 paesi hanno tutte le loro acque transfrontaliere regolate da accordi di questo tipo (UNECE/UNESCO/UN-Water, 2024).

L'indicatore 6.5.1 misura il grado di attuazione della gestione integrata delle risorse idriche. «I progressi globali nell'attuazione della gestione integrata delle risorse idriche rimangono tuttavia lenti, passando da un punteggio del 49% nel 2017 a solo il 57% nel 2023. Sono necessari sforzi significativi per accelerare tali progressi, in particolare in Asia centrale e meridionale, America Latina e Caraibi, Oceania e Africa subsahariana» (Nazioni Unite, 2024b, pag. 21).

Traguardo 6.6: Ecosistemi legati all'acqua

Questo traguardo persegue l'ambizioso fine di proteggere e ripristinare gli ecosistemi legati all'acqua su ampia scala, tra cui montagne, foreste, zone umide, fiumi, acquiferi e laghi. Nello specifico, non viene calcolato a livello globale, dunque non fornisce informazioni sull'obiettivo espresso in termini di numero o area di ecosistemi legati all'acqua che necessitano di protezione e/o ripristino. Tuttavia, «le tendenze dei dati dell'indicatore 6.6.1 mostrano che gli ecosistemi legati all'acqua continuano ad affrontare livelli significativi di degrado. Ciò è dovuto principalmente all'inquinamento, alle dighe, alla conversione dei terreni, all'estrazione eccessiva e ai cambiamenti climatici» (UNEP, 2024b, pag. 2).

Traguardo 6.a: Cooperazione internazionale in materia di acqua e servizi igienico-sanitari

Gli aiuti pubblici allo sviluppo (APS) destinati al settore idrico sono diminuiti costantemente dal 2018 al 2020, per poi aumentare dell'11% fino a 9,1 miliardi di dollari nel 2021 (Nazioni Unite, s.d.e). «Tuttavia, la percentuale degli APS destinati al settore idrico sul totale degli APS destinati a tutti i settori è scesa al 3,2% nel 2022, un minimo storico, in linea con una tendenza al ribasso che ha visto un'accelerazione dall'inizio della pandemia da COVID-19 nel 2020» (OMS, 2024, pag. 40).

Traguardo 6.b: Gestione partecipativa dell'acqua e dei servizi igienico-sanitari

Nel periodo 2021-2022, oltre il 90% dei paesi ha dichiarato di avere procedure di partecipazione, definite nelle norme di legge o nelle politiche, in materia di acqua potabile e gestione delle risorse idriche in ambito rurale. Tuttavia, «meno di un terzo dei paesi ha registrato una partecipazione elevata o molto elevata delle comunità ai processi di pianificazione e gestione» (OMS, 2022, pag. 48).

Riferimenti bibliografici

FAO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura). s.d. AQUASTAT Dissemination System. Sito web della FAO. https://data.apps.fao.org/aquastat/?lang=en. (Consultato il 2 dicembre 2024.)

FAO/UN-Water (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura/UN-Water). 2024. *Progress on the Level of Water Stress - Mid-Term Status of SDG Indicator 6.4.2 and Acceleration Needs, with Special Focus on Food Security*. Roma, FAO. doi.org/10.4060/cd2179en.

IPCC (Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico). 2023. Summary for policy makers. H. Lee and J. Romero (a cura di), *Climate Change 2023*: *Synthesis Report*. Contributo dei gruppi di lavoro I, II e III al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sui cambiamenti climatici. Ginevra, IPCC, pagg. 1-34. www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf.

Kashiwase, H. e Fujs, T. 2023. Strains on freshwater resources. A. F. Pirlea, U. Serajuddin, A. Thudt, D. Wadhwa e M. Welch (a cura di), *Atlas of Sustainable Development Goals 2023*. Washington DC, Banca mondiale. doi.org/10.60616/93he-j512.

Kuzma, S., Saccoccia, L. e Chertock, M. 2023. 25 Countries, Housing One-quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress. Sito web del World Resources Institute. www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries.

Nazioni Unite. 2023. *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2023: Partenariati e cooperazione per l'acqua*. Parigi, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO). https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384819.

——. 2024a. *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2024: L'acqua per la prosperità e la pace*. Parigi, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO). https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000389107.

——. 2024b. *The Sustainable Development Goals Report 2024*. New York, Nazioni Unite. https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/.

——. s.d.a. SDG Progress by Target. Sito web delle Nazioni Unite. https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/sdg-progress-by-target/. (Consultato il 2 dicembre 2024.)

——. s.d.b. Progress on Drinking Water (SDG Target 6.1). Sito web delle Nazioni Unite. www.sdg6data.org/en/indicator/6.1.1. (Consultato il 2 dicembre 2024.)

——. s.d.c. Progress on Sanitation (SDG Target 6.2). Sito web delle Nazioni Unite. www.sdg6data.org/en/indicator/6.2.1a. (Consultato il 4 dicembre 2024.)

——. s.d.d. Progress on Water-Use Efficiency (SDG Target 6.4). Sito web delle Nazioni Unite. www.sdg6data.org/en/indicator/6.4.1. (Consultato il 4 dicembre 2024.)

——. s.d.e. Progress on International Water Cooperation (SDG Target 6.a). Sito web delle Nazioni Unite. www.sdg6data.org/en/indicator/6.a.1. (Consultato il 2 dicembre 2024.)

OMS (Organizzazione mondiale della sanità). 2022. *Strong Systems and Sound Investments: Evidence on and Key Insights into Accelerating Progress on Sanitation, Drinking-Water and Hygiene. UN-Water Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-Water (GLAAS) 2022 Report*. Geneva, OMS. https://iris.who.int/handle/10665/365297.

——. 2024. *World Health Statistics 2024: Monitoring Health for the SDGs, Sustainable Development Goals*. Ginevra, OMS. https://iris.who.int/handle/10665/376869.

UNECE/UNESCO/UN-Water (Commissione economica delle Nazioni Unite per l'Europa/Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura/UN-Water). 2024. *Progress on Transboundary Water Cooperation: Mid-Term Status of SDG Indicator 6.5.2, with a Special Focus on Climate Change*. Ginevra/Parigi, Nazioni Unite/UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391407?posInSet=1&queryId=1951bc54-df3b-44b4-9005-be568735fb16.

UNEP (Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente). 2024a. *Progress on Ambient Water Quality: Mid-Term Status of SDG Indicator 6.3.2 and Acceleration Needs, with a Special Focus on Health*. Nairobi, UNEP. www.unwater.org/publications/progress-ambient-water-quality-2024-update.

——. 2024b. *Progress on Water-Related Ecosystems: Mid-Term Status of SDG Indicator 6.6.1 and Acceleration Needs with a Special Focus on Biodiversity*. Nairobi, UNEP. www.unwater.org/publications/progress-water-related-ecosystems-2024-update.

UNESCO/UN-Water (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura/UN-Water). 2020. *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2020: Acqua e cambiamento climatico*. Parigi, UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000377847.

UN-Habitat/OMS (Programma delle Nazioni Unite per gli insediamenti umani/Organizzazione mondiale della sanità). 2024. *Progress on the Proportion of Domestic and Industrial Wastewater Flows Safely Treated - Mid-Term Status of SDG Indicator 6.3.1 and Acceleration Needs, with a Special Focus on Climate Change, Wastewater Reuse and Health*. Nairobi/Ginevra, UN-Habitat/OMS. www.unwater.org/publications/progress-wastewater-treatment-2024-update.

UNICEF/OMS (Fondo delle Nazioni Unite per l'infanzia/Organizzazione mondiale della sanità). 2023. *Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2022: Special Focus on Gender*. New York, UNICEF/OMS. www.who.int/publications/m/item/progress-on-household-drinking-water--sanitation-and-hygiene-2000-2022---special-focus-on-gender.

Capitolo 1

Introduzione

UNESCO WWAP
Richard Connor e Philippus Wester
Con il contributo di James Thornton (Università di Berna)

I flussi d'acqua provenienti dalle montagne diventeranno più imprevedibili, incerti e variabili

Le montagne, spesso definite "torri d'acqua" del mondo, svolgono un ruolo unico e fondamentale nel ciclo globale dell'acqua. Influenzano la circolazione atmosferica, che determina i regimi meteorologici e di precipitazione. Possono immagazzinare l'acqua sotto forma di ghiaccio e neve durante le stagioni fredde, rilasciandola durante le stagioni più calde come principale fonte di acqua dolce per gli utenti a valle.

Le acque di montagna sono fondamentali per soddisfare i bisogni umani primari, come l'approvvigionamento idrico e i servizi igienico-sanitari. Sono essenziali per garantire la sicurezza alimentare ed energetica (dall'agricoltura irrigua all'energia idroelettrica e al raffreddamento delle centrali termiche) a miliardi di persone che vivono nelle regioni montane e nelle aree a valle. Inoltre, sostengono la crescita economica attraverso varie industrie che dipendono dall'acqua.

Anche i ghiacciai alpini[2] immagazzinano e rilasciano acqua, sebbene in tempi lunghi. Mentre i ghiacciai continentali, in particolare quelli dell'Antartide e della Groenlandia, conservano grandi quantità di acqua dolce sotto forma di ghiaccio, i ghiacciai montani hanno un impatto molto più diretto sulla disponibilità di tale risorsa per soddisfare le esigenze umane nell'immediato e nel prossimo futuro.

Ecosistemi montani sani favoriscono la regolazione dei flussi, la ricarica degli acquiferi e la ritenzione dei sedimenti, oltre ad altri servizi ambientali. Spesso comprendono specie vegetali, animali e microbiche robuste, pur essendo fragili e vulnerabili ai rapidi cambiamenti della copertura del suolo e del clima. Attraverso i processi di erosione e sedimentazione, le regioni montane forniscono anche nutrienti essenziali (ad esempio, minerali) che sostengono gli ecosistemi terrestri, estuariali e costieri e rendono fertili i terreni a valle. Ciò nonostante, le regioni montane spesso non vengono considerate nel contesto degli Obiettivi di sviluppo sostenibile, ad eccezione dei traguardi 6.6, 15.1 e 15.4.

I cambiamenti climatici stanno accelerando lo scioglimento dei ghiacciai, riducendo il manto nevoso, aumentando il disgelo del permafrost, causando eventi piovosi più estremi e rischi naturali. I flussi d'acqua provenienti dalle montagne diventeranno più imprevedibili, incerti e variabili. I cambiamenti nei tempi e nei volumi dei flussi massimi e minimi, oltre all'aumento dell'erosione e dei carichi di sedimenti, influenzeranno le risorse idriche a valle in termini di quantità, regolarità e qualità (Alder et al., 2022). Molte strategie di adattamento ai cambiamenti climatici in montagna sono fondamentalmente legate all'acqua. Tuttavia, sebbene le regioni montane si stiano riscaldando più rapidamente rispetto alle pianure, l'attuale ritmo, incisività e portata delle misure di adattamento (in gran parte incrementali) nelle regioni montane sono insufficienti per affrontare i rischi futuri per la sicurezza idrica globale.

L'inquinamento e il deterioramento della qualità dell'acqua a monte si ripercuotono invariabilmente sugli utenti a valle. Sebbene si sappia poco sulle tendenze della qualità dell'acqua nelle regioni montane, è sempre più evidente l'aumento della produzione di sedimenti nelle aree di alta montagna a causa dei cambiamenti nell'uso del suolo (ad esempio, la deforestazione), dei cambiamenti climatici e del degrado della criosfera (Li et al., 2021).

[2] I ghiacciai alpini sono quei ghiacciai confinati dal terreno montuoso circostante; sono chiamati anche ghiacciai montani.

Le popolazioni delle aree pianeggianti vedranno un ulteriore aumento della loro dipendenza dalle risorse idriche di montagna, già elevata, entro la metà del secolo, soprattutto a causa dello sviluppo socioeconomico. Ciò mette in luce l'urgenza di migliorare la governance dei sistemi idrici di montagna attraverso la gestione integrata dei bacini idrografici, la finanza e lo sviluppo di conoscenze e competenze, al fine di soddisfare la crescente domanda di acqua a livello mondiale.

Le precedenti edizioni del *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche* hanno dedicato solo un'attenzione limitata alla criosfera[3] – compresi i ghiacciai, le dinamiche del manto nevoso e del permafrost – o ai sistemi alpini, entrambi strettamente correlati. In linea con la designazione del 2025 come Anno internazionale per la conservazione dei ghiacciai (Assemblea generale delle Nazioni Unite, 2022a) e con la risoluzione sullo sviluppo sostenibile delle montagne del 2022 (Assemblea generale delle Nazioni Unite, 2022b), la presente edizione intende richiamare l'attenzione mondiale sull'importanza delle acque di montagna, ivi compresi i ghiacciai alpini, nel quadro dello sviluppo sostenibile delle regioni montane e delle società a valle che da esse dipendono, con particolare attenzione agli impatti di una criosfera montana in rapido cambiamento.

Per questo motivo, la presente edizione del rapporto esamina:

- le dinamiche relative alle montagne e ai ghiacciai alpini e il loro ruolo nel ciclo globale dell'acqua, in qualità di torri d'acqua, dal punto di vista della gestione delle risorse, con implicazioni sull'approvvigionamento, lo stoccaggio e la qualità dell'acqua;

- i servizi e i benefici che le acque di montagna forniscono a sostegno delle società, delle economie e dell'ambiente, evidenziando le sfide per gli utenti (ad esempio, gli insediamenti umani, l'agricoltura e l'industria) e le opportunità (potenziali benefici) in termini di approvvigionamento idrico e servizi igienico-sanitari, mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici, sicurezza alimentare ed energetica e protezione, ripristino e manutenzione degli ecosistemi.

Il rapporto cerca anche di coltivare una visione da una prospettiva di bacino, considerando la gestione integrata delle risorse idriche, l'approccio "dalla sorgente al mare", la cooperazione transfrontaliera e altri simili approcci di interconnessione. Tuttavia, si concentra principalmente sulle sfide a monte e sui relativi interventi, con particolare attenzione ai ghiacciai, alla criosfera e ai sistemi alpini, facendo riferimento agli ultimi indicatori chiave elaborati a livello globale e alle conoscenze più avanzate.

1.1 Le aree montane nel mondo

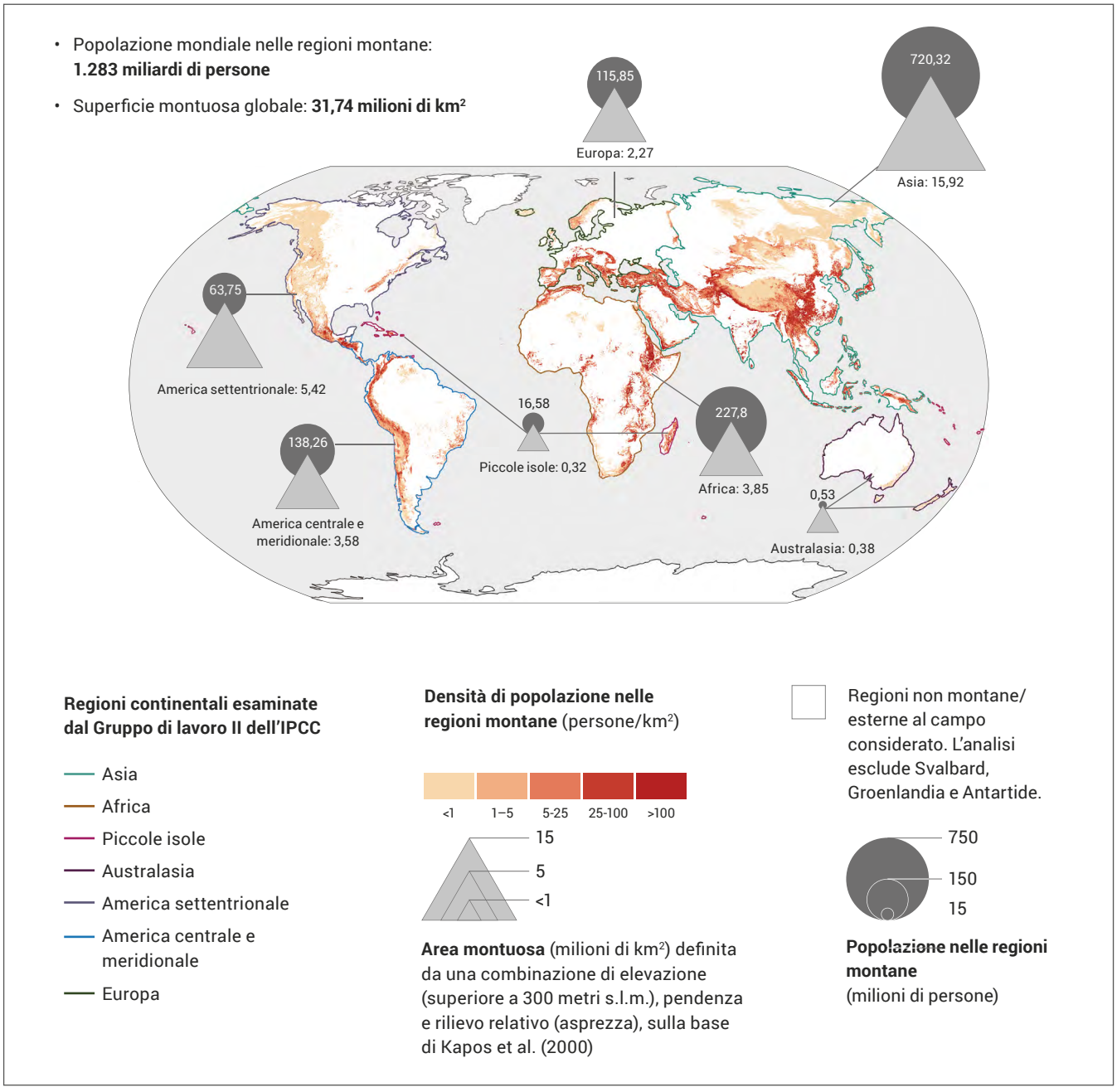
Dalla fine degli anni '90 sono state sviluppate diverse delimitazioni delle regioni montane del mondo, basate su modelli digitali di elevazione (Thornton et al., 2022) e culminate con quella del World Conservation Monitoring Centre del Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente nel 2000 (riquadro 1.1; Kapos et al., 2000). Tale delimitazione viene utilizzata attualmente per l'attività di *reporting* nell'ambito dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile.

[3] La parte della superficie terrestre coperta dall'acqua in forma solida, come i ghiacciai, le calotte di ghiaccio, la neve, il terreno perennemente ghiacciato (permafrost), il ghiaccio dei laghi e dei fiumi, le lastre di ghiaccio e il ghiaccio marino. La criosfera costituisce una componente importante dell'idrosfera e del ciclo globale dell'acqua.

In base alla delimitazione del World Conservation Monitoring Centre, le regioni montane coprono circa 33 milioni di chilometri quadrati, ossia il 24% della superficie terrestre globale, escludendo l'Antartide (Romeo et al., 2020). Nel 2015, circa 1,1 miliardi di persone (circa il 15% della popolazione mondiale) risiedevano in regioni montane (figura 1.1), una cifra pari a circa il doppio rispetto ai 575 milioni del 1975 (Thornton et al., 2022). A titolo di confronto, nel 2020 circa 900 milioni di persone vivevano nei delta e nelle regioni costiere a bassa quota, ivi comprese le isole (Glavovic et al., 2022).

Nel 2017, la maggior parte della popolazione montana a livello globale (circa il 91%) risiedeva nei paesi in via di sviluppo. Circa il 90% della popolazione montana totale viveva a quote comprese tra i 1.500 e i 2.500 metri sul livello del mare (s.l.m.), mentre solo circa 75 milioni di persone vivevano a quote superiori ai 2.500 metri s.l.m. (Tremblay e Ainslie, 2021).

Figura 1.1 Delimitazione delle regioni montane e densità di popolazione, 2015



Nota: IPCC WGII (Gruppo di lavoro II del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico); metri s.l.m. (sul livello del mare).

Fonte: Adler et al. (2022, fig. CCP5.1(a), pag. 2278).

Riquadro 1.1 Delimitazione delle regioni montane

Per delineare le regioni montane, si utilizza una combinazione di caratteristiche del terreno: l'elevazione, la ripidità del pendio e il relativo rilievo (asperità), definito anche "fascia altimetrica locale" (la differenza tra l'elevazione minima e massima in una cella della griglia).

La delimitazione delle montagne del World Conservation Monitoring Centre del Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente utilizza le fasce altimetriche: tutti i terreni che si trovano al di sopra dei 2.500 metri sul livello del mare (s.l.m.) sono considerati montani, indipendentemente dalla loro asperità. I terreni situati tra i 300 e i 2.500 metri s.l.m. sono considerati montani se i valori di pendenza o di asperità superano soglie predefinite: tra i 300 e i 1.000 metri di altitudine, un'escursione altimetrica locale superiore a 300 metri in una cella della griglia di 7 chilometri di raggio; tra i 1.000 e i 1.500 metri di altitudine, più di 5° di pendenza o più di 300 metri di escursione altimetrica locale (7 chilometri di raggio); e tra i 1.500 e i 2.500 metri di altitudine, più di 2° di pendenza. Queste soglie si sono dimostrate appropriate per escludere gli altipiani di media altitudine e includono le aree a bassa altitudine generalmente considerate montuose, come le Highlands scozzesi (Regno Unito di Gran Bretagna e Irlanda del Nord), il Massiccio centrale (Francia) e le basse montagne delle isole caraibiche, nonché le colline e i promontori collinari al di sopra dei 300 metri s.l.m. (Kapos et al., 2000).

1.2 Uso di acque montane e dipendenza da esse

In qualità di torri d'acqua del mondo, le montagne sono una fonte essenziale di acqua dolce per l'agricoltura (irrigua), la produzione di energia e l'industria, così come per le cospicue popolazioni in crescita, sulle vette e anche a valle. In generale, grazie alle maggiori precipitazioni e alla minore evaporazione, le montagne forniscono un maggiore deflusso superficiale per unità di superficie rispetto alle pianure, garantendo il 55-60% dei flussi annuali di acqua dolce a livello globale. Tuttavia, valori specifici variano dal 40% a oltre il 90% in diverse parti del mondo (Viviroli et al., 2020). La figura 1.2 illustra la dipendenza di varie aree pianeggianti e popolazioni dalle acque di montagna.

Tra i principali fiumi che dipendono in grande misura dalle fonti d'acqua provenienti dalle montagne (>90% del flusso medio annuale) figurano Amu Darya, Colorado, Nilo, Orange e Rio Negro. I fiumi che dipendono per oltre il 70% del loro flusso dalle acque montane includono Eufrate, Indo, São Francisco, Senegal e Tigri (Viviroli et al., 2020).

Tra le grandi città che dipendono in modo significativo dalle acque di montagna vi sono Addis Abeba, Barcellona, Bogotà, Città del Messico, Giacarta, Kathmandu, La Paz, Lima, Los Angeles, Melbourne, New York, Nuova Delhi, Quito, Rio de Janeiro e Tokyo (Kohler et al., 2015).

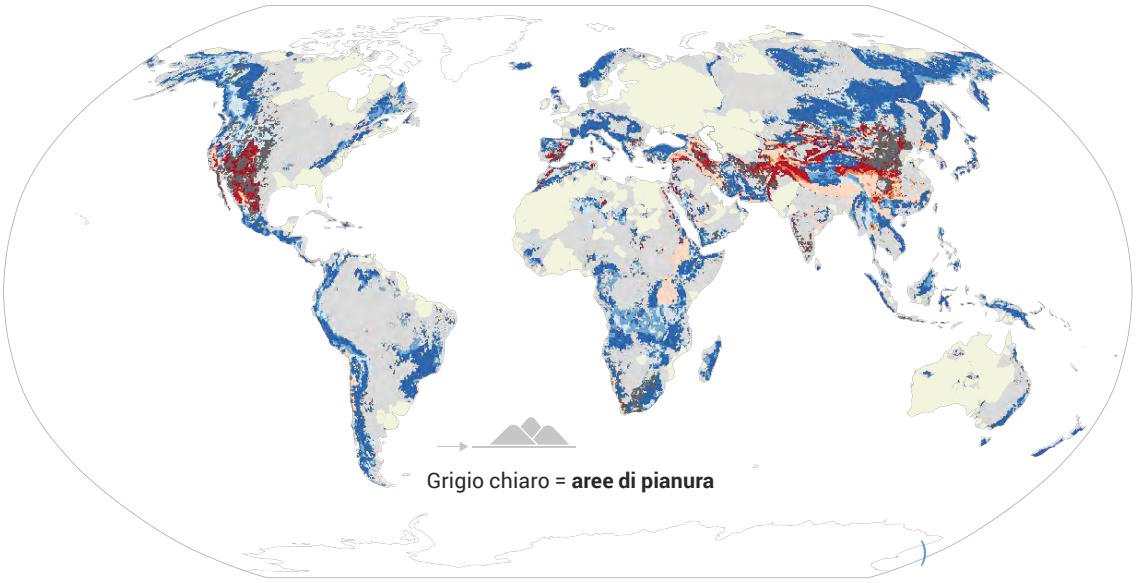
Le montagne forniscono il 55–60 % dei flussi annuali di acqua dolce a livello globale

Le principali attività economiche nelle regioni montane sono rappresentate dall'agricoltura, la pastorizia, la silvicoltura, il turismo, l'estrazione mineraria, il commercio transfrontaliero e la produzione di energia (vedere capitolo 5). Le montagne forniscono risorse di alto valore come piante officinali, legname e altri prodotti forestali, capi di allevamento tipici delle zone di montagna (ad esempio, alpaca, capre, lama, vigogne e yak) e specialità agricole. Sono zone di riferimento globali per l'agrobiodiversità, dato che un'ampia gamma del *pool* genetico mondiale per le colture agricole e le piante officinali viene conservato nelle montagne (vedere capitolo 6).

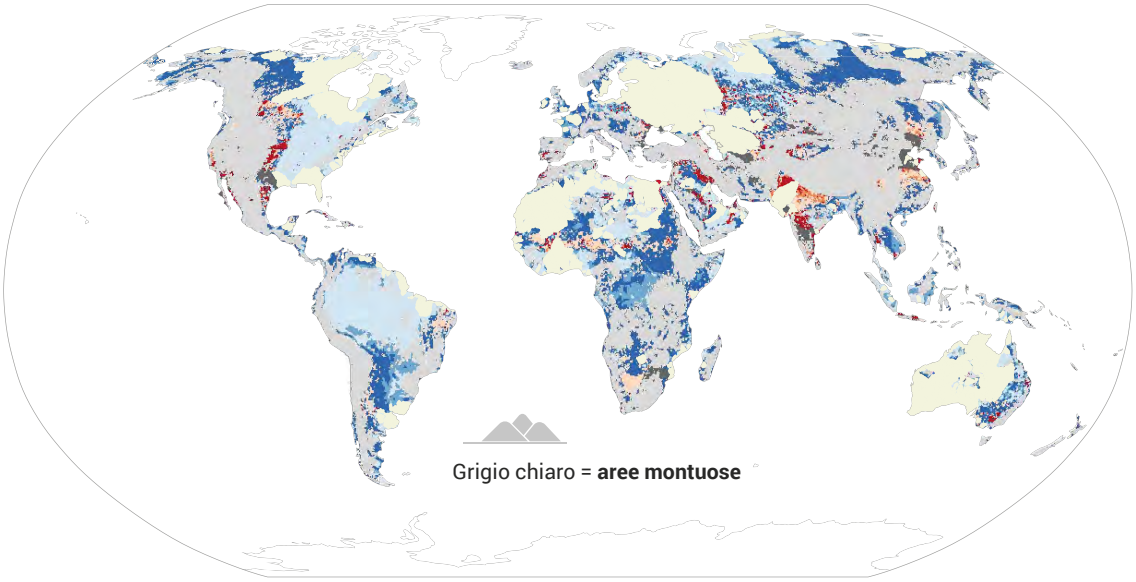
A livello globale, fino a due terzi delle attività irrigue possono dipendere dalle acque di montagna (vedere capitolo 3). In pianura, il numero di persone che dipendono fortemente da tali risorse idriche è aumentato in tutto il mondo da circa 0,6 miliardi negli anni '60 a circa 1,8 miliardi negli anni 2000. Un ulteriore miliardo di persone in pianura beneficia del contributo del deflusso montano (Viviroli et al., 2020).

Figura 1.2 Previsioni relative alla rilevanza delle regioni montane e alla dipendenza della popolazione, 2041-2050 (SSP2-RCP6.0)

(a) Previsioni relative alla rilevanza delle regioni montane per le risorse idriche di pianura (2041-2050, SSP2-RCP6.0)



(b) Previsioni relative alla dipendenza della popolazione di pianura dalle risorse idriche di montagna (2041-2050, SSP2-RCP6.0)



Grado di rilevanza e dipendenza

Essenziale ma largamente insufficiente	Essenziale ma insufficiente	Essenziale e sufficiente	Di supporto	Minimo	Trascurabile	Senza eccedenze	Quota della superficie montana sul totale del bacino idrografico <5%

Fonte: Adler et al. (2022), fig. CCP5.2 (a, b), pag. 2282.

1.3 Popolazioni e comunità di montagna

La maggior parte (78%) dei suoli urbani a livello globale si trovano al di fuori delle montagne (cioè nelle pianure). Tuttavia, l'urbanizzazione è un aspetto importante anche nelle regioni montane, con una quota sostanziale (66%) della popolazione montana globale che vive in città. Nel 2015, a livello mondiale, il 34% della popolazione montana risiedeva in città con oltre 50.000 abitanti (mentre il 50% viveva in pianura), tra cui capitali come Kathmandu, Città del Messico, La Paz e Quito; il 31% in città meno popolose e aree a media densità abitativa (28% in pianura) e il 35% in aree rurali, definite come insediamenti con meno di 300 persone per chilometro quadrato (25% in pianura; Ehrlich et al., 2021).

La rapida urbanizzazione delle regioni montane pone sfide particolari per lo sviluppo dei sistemi di approvvigionamento idrico e dei servizi igienico-sanitari (vedere capitolo 4). L'isolamento delle comunità montane, il terreno difficile e la maggiore esposizione ai rischi naturali spesso comportano costi più elevati per i trasporti, le infrastrutture, i beni e i servizi. Ciò pone particolari sfide anche per il finanziamento, lo sviluppo e la manutenzione dei sistemi di approvvigionamento idrico e dei servizi igienico-sanitari, delle reti di drenaggio e di altre infrastrutture idrauliche essenziali. I dati sulla percentuale di persone che hanno accesso all'acqua potabile e ai servizi igienico-sanitari, gestiti in sicurezza nelle regioni montane sono spesso scarsi o incompleti.

La maggior parte dei ghiacciai, compresi quelli montani, si sta sciogliendo a un ritmo sostenuto in tutto il mondo

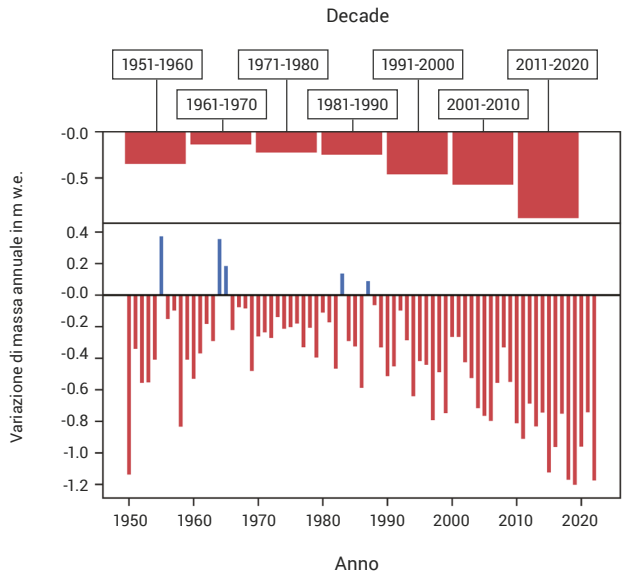
Sebbene la maggior parte delle persone che vivono nelle aree rurali si dedichi all'agricoltura o alla pastorizia, la sicurezza alimentare e nutrizionale nelle regioni montane è inferiore a quella delle pianure, con il 35-40% della popolazione di montagna che soffre di insicurezza alimentare e la metà di essa che è afflitta da fame cronica (Romeo et al., 2020). L'isolamento, l'inaccessibilità, la distanza dalle strade e dai mercati alimentari, le stagioni di crescita più brevi, la grande variabilità della disponibilità d'acqua e la frammentazione dei piccoli appezzamenti possono contribuire alla carenza di produzione alimentare locale.

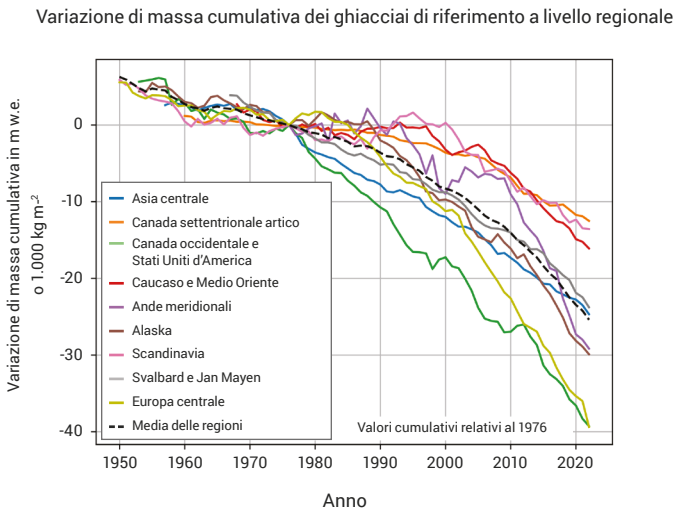
1.4 Criosfera montana, compresi i ghiacciai

La criosfera montana è una delle componenti del sistema Terra più sensibili ai cambiamenti climatici globali (vedere capitolo 2). Tale porzione di superficie terreste sta subendo cambiamenti rapidi e in gran parte irreversibili a causa di un riscaldamento notevole. In molti luoghi, le quote più alte sembrano riscaldarsi più velocemente rispetto a quelle più basse e gli impatti stanno diventando sempre più evidenti (Pepin et al., 2022). La maggior parte dei ghiacciai, compresi quelli montani, si sta sciogliendo a un ritmo sostenuto in tutto il mondo (figura 1.3). Insieme all'accelerazione del disgelo del permafrost, alla diminuzione del manto nevoso e a modelli di nevicate più irregolari (Hock et al., 2019; Adler et al., 2022), ciò avrà impatti significativi e irreversibili sull'idrologia locale, regionale e globale, compresa la disponibilità di acqua.

Nella maggior parte dei bacini idrografici caratterizzati da una componente di criosfera, la fusione della neve contribuisce al deflusso in modo più significativo rispetto alla fusione dei ghiacciai, e spesso è nettamente superiore a quest'ultima. Il manto nevoso è diminuito in quasi tutte le regioni montane, soprattutto in primavera e in estate, e si prevede un'ulteriore diminuzione nei prossimi decenni. L'entità e le tempistiche della fusione della neve sono già mutate in modo considerevole; negli ultimi decenni, nel mondo le tendenze relative alla massa equivalente in acqua contenuta nel manto nevoso sono state in prevalenza negative (Hock et al., 2019).

Figura 1.3
Variazioni della massa dei ghiacciai a livello mondiale, 1950-2020





Nota: grafico in alto: variazioni di massa annuali e decennali dei ghiacciai di riferimento con più di 30 anni di misurazioni glaciologiche in corso. Grafico in basso: variazione di massa cumulativa rispetto al 1976 per le medie regionali e globali basate sui dati dei ghiacciai di riferimento. I valori delle variazioni di massa annuali sono riportati sull'asse delle ordinate in metri d'acqua equivalenti (m.w.e. nell'acronimo inglese), che corrispondono a tonnellate per metro quadrato (1.000 kg/m^2) e sono calcolati come medie aritmetiche delle medie regionali.

Fonte: WMO (2023, fig. 14, pag. 18), sulla base dei dati del WGMS (2021).

Si prevede che i rischi nelle aree montane, come alluvioni improvvise, colate detritiche, inondazioni da collasso di laghi glaciali, frane e valanghe con i conseguenti rischi per le società, aumenteranno a causa dei cambiamenti climatici, provocando gravi danni e disagi a persone, comunità e infrastrutture (Adler et al., 2022).

Riferimenti bibliografici

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. e Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Assemblea generale delle Nazioni Unite. 2022a. International Year of Glaciers' Preservation, 2025. Risoluzione adottata dall'Assemblea generale il 14 dicembre 2022. Settantasettesima sessione, A/RES/77/158. https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n22/755/97/pdf/n2275597.pdf.

——. 2022b. Sustainable Mountain Development. Risoluzione adottata dall'Assemblea generale il 14 dicembre 2022. Settantasettesima sessione, A/RES/77/172. https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n22/756/81/pdf/n2275681.pdf.

Ehrlich, D., Melchiorri, M. e Capitani, C. 2021. Population trends and urbanisation in mountain ranges of the world. *Land*, vol. 10, N. 3, articolo 255. doi.org/10.3390/land10030255.

Glavovic, B. C., Dawson, R., Chow, W., Garschagen, M., Haasnoot, M., Singh, C. e Thomas, A. 2022. Cities and settlements by the sea. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 2163-2194. doi.org/10.1017/9781009325844.019.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. e Steltzer, H. 2019. High mountain areas. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama e N. M. Weyer (a cura di), *Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 131-202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.

Kapos, V., Rhind, J., Edwards, M., Price, M. e Ravilious, C. 2000. Developing a map of the world's mountain forests. M. Price e N. Butt (a cura di), *Forests in Sustainable Mountain Development: A State of Knowledge Report for 2000*. International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) Research Series 5. Wallingford, Regno Unito, CABI Publishing, pagg. 4-19. doi.org/10.1079/9780851994468.0004.

Kohler, T., Balsiger, J., Rudaz, G., Debarbieux, B., Pratt, D. J. e Maselli, D. (a cura di). 2015. *Green Economy and Institutions for Sustainable Mountain Development: From Rio 1992 to Rio 2012 and Beyond.* Berna, Centro per lo sviluppo e l'ambiente (CDE)/Direzione dello sviluppo e della cooperazione (DSC)/Università di Ginevra/Geographica Bernensia. https://boris.unibe.ch/17634/1/Final_Version_Green_Economy_2015%282%29.pdf.

Li, D., Lu, X., Overeem, I., Walling, D. E., Syvitski, J., Kettner, A. J., Bookhagen, B., Zhou, Y. e Zhang, T. 2021. Exceptional increases in fluvial sediment fluxes in a warmer and wetter High Mountain Asia. *Science*, vol. 374, N. 6567, pagg. 599-603. doi.org/10.1126/science.abi9649.

Pepin, N. C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., Palazzi, E., Seibert, P., Serafin, S., Schöner, W., Terzago, S., Thornton, J. M., Vuille, M. e Adler, C. 2022. Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. *Reviews of Geophysics*, vol. 60, articolo e20RG000730. doi.org/10.1029/2020RG000730.

Romeo, R., Grita, F., Parisi, G. e Russo, L. 2020. *Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity: Updated Data and Analysis of Drivers*. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO)/Convenzione delle Nazioni Unite per la lotta alla desertificazione (UNCCD). doi.org/10.4060/cb2409en.

Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Viviroli, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. e Adler, C. 2022. Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls. *PLoS ONE*, vol. 17, N. 7, articolo e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.

Tremblay, J. C. e Ainslie, P. N. 2021. Global and country-level estimates of human population at high altitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, vol. 118, N. 18, articolo e2102463118. doi.org/10.1073/pnas.2102463118.

Viviroli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M. e Wada, Y. 2020. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability*, vol. 3, pagg. 917-928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.

WGMS (Servizio mondiale di monitoraggio dei ghiacciai). 2021. *Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018-2019*). Zurigo, Svizzera, WGMS. https://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_04.pdf.

WMO (Organizzazione meteorologica mondiale). 2023. *The Global Climate 2011-2020: A Decade of Accelerating Climate Change*. WMO-No. 1338. Ginevra, WMO. https://library.wmo.int/records/item/68585-the-global-climate-2011-2020.

Capitolo 2

Cambiamenti nella criosfera e impatti sull'acqua

UNESCO IHP*

Zoë Johnson, Chris DeBeer, Corinne Schuster-Wallace e John Pomeroy[1], James Thornton[2], Sonam Wangchuk[3], James McPhee[4,5], Dhiraj Pradhananga[6], Kerry Black e Fred Wrona[7]

WMO*

Con il contributo di Anil Mishra e Abou Amani (UNESCO IHP), Nilay Dogulu (WMO), Tomasz Kolerski (Politecnico di Danzica) e Prashant Baral (ICIMOD)

*L'UNESCO IHP e il WMO hanno coordinato l'elaborazione del capitolo con la partecipazione delle seguenti istituzioni:

[1] Università di Saskatchewan, [2] Università di Berna, [3] ICIMOD, [4] Università del Cile, [5] Associazione internazionale di scienze idrologiche, [6] Università Tribhuvan e [7] Università di Calgary

Le regioni montane coprono un'ampia gamma di altitudini. In questo capitolo, per "alta montagna" si intendono le montagne in cui la neve e il ghiaccio svolgono un ruolo importante nell'approvvigionamento globale di acqua dolce (Viviroli et al., 2020; IPCC, 2023) e nel ciclo idrologico locale o regionale. Sebbene i due processi siano correlati, l'idroclima – rispetto all'elevazione – è una categoria di riferimento più rilevante per comprendere i cambiamenti imminenti relativi alla criosfera montana e le conseguenze per l'acqua. Spesso chiamate "torri d'acqua", le alte montagne sono interessate da maggiori precipitazioni rispetto alle aree ad una minore altitudine; inoltre, contribuiscono notevolmente al ruscellamento e alla generazione di flussi di acqua (Immerzeel et al., 2020; Viviroli et al., 2020). Gran parte di queste precipitazioni si verificano sotto forma di neve, che viene immagazzinata come manto nevoso stagionale e ghiaccio durante i periodi freddi, per poi essere rilasciata sotto forma di acqua di fusione durante i periodi più caldi.

Le alte montagne sono interessate da maggiori precipitazioni rispetto alle aree ad una minore altitudine; inoltre, contribuiscono notevolmente al ruscellamento e alla generazione di flussi di acqua

Si ritiene che circa due miliardi di persone dipendano dalle montagne, quindi dal contributo dello scioglimento della criosfera, per il loro approvvigionamento di acqua dolce. Questo dato deriva dalla stima in base alla quale due miliardi di persone vivrebbero nei pressi di bacini di drenaggio che hanno origine nelle montagne (Immerzeel et al., 2020; Viviroli et al., 2020). Tuttavia, l'importanza e il contributo della fusione della neve, dei ghiacci e dei terreni ghiacciati alla disponibilità e alla qualità delle risorse idriche a valle sono spesso poco conosciuti e definiti in modo inadeguato (Gascoin, 2024). Generalizzazioni come «i ghiacciai dell'Himalaya da soli forniscono acqua a 1,4 miliardi di persone» (Milner et al., 2017, pag. 9771) o «i ghiacciai sono fonti essenziali per la vita sulla Terra in quanto forniscono risorse idriche vitali a metà dell'umanità per l'uso domestico, l'agricoltura e l'energia idroelettrica» (UNESCO/IUCN, 2022, pag. 3) possono dare l'impressione approssimativa che, senza i ghiacciai, miliardi di persone rimarrebbero senza acqua (Gascoin, 2024).

I ghiacciai svolgono sì un ruolo importante nell'approvvigionamento di acqua dolce, ma lo fanno con molte più sfumature e variazioni regionali di quanto suggeriscano le affermazioni sopra riportate. Bisogna riconoscere che anche altri processi idroclimatici influiscono sui sistemi di acqua dolce. Infatti, nella maggior parte delle aree di alta montagna, il manto nevoso stagionale, piuttosto che i ghiacciai, è la fonte primaria di deflusso (Barnett et al., 2005). I cambiamenti climatici stanno influenzando radicalmente tutte le componenti della criosfera montana. Pertanto, la complessità di tali impatti deve essere esplicitamente esaminata e affrontata.

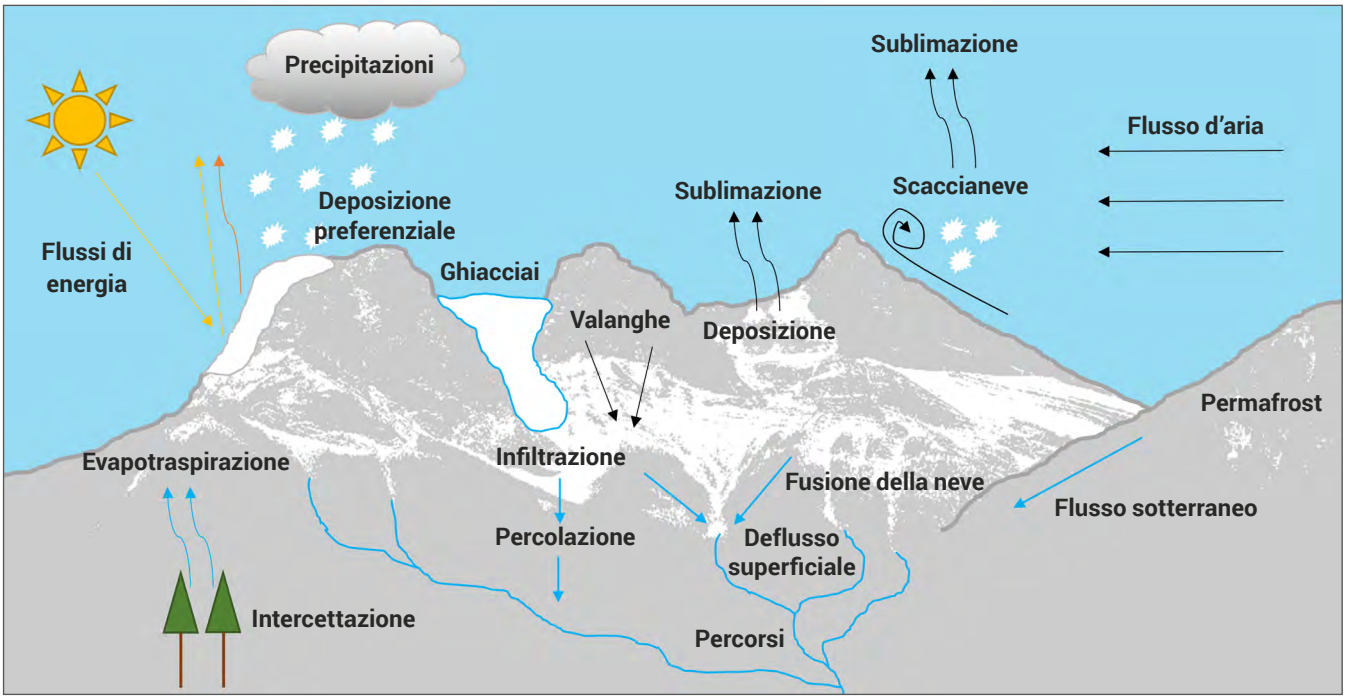
In questo capitolo si descrive perché le alte montagne sono importanti dal punto di vista idrologico e come sta cambiando la criosfera montana. Il riscaldamento globale è amplificato alle quote più elevate; questo determina la riduzione dell'accumulo di neve e della durata del manto nevoso, accelerando la perdita di massa e il ritiro dei ghiacciai, e causa il disgelo del permafrost (terreno permanentemente ghiacciato), oltre ad anticipare i tempi e, talvolta, il tasso di scioglimento di neve e ghiaccio, con un'elevata variabilità spaziale e temporale (Pepin et al., 2022; IPCC, 2023). I tempi dello scioglimento nella stagione calda, in passato prevedibili, vengono sostituiti da regimi di deflusso più variabili, dominati dalle precipitazioni piovose, con complessi effetti a valle. I potenziali impatti di questi cambiamenti sui sistemi di acqua dolce e sull'insorgere di eventi estremi (tra cui siccità, inondazioni, frane e altro) sono discussi nelle sezioni seguenti, insieme alle implicazioni per gli ecosistemi e le comunità a valle.

2.1 Dinamiche della criosfera montana

2.1.1 Processi idrologici di alta montagna

Le montagne danno vita alle sorgenti di molti fiumi in tutto il mondo e svolgono quindi un ruolo importante nel ciclo idrologico globale (figura 2.1). La fusione ciclica dei manti nevosi e dei ghiacciai di montagna, durante la stagione calda, permette il rilascio di acqua dolce che può fluire direttamente nei torrenti e nei fiumi o percolare nel terreno, alimentando l'umidità del suolo e le acque sotterranee.

Figura 2.1 Processi idrologici e della criosfera di alta montagna che regolano l'approvvigionamento idrico



Fonte: adattato da Bertoncini (2024, fig. 1.1, pag. 5).

In molte regioni di alta montagna, la formazione del manto nevoso stagionale fornisce la maggior parte delle riserve di acqua dolce. Tale accumulo viene definito "equivalente in acqua del manto nevoso" (SWE nell'acronimo inglese), ossia la quantità di acqua che un determinato volume di manto nevoso produrrebbe se fondesse (Barnett et al., 2005). Come mostra la figura 2.1, i manti nevosi di montagna possono essere ridistribuiti dal vento attraverso lo scaccianeve (Pomeroy e Li, 2000), dalla gravità attraverso le valanghe di neve (Bernhardt e Schultz, 2010) e dalle foreste attraverso l'intercettazione (Hedstrom e Pomeroy, 1998). La topografia montana induce a favorire la deposizione della neve sui versanti sottovento (Lehning et al., 2008). La neve soffiata dai venti e intercettata è soggetta a elevate perdite per sublimazione[4] che possono ridurre la riserva rappresentata dallo SWE montano fino alla metà (Essery e Pomeroy, 2004; Pomeroy et al., 2022). La fusione avviene prevalentemente sui pendii esposti al sole; è più rapida durante le piogge calde ed è più lenta sotto le chiome delle foreste. Pertanto, l'orientamento dei pendii e la copertura forestale influenzano considerevolmente il picco e la durata degli idrogrammi dei flussi di fusione della neve (Marks et al., 1998; Ellis et al., 2013). La suddivisione dell'acqua di fusione tra infiltrazione e deflusso dipende dal tasso di fusione, dalla tessitura del suolo, dalla saturazione e dalla presenza di terreni stagionalmente o permanentemente ghiacciati. I terreni ghiacciati riducono la permeabilità del suolo; la loro presenza diminuisce con il clima più caldo e l'aumento della durata della stagione senza neve.

[4] Conversione diretta dell'acqua dalla sua forma solida (neve o ghiaccio) a quella gassosa (vapore acqueo), senza prima fondersi in acqua liquida (USGS, 2019).

I processi di ridistribuzione della neve fanno sì che i volumi di fusione mostrino una forte sensibilità al cambiamento della vegetazione. L'espansione degli arbusti della tundra può ridurre la ridistribuzione e la sublimazione della neve, aumentando così il paramentro dello SWE. Al contrario, il rimboschimento aumenta le perdite per sublimazione, riducendo l'entità del suddetto parametro. La fusione della neve è particolarmente sensibile ai cambiamenti climatici che possono determinare l'incremento o la diminuzione delle precipitazioni montane ed in tal modo aumentare la temperatura e l'umidità dell'aria, diminuire la frazione di precipitazione sotto forma di neve, anticipare i tempi di fusione della neve, provocare alterazioni nella fusione causata da eventi di "pioggia sulla neve" (ROS nell'acronimo inglese) e accelerare o decelerare i tassi di fusione della stessa. Oltre a ciò, i tassi di fusione generalmente diminuiscono con l'aumento della vegetazione.

Nella maggior parte delle aree di alta montagna, il manto nevoso stagionale, piuttosto che i ghiacciai, è la fonte primaria di deflusso

Se le condizioni climatiche lo permettono, non tutta la neve fonde. Quando i manti nevosi perdurano per molti anni possono trasformarsi in ghiacciai (DeBeer et al., 2020). L'accumulo stagionale di neve, la graduale compressione in *firn*[5] e poi in ghiaccio aumentano la massa di un ghiacciaio, mentre l'ablazione[6] nella stagione calda la diminuisce. Il bilancio di massa del ghiacciaio è la differenza netta tra l'accumulo di neve e l'ablazione di neve e ghiaccio. L'ablazione, tramite fusione e sublimazione, è fortemente influenzata dalla durata del manto nevoso, dalla radiazione netta e dalla temperatura. Questi fattori sono influenzati dalla temperatura dell'aria, dalla copertura delle nubi, dall'albedo della superficie ghiacciata, dalle nevicate invernali e dalla ridistribuzione della neve, e quindi sono sensibili ai cambiamenti climatici.

La polvere, i depositi di fuliggine legati alla combustione, compreso il *black carbon*, e la crescita microbica e algale sulle superfici della neve e dei ghiacciai stanno diventando sempre più comuni a causa dell'aumento della frequenza e/o dell'intensità delle tempeste di polvere, dell'inquinamento atmosferico e degli incendi boschivi (riquadro 2.1). Possono accelerare altresì i tassi di fusione diminuendo l'albedo superficiale fino alla nevicata successiva (Aubry-Wake et al., 2022). Tuttavia, se la copertura di detriti rocciosi è sufficientemente spessa, una massa di ghiaccio può essere isolata dal riscaldamento esterno e persistere a lungo dopo che il resto del ghiacciaio si è ritirato (Miles et al., 2020).

Gli ambienti montani con ghiacciai presentano un'idrologia complessa. La presenza dei ghiacciai aumenta l'accumulo di neve e i venti freddi di drenaggio, riduce le temperature dei torrenti e ritarda la generazione dei flussi. I percorsi subglaciali guidano l'acqua di fusione attraverso vari terreni, compresi i letti rocciosi e le morene, e ricaricano gli acquiferi, sebbene questi processi siano spesso poco conosciuti (Müller et al., 2022). La figura 2.2 riassume alcuni dei cambiamenti previsti negli ambienti di alta montagna a causa del riscaldamento atmosferico.

2.1.2 Tendenze della criosfera montana

L'evidenza del riscaldamento atmosferico dall'inizio del XX secolo è presente in tutte le catene montuose. Gli effetti sono amplificati alle quote più elevate in alcune regioni (Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015; Hock et al., 2019a; Pepin et al., 2022). L'altitudine a cui le precipitazioni piovose si trasformano in nevicate si sta spostando verso l'alto a causa del riscaldamento. Le quote più basse e i climi più caldi sono quindi interessati da una maggiore diminuzione dello spessore e della durata del manto nevoso, mentre le quote più fredde e più elevate possono subire un aumento dei picchi dello SWE in seguito all'intensificarsi delle precipitazioni e alla diminuzione delle perdite per sublimazione dovute ai cambiamenti climatici (López-Moreno et al., 2020).

[5] Stadio intermedio nella trasformazione della neve in ghiaccio (USGS, 2013).

[6] La perdita di neve e ghiaccio da un ghiacciaio (ad esempio per fusione, evaporazione, sublimazione o distacco) (USGS, 2013).

Riquadro 2.1 Impatto della deposizione di *black carbon*, polvere e altro particolato sulla fusione di neve e ghiaccio

Con il riscaldamento del clima, le regioni montane a livello globale ricevono le emissioni causate da un numero crescente di incendi e tempeste di polvere. Insieme alle attività umane, queste emissioni stanno portando a una crescente deposizione di *black carbon* e altro particolato sulle superfici dei ghiacciai e sui manti nevosi perenni. Questo materiale può essere trasportato su vaste distanze, anche da continente a continente. Le impurità scuriscono le superfici di neve e ghiaccio, causando un maggiore assorbimento della radiazione solare. Inoltre, possono favorire la crescita microbica, che può oscurare ulteriormente la superficie e trattenere le impurità per lunghi periodi. Tale fenomeno può influenzare in modo significativo il bilancio energetico superficiale, aumentando così i tassi di fusione, soprattutto nei periodi e nelle località in cui la radiazione solare in entrata è elevata. Questo fattore è sempre più riconosciuto come importante e influente (Zhang et al., 2021; Bertoncini et al., 2022).

Alla luce di dinamiche complesse e processi di interazione, l'impatto della deposizione di particolato non si risolve nel mero aumento dei tassi di fusione. La deposizione tende ad avere una scala da locale a regionale, con una notevole variabilità spaziale. Gli effetti possono essere di breve durata quando la superficie viene ricoperta da successive nevicate, ridefinendo l'albedo, o quando gli eventi di fusione o di pioggia lavano le superfici di ghiaccio. Tuttavia, in alcune località, quando le impurità vengono radunate dai processi di fusione, la superficie si scurisce ulteriormente, si può creare un *feedback* positivo con un aumento della fusione stessa. Il fumo degli incendi può anche ridurre la radiazione solare in entrata fino a provocare un raffreddamento della superficie, contrastando l'effetto della riduzione dell'albedo (Aubry-Wake et al., 2022).

La deposizione di *black carbon* e di altri particolati sulle superfici di neve e ghiaccio può avere un forte impatto sul bilancio energetico superficiale e sulla fusione. Non è ben chiaro quale sia l'evoluzione di questo fenomeno, quanto critici siano gli effetti, quali siano le interazioni e i *feedback* e quanto sia variabile nel mondo. È quindi importante chiarire questi aspetti per prevedere le tendenze delle risorse idriche future nelle regioni montane.

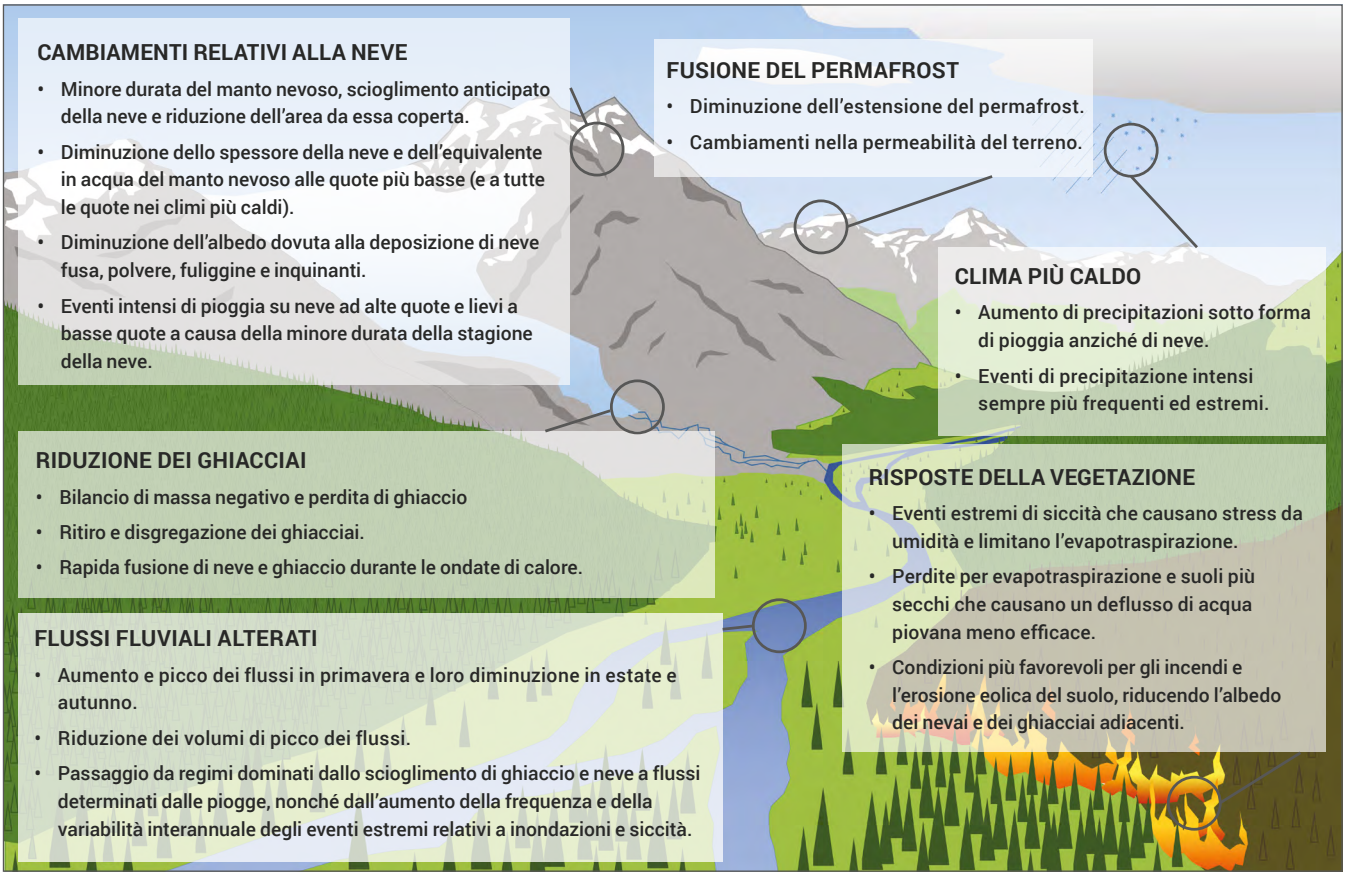
Ghiacciaio Athabasca (Canada) senza fuliggine, ottobre 1993

Foto: John Pomeroy

La fuliggine degli incendi e le alghe oscurano il ghiacciaio Athabasca, agosto 2019

Foto: John Pomeroy.

Figura 2.2 Principali cambiamenti criosferici e idrologici nelle regioni di alta montagna dovuti al riscaldamento globale nel XXI secolo



Fonte: autori.

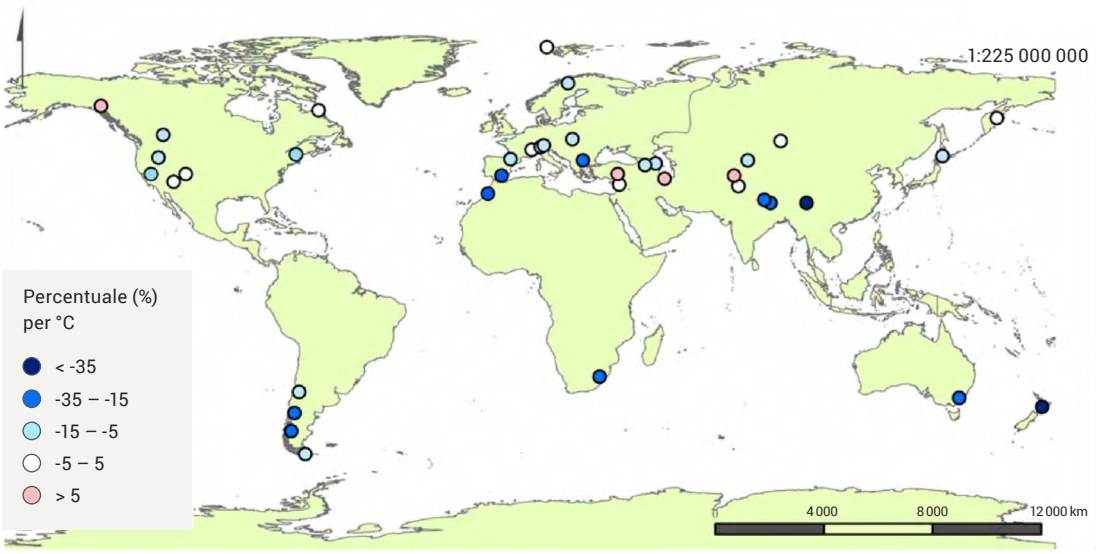
L'evidenza del riscaldamento atmosferico dall'inizio del XX secolo è presente in tutte le catene montuose

Le tendenze nei bacini montani denotano una maggiore frazione di precipitazioni che cadono sotto forma di pioggia piuttosto che di neve, una riduzione della ridistribuzione della neve e dell'area del manto nevoso, e una fusione anticipata della neve (figura 2.2). Ciò comporta la separazione del regime di generazione dei deflussi dal regime di fusione della neve, laddove l'effetto di "sbarramento della neve" sul flusso primaverile[7] si riduce in fretta, lasciando che i deflussi rispondano rapidamente alle precipitazioni invernali e agli eventi di fusione associati (López-Moreno et al., 2020).

L'accumulo di neve e il picco dello SWE con il riscaldamento diminuiscono più rapidamente di quanto aumentino i tassi di fusione (Pomeroy et al., 2022). La diminuzione del parametro dello SWE con il riscaldamento è maggiore sui versanti esposti al sole, nelle aree disboscate e alle quote più basse, così come l'aumento dei tassi di fusione con il riscaldamento è maggiore alle quote più basse e nei climi più caldi. Si prevede che gli eventi ROS diminuiranno con il riscaldamento nella maggior parte dei bacini di alta montagna, con cali maggiori alle basse quote e nelle aree con climi più caldi, mentre si prevede un aumento dei ROS alle alte quote e nelle aree con climi più freddi (figura 2.3; López-Moreno et al., 2021). Con l'intensificarsi del riscaldamento climatico, la diminuzione dei manti nevosi e la fusione anticipata delle nevi, nonché un maggior numero di eventi di fusione a metà inverno, aumenteranno il disgelo e anticiperanno i picchi di piena di settimane o mesi (López-Moreno et al., 2020).

[7] Picco nel flusso di corrente derivante dallo scioglimento delle nevi primaverili.

Figura 2.3 Variazione percentuale per 1 °C di riscaldamento nella frequenza degli eventi di fusione per pioggia su neve in alta montagna a livello mondiale, 1982-2014



Nota: i punti rosa corrispondono alle montagne con il maggiore aumento della frequenza di eventi ROS con il riscaldamento, e i punti neri quelle con la maggiore diminuzione di tale fenomeno.
Fonte: López-Moreno et al. (2021, fig. 6, pag. 7). Licenza CC BY 4.0.

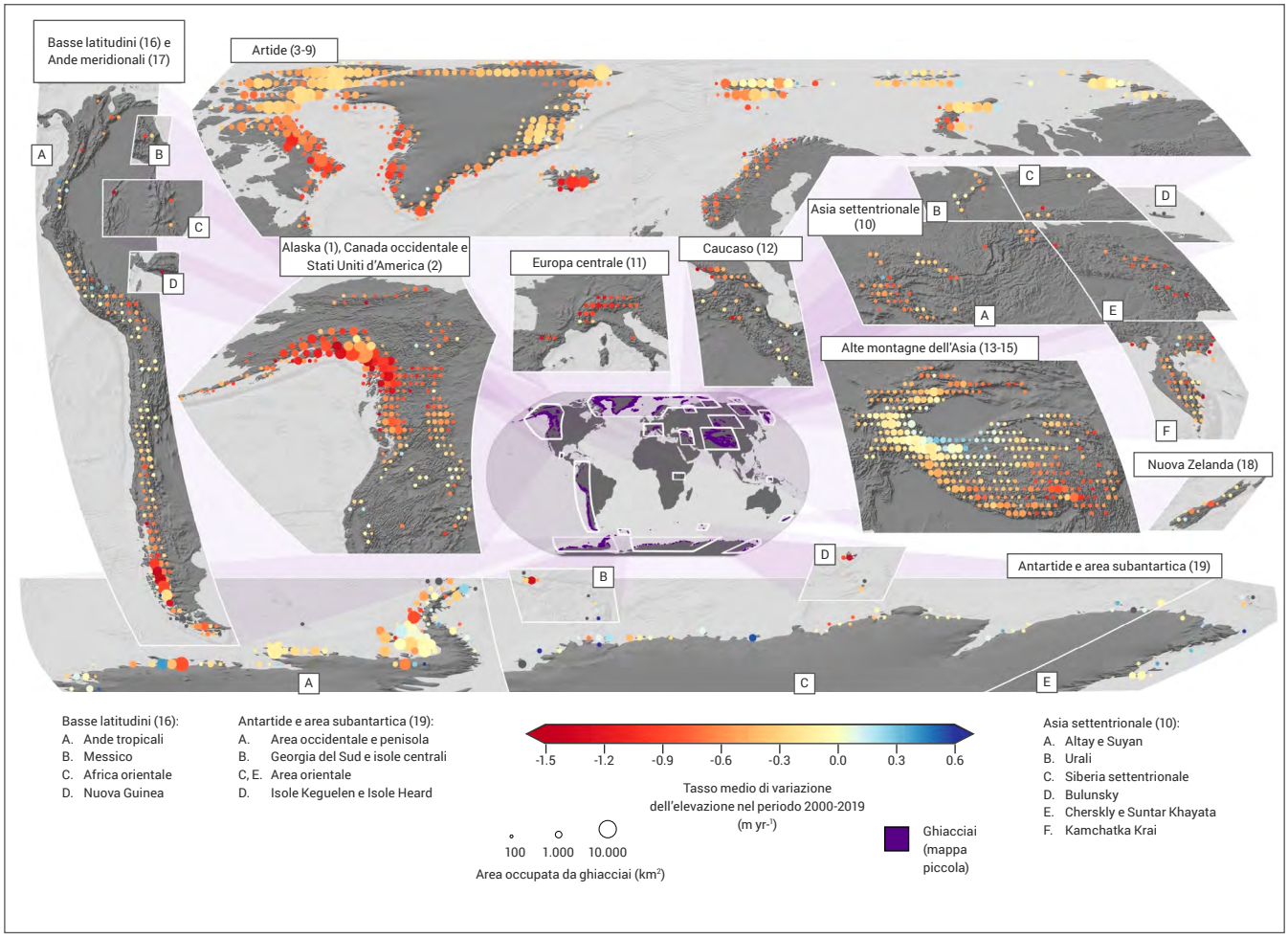
Le regioni montane in cui i manti nevosi non persistono più durante la stagione calda vedranno inevitabilmente scomparire i loro ghiacciai, poiché gli stessi manti nevosi perenni sono necessari per sostenere la massa dei ghiacciai. Il ritiro e la perdita dei ghiacciai sono in corso dal XX secolo nella maggior parte del mondo (DeBeer et al., 2020; IPCC, 2023) e hanno subito un'accelerazione negli ultimi decenni (Zemp et al., 2019). La maggior parte dei ghiacciai montani, a livello mondiale, si sta assottigliando rapidamente (figura 2.4; Hugonnet et al., 2021) per via del clima attuale. Ciò significa che continueranno ad arretrare indipendentemente dalla riduzione delle emissioni di gas serra (Cook et al., 2023). Un ulteriore riscaldamento atmosferico aggraverà lo squilibrio a livello globale: con aumenti di temperatura compresi tra 1,5°C e 4°C, si prevede che i ghiacciai montani perderanno dal 26% al 41% della loro massa totale entro il 2100, rispetto al 2015. Numerosi ghiacciai scompariranno del tutto, determinando il disgelo di molte sorgenti montane attualmente ghiacciate (Rounce et al., 2023).

2.2 Impatti del cambiamento delle condizioni di neve e ghiaccio in montagna

2.2.1 Risposta delle acque dolci

Il contributo offerto dalle diverse componenti della criosfera (ad esempio neve, ghiaccio e permafrost) all'approvvigionamento di acqua dolce varia a livello regionale, topografico, interannuale e stagionale. L'impatto dei cambiamenti della criosfera dipenderà dal modo in cui i sistemi a valle, umani e naturali, risponderanno alle nuove dinamiche degli aspetti relativi all'approvvigionamento di acqua superficiale e sotterranea, tra cui quantità, tempi, durata e affidabilità del deflusso dei corsi d'acqua. La perdita di sincronizzazione tra i tempi di deflusso delle montagne e la domanda a valle rappresenta un'allarmante preoccupazione per gli stessi fruitori della risorsa idrica. Le regioni in cui l'uso dell'acqua è storicamente legato alla stagione calda dello scioglimento delle nevi e dei ghiacciai sono le più vulnerabili ai cambiamenti. Le variazioni locali devono essere considerate quando si progettano le risposte politiche per la mitigazione e l'adattamento.

Figura 2.4 Variazioni della superficie globale dei ghiacciai, 2000-2019



Nota: la diminuzione dell'elevazione superficiale dei ghiacciai e la perdita di ghiaccio sono state osservate nelle regioni montane di tutto il mondo, con solo alcune aree limitate in cui è stato rilevato un incremento del ghiaccio.

Fonte: Hugonnet et al. (2021, fig. 2, pag. 727). Questa figura è riprodotta con il permesso del SNCSC; la licenza Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC BY-SA 3.0 IGO) non si applica a questa figura.

Il contributo della fusione dei ghiacciai alla disponibilità di acqua varia in termini di importanza. Ad esempio, nelle Ande tropicali, Buytaert et al. (2017) hanno rilevato che la fusione dei ghiacciai contribuisce solo al 2,2% dell'acqua disponibile annualmente a Quito, in Ecuador, tenendo conto della fornitura idrica standard. Più a sud, a La Paz, nello Stato Plurinazionale della Bolivia, è stato riscontrato che la fusione dei ghiacciai contribuisce al 15% della disponibilità idrica annuale e a Huaraz, in Perù, al 19%. Nel bacino del fiume Bow in Canada (dove vivono due milioni di persone), la fusione della neve, piuttosto che quella dei ghiacciai, è di gran lunga più importante per il volume annuale dei flussi: la fusione della neve genera, infatti, il 60-80% del flusso disponibile (Fang e Pomeroy, 2023). Essendo uno dei principali fattori che contribuiscono all'approvvigionamento di acqua dolce, i regimi nevosi montani, e in particolare il modo in cui tali regimi stanno cambiando, dovrebbero configurarsi come area di ricerca prioritaria.

Sebbene l'importanza dei ghiacciai per l'approvvigionamento di acqua dolce sia spesso sopravvalutata (riquadro 2.2), essi offrono altri importanti benefici per la sicurezza idrica. La capacità di tamponare la siccità (riferita all'aumento della fusione dei ghiacciai durante i periodi caldi e secchi, che può compensare la mancanza di acqua dolce) può aumentare la resilienza a valle nei periodi di stress idrico. I ghiacciai fondono più rapidamente durante i periodi più caldi e secchi e quindi, soprattutto una volta che si è esaurito il manto nevoso delle montagne, la loro rapida fusione può svolgere un ruolo fondamentale nel mantenimento del flusso dei torrenti fino alla fine del periodo secco (Hopkinson e Young, 1998).

La fusione dei ghiacciai, come risposta al rischio siccità, può essere cruciale per sostenere la produzione agricola

Nelle regioni in cui la stagione secca coincide con il periodo vegetativo delle colture, la fusione dei ghiacciai, come risposta al rischio siccità, può essere cruciale per sostenere la produzione agricola. Buytaert et al. (2017) hanno riscontrato che nelle Ande tropicali l'area massima mensile dei terreni che utilizzano almeno il 25% dall'acqua di fusione dei ghiacciai per l'irrigazione è raddoppiata durante gli anni di siccità. Per le comunità di alta montagna, che dipendono dall'acqua proveninente dai ghiacciai per la produzione alimentare o per altri usi fondamentali, la recessione dei ghiacciai può costringere a modificare pratiche storiche (vedere riquadro 3.4). Oppure può rendere le comunità più dipendenti dalle risorse idriche superficiali e sotterranee, sempre più incerte. Con il ritiro e la scomparsa dei ghiacciai montani, le regioni di alta montagna perderanno la loro preziosa capacità tampone e le regioni a valle potrebbero risentire di una minore resilienza alle condizioni di siccità o aridità (Fang e Pomeroy, 2023).

Il contributo dei ghiacciai all'approvvigionamento di acqua dolce diminuisce con l'aumento della distanza delle aree a valle dai ghiacciai stessi. Gli esempi riportati nella figura 2.5 (Kaser et al., 2010) mostrano che l'impatto dell'idrologia delle formazioni glaciali sulla portata dei fiumi diminuisce sostanzialmente con l'aumento della distanza dai ghiacciai e che il contributo diventa inconsistente alla foce del fiume. Le comunità che vivono più vicine alle estremità dei ghiacciai saranno quindi più vulnerabili al fenomeno del loro ritiro, nonostante i benefici in termini di resilienza alla siccità rimangano rilevanti. Lo stesso vale anche per le comunità delle aree a valle più distanti, sebbene non dipendano in maniera preponderante dai ghiacciai per le loro risorse idriche. Inoltre, malgrado non siano fenomeni ancora ben compresi, si prevede che le acque sotterranee di montagna, così come l'impatto del disgelo del permafrost sul flusso di base, diventeranno sempre più rilevanti con la scomparsa dei ghiacciai (Arenson et al., 2022; van Tiel et al., 2024).

Riquadro 2.2 Prudenza nell'applicazione del concetto di "picco idrico" nelle politiche idriche

Il concetto di "picco idrico" è comunemente utilizzato per indicare gli impatti della recessione glaciale. Esso suggerisce che, con l'aumento dei tassi di fusione dei ghiacciai e la riduzione delle aree glaciali a causa del riscaldamento, si verificherà un aumento iniziale dei volumi di deflusso dai ghiacciai fino a un "picco" dovuto all'aumento del tasso di fusione, seguito da un declino dovuto alla riduzione della copertura glaciale (Huss e Hock, 2018; Hock et al., 2019b).

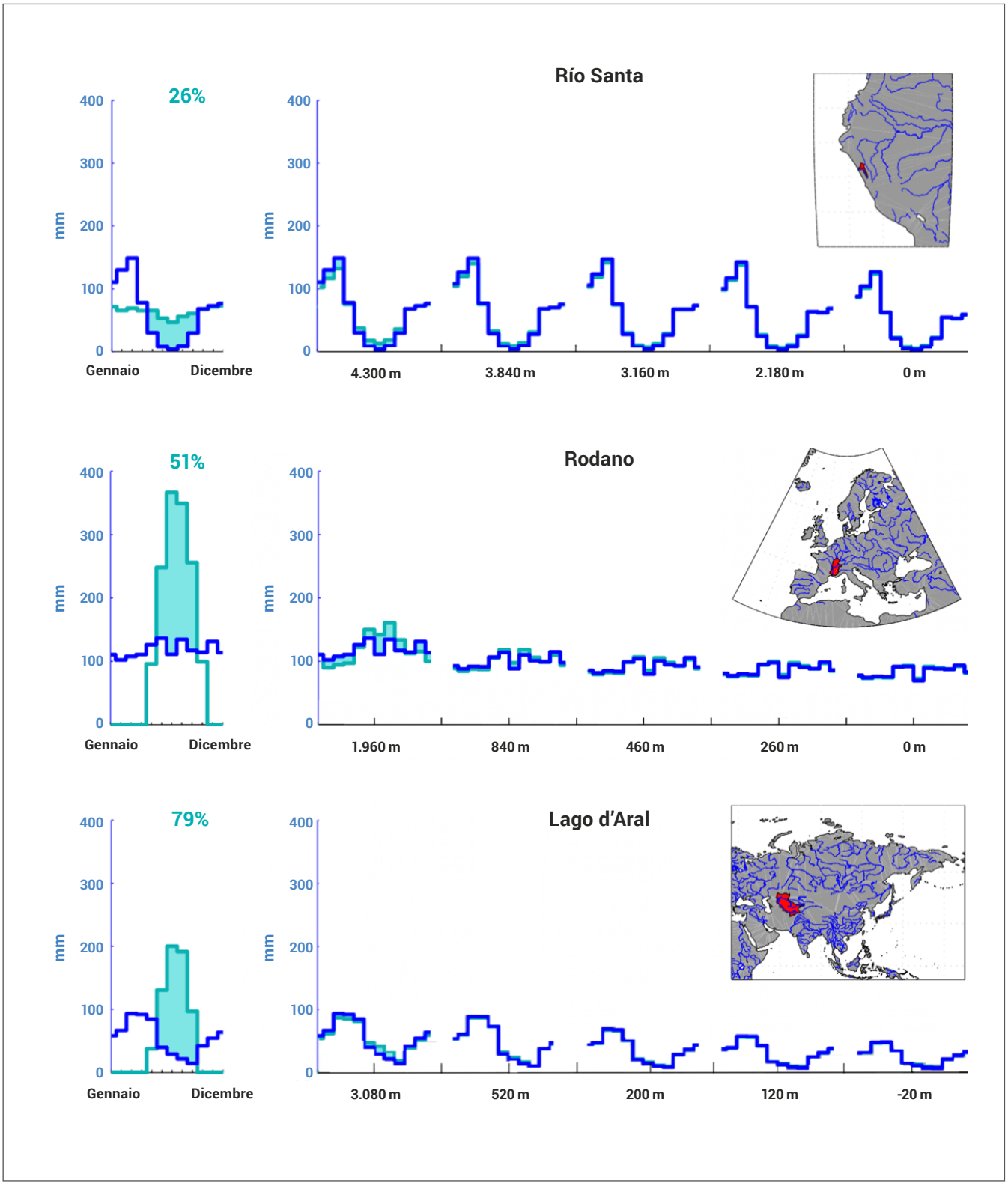
Si tratta di un concetto ideale che dovrebbe essere applicato solo al deflusso dei ghiacciai e che potrebbe non essere valido per i complessivi dei torrenti di montagna. La maggior parte dei corsi d'acqua nei bacini che comprendono ghiacciai non è alimentata solo dai ghiacciai; è quindi necessario prendere in considerazione altri cambiamenti idrologici quando si fanno previsioni sui flussi d'acqua (ad esempio, variazioni nel regime delle precipitazioni, nel manto nevoso, nella vegetazione e interazioni con le acque sotterranee).

Si prevede, ad esempio, che le precipitazioni montane aumenteranno in molte parti del mondo. È improbabile che il regime dei flussi di tutti i fiumi raggiunga il picco con lo scioglimento dei ghiacciai e poi tenda a diminuire, poiché nella maggior parte dei casi l'entità dei volumi è influenzata anche dalla fusione della neve e dal deflusso delle piogge. I ghiacciai di tutto il mondo si stanno ritirando; molti dei loro contributi stagionali alla portata dei flussi sono aumentati e in futuro diminuiranno. Ai fini della gestione delle risorse idriche, l'andamento del picco idrico ideale si indebolisce con l'aumentare delle dimensioni del bacino, quando il deflusso del bacino è più a valle dei ghiacciai.

Va inoltre sottolineato che, sebbene le alte montagne siano effettivamente "torri d'acqua", la dipendenza delle comunità a valle dei ghiacciai, in quanto a disponibilità di risorse idriche, è spesso mal descritta (Viviroli et al., 2020). Molte volte vengono avanzate affermazioni che sopravvalutano l'importanza dei ghiacciai per le risorse idriche globali, ad esempio che «i ghiacciai dell'Himalaya da soli forniscono acqua a 1,4 miliardi di persone» (Milner et al., 2017, pag. 9771). Lasciando al pubblico l'impressione imprecisa che, senza i ghiacciai, metà dell'umanità sarebbe senz'acqua (Gascoin, 2024).

La criosfera montana (compresi i ghiacciai) svolge un ruolo importante nell'approvvigionamento di acqua dolce; tuttavia, l'importanza relativa di ghiacciai, neve e ghiaccio per le risorse di acqua dolce è molto variabile nel tempo e nello spazio. I gestori delle risorse idriche e chi si occupa delle politiche dovrebbero diffidare di questo sensazionalismo riguardo ai ghiacciai e riconoscere se e come i contesti locali differiscono dai messaggi diffusi a livello globale.

Figura 2.5 Contributo della fusione dei ghiacciai e delle precipitazioni alla portata dei fiumi in alcuni grandi bacini con sorgenti montane



Nota: a sinistra, bilancio di massa delle aree glaciali (neve + ghiaccio), con accumulo mensile (blu scuro), ablazione mensile (celeste) e volume del deflusso della neve e del ghiaccio fuso dal ghiacciaio (ombreggiatura celeste); le percentuali indicano le precipitazioni annuali sul ghiacciaio che defluiscono in ritardo come acqua di fusione stagionale. A destra, effetto del deflusso stagionale di neve e ghiaccio sulla portata del fiume in funzione dell'altitudine (asse delle ascisse), a partire dall'estremità del ghiacciaio fino alla foce del fiume, con le precipitazioni annuali (blu scuro) e la fusione di neve e ghiaccio del ghiacciaio (celeste).

Fonte: adattato da Kaser et al. (2010, fig. 1, pag. 20224). La licenza Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC BY-SA 3.0 IGO) non si applica a questa figura. PNAS non è responsabile dell'accuratezza di questa traduzione.

2.2.2 Risposte ecologiche

Gli impatti del clima sulla criosfera montana stanno alterando i regimi idrologici e la qualità dell'acqua. La neve e il ghiaccio sono habitat per molte specie e rappresentano ecosistemi biologicamente attivi (Jones et al., 2001); inoltre, svolgono un ruolo chiave nel ciclo biogeochimico di carbonio, azoto e altri elementi (Sharp e Tranter, 2017). Negli ambienti di alta montagna, le risposte ecologiche previste a un clima più nevoso e piovoso includono una maggiore disponibilità di acqua allo stato liquido in prossimità della superficie durante tutto l'anno, la colonizzazione da parte di alberi e arbusti a quote più elevate, una maggiore mobilità di nutrienti e contaminanti, la crescita di alghe e altri microrganismi, oltre a una maggiore produzione di carbonio organico (Rasouli et al., 2019; Verrall e Pickering, 2020).

Sono stati osservati effetti di *feedback* tra incendi, tempeste di polvere e crescita algale sui ghiacciai. La presenza di nutrienti nei depositi di carbonio dà origine ad habitat algali fertili che possono accelerare lo scioglimento, diminuendo l'albedo dei ghiacciai e della neve (Williamson et al., 2019; Aubry-Wake et al., 2022). Anche la qualità dell'acqua nelle regioni montane desta preoccupazione. Alcuni studi suggeriscono che la degradazione del permafrost nelle regioni montuose ricche di roccia solfurea può facilitare l'ossidazione, precedentemente inibita, dei minerali di solfuro, aumentando così le concentrazioni di metalli pesanti nelle acque sotterranee (Ilyashuk et al., 2018; vedere capitolo 6).

Gli impatti idroecologici si estendono a valle negli ambienti fluviali, lacustri e marini costieri; essi includono cambiamenti nei sedimenti e nei regimi termici, variazioni nei flussi biogeochimici e di contaminanti, cambiamenti nella disponibilità e nella qualità degli habitat, così come modifiche nei modelli di biodiversità delle specie (Milner et al., 2017; Somers e McKenzie, 2020). La ricerca di Vanderwall et al. (2024) evidenzia che i laghi alimentati dai ghiacciai possiedono caratteristiche biogeochimiche diverse da quelle dei laghi di montagna alimentati dalla neve. Si prevede che la deglaciazione avrà implicazioni importanti per le reti alimentari acquatiche, con impatti più significativi sui laghi e i corsi d'acqua alimentati dai ghiacciai.

Si prevede che la deglaciazione avrà implicazioni importanti per le reti alimentari acquatiche

I ghiacciai svolgono un importante ruolo di termoregolazione degli habitat d'acqua dolce e marini costieri: l'acqua di fusione, e le acque sotterranee provenienti dai ghiacciai rocciosi, contribuiscono a mantenere temperature costanti e fresche, fondamentali per alcune specie ittiche (Harrington et al., 2017; Somers e McKenzie, 2020). È stato riscontrato che le alterazioni del deflusso glaciale montano e dei regimi di temperatura hanno effetti positivi e negativi sulla sostenibilità delle specie ittiche anadrome, come il salmone (O'Neel et al., 2015). La variazione della quantità di alghe pelagiche in prossimità della costa, la distribuzione e la quantità di zooplancton, pesci e uccelli marini negli ecosistemi costieri dell'Alaska è stata collegata in gran parte ai cambiamenti nell'apporto di acqua dolce provenienti dai ghiacciai, in particolare in termini di temperatura e torbidità (Arimitsu et al., 2016). Nelle regioni aride di alta montagna, i ghiacciai possono anche essere la principale fonte di acqua dolce per le zone umide (Azócare Brenning, 2010; Schaffer et al., 2019).

2.2.3 Pericoli

Le conseguenze dei cambiamenti climatici, tra cui l'aumento delle temperature, la recessione dei ghiacciai, il disgelo del permafrost e la variazione dei regimi di precipitazione, possono influire sui rischi di alluvioni e frane (Carrivick e Tweed, 2016; Chiarle et al., 2021). I processi associati a tali rischi, come colate detritiche e inondazioni, valanghe, crolli di roccia e cascate di ghiaccio, inondazioni da collasso delle dighe a causa di frane e inondazioni da collasso di laghi glaciali (GLOF nell'acronimo inglese)[8]

[8] Alluvioni improvvise e catastrofiche causate dal cedimento di dighe naturali, tipicamente formate da morene glaciali o ghiaccio, che contengono laghi glaciali. Questi eventi si verificano quando la pressione dell'acqua si accumula dietro la diga, portando al suo crollo, che può avvenire a causa dell'erosione, dell'attività sismica o dell'improvviso afflusso di acqua di fusione.

sono definiti collettivamente “geo-rischi”. Possono rappresentare una minaccia significativa per le comunità, la fauna selvatica e le infrastrutture nelle regioni montane (Chiarle et al., 2021). Sebbene questi eventi possano verificarsi isolatamente, sono possibili effetti a cascata, in cui un processo ne innesca un altro, così come effetti di *feedback* tra di essi (riquadro 2.3; Chiarle et al., 2021).

Nelle regioni montane a livello mondiale si osservano eventi di geo-rischio. Ad esempio, lungo il fiume Teesta, in India, nel 2023 un evento GLOF ha causato una rapida ondata d’acqua che ha raggiunto un’altezza di 5-6 metri. Sono state segnalate almeno 30 vittime e una diga idroelettrica è stata distrutta (ESCAP, 2023). Nelle Ande del Cile centrale, la deglaciazione ha probabilmente contribuito a provocare la frana del torrente Parraguirre, avvenuta nel 1987; la conseguente colata detritica, che ha percorso 57 chilometri, ha causato la morte di 37 persone e arrecato gravi danni alle infrastrutture (Sepúlveda et al., 2023).

Riquadro 2.3 *Feedback* tra scarsità di neve, incendi boschivi e colate detritiche

Gli effetti di *feedback* tra la fusione della neve e del ghiaccio, gli impatti idrologici a valle e gli incendi possono intensificare gli eventi di rischio geologico. Le stagioni degli incendi boschivi più violenti di solito si presentano a seguito di un periodo di scarsità di neve, quando cioè si verifica la fusione anticipata di un manto nevoso a basso contenuto di acqua equivalente, a fronte di inverni caldi e secchi o di un caldo primaverile eccezionale (Westerling et al., 2006). La superficie bruciata delle foreste montane può ridurre le capacità di intercettazione delle precipitazioni e delle nevicate; di immagazzinare l’umidità del suolo, a causa della combustione dei suoli organici; e di infiltrazione, aumentando il rischio di ruscellamento da fusione della neve e di inondazioni da pioggia su neve.

Anche il potenziale di colate detritiche e frane può aumentare, poiché le ceneri e i suoli bruciati possono accrescere lo spessore del terreno sciolto e mobile. Insieme alla vegetazione morta o in decomposizione, questi fattori possono provocare il trascinamento di grandi volumi di detriti durante le inondazioni o le frane (Jakob et al., 2022; Vahedifard et al., 2024).

I cambiamenti climatici possono aumentare la vulnerabilità di un versante agli eventi di geo-rischio. Attraverso fenomeni estremi di precipitazione e ondate di calore, possono dare origine a tali eventi.

Le conseguenze dei rischi geologici includono minacce alla salute e alla sicurezza umana, all’habitat della fauna selvatica, al funzionamento delle infrastrutture e alle industrie turistiche. Frane e valanghe possono bloccare e danneggiare le infrastrutture di trasporto, devastare gli insediamenti e compromettere le attività umane (Carey et al., 2012; 2021). Le inondazioni, in particolare gli eventi ROS e GLOF, negli ambienti montani sono altrettanto preoccupanti. A seconda delle dimensioni, dell’intensità e dell’origine dell’alluvione, il trascinamento di detriti e le correnti torrentizie possono causare danni simili (Haeberli et al., 2017; Clague e O’Connor, 2021). Questi rischi geologici possono anche influire sul turismo di montagna, sulle attività alpinistiche e sulle capacità di risposta alle emergenze, in quanto tali eventi possono danneggiare le infrastrutture di accessibilità, distruggere siti, itinerari e paesaggi (Hanlye McDowell, 2024) e scoraggiare chi vorrebbe visitarli (Wedgwood, 2014).

I rischi geologici comportano costi reali per le persone, i mezzi di sussistenza, le infrastrutture e le economie. Solo gli eventi GLOF hanno causato più di 12.000 morti negli ultimi 200 anni e hanno procurato gravi danni a terreni agricoli, case, ponti, strade, centrali idroelettriche e beni culturali, spesso determinando ulteriori spostamenti interni (Shrestha et al., 2010; Carrivick e Tweed, 2016). L'area totale e il numero di laghi glaciali sono aumentati in modo significativo dagli anni '90, con il ritiro dei ghiacciai. Nei prossimi decenni si formeranno altri laghi di questo tipo, creando nuovi *hotspot* di rischio e potenziali pericoli per eventi GLOF (Adler et al., 2022). Come per molti geo-rischi, i danni sono spesso più elevati nei paesi a basso e medio reddito (riquadro 2.4) rispetto a quelli ad alto reddito (Carrivick e Tweed, 2016).

Sebbene non limitate ai rischi geologici della criosfera, la ricerca di Stäubli et al. (2018) calcola che le perdite economiche assolute nelle regioni montane relative a 713 eventi tra il 1985 e il 2014 hanno superato i 56 miliardi di dollari, hanno colpito oltre 258 milioni di persone e causato oltre 39.000 morti. L'aumento della popolazione e dell'urbanizzazione nelle regioni montane può anche esporre maggiormente persone e beni a eventi di geo-rischio, alle perdite e ai danni associati (Thornton et al., 2022).

Le conseguenze dei cambiamenti della criosfera sono amplificate per le popolazioni vulnerabili (ICIMOD, 2022). Per le popolazioni indigene e le comunità locali delle regioni montane, gli impatti umani dei cambiamenti della criosfera sono profondi e includono la riduzione della possibilità di procurarsi il cibo, il degrado dei pascoli, la perdita di coperture nevose culturalmente significative e il deterioramento delle fonti idriche essenziali (figura 2.6; Caretta et al., 2022). Le donne all'interno di queste comunità sono particolarmente vulnerabili, in quanto spesso su di loro gravano responsabilità in materia di cibo e acqua (ICIMOD, 2022).

Riquadro 2.4 Gestione delle inondazioni da collasso di laghi glaciali (GLOF nell'acronimo inglese) in Perù

Le comunità della Cordillera Blanca del Perù gestiscono da tempo gli eventi GLOF. Crolli di massi, frane e ghiacciai che si riversano nei corpi idrici hanno provocato eventi dall'impatto devastante. Ciò ha comportato notevoli sforzi ingegneristici per mitigarne gli effetti, tra cui l'abbassamento del livello dei laghi e il rafforzamento delle dighe con formazioni moreniche per prevenire l'erosione e il cedimento.

Esistono oggi condotte e tunnel di drenaggio, dighe artificiali e sistemi di allarme precoce in diversi laghi delle Ande (Mergili et al., 2020). Tra questi, i drenaggi che permettono lo svuotamento del lago Palcacocha, dal quale nel 1941 ha avuto origine un evento GLOF che ha causato la morte di circa 1.600 persone (Emmer, 2017; Carey et al., 2021).

Figura 2.6 Impatto dei cambiamenti climatici, idrici e della criosfera sulle popolazioni indigene e sulle comunità locali nelle regioni fredde

Fonte: Caretta et al. (2022, fig. 4.6, pag. 572).

2.3 Sfide della gestione dell'acqua

I sistemi idrici influenzati dalla criosfera montana si estendono ben oltre le valli montane. I cambiamenti che interessano neve e ghiaccio possono influenzare le comunità a valle, che non hanno necessariamente un diretto legame con le montagne. Una maggiore consapevolezza delle dinamiche della criosfera e del suo ruolo nel ciclo globale dell'acqua è quindi fondamentale, soprattutto tra i gestori delle risorse idriche e altri responsabili delle decisioni. La gestione e la pianificazione delle infrastrutture si basano spesso su dati storici che presuppongono la stazionarietà. Tuttavia, i cambiamenti climatici hanno dimostrato la natura illusoria di questa ipotesi, soprattutto per i sistemi alimentati da neve e ghiaccio (Milly et al., 2008). Ciò aumenta la necessità di modellare il rischio futuro per supportare la pianificazione a lungo termine.

La modellazione richiede input dai modelli climatici globali, che presentano un'elevata incertezza per quanto riguarda le aree di alta montagna (vedere capitolo 8). Colmare le lacune del monitoraggio e delle informazioni deve essere una priorità, anche per cogliere i reali costi sanitari, sociali ed economici e per identificare gli impatti potenzialmente critici per le varie popolazioni. I gruppi vulnerabili e marginalizzati, tra cui donne, persone che vivono in condizioni di povertà e popolazioni indigene e comunità locali nelle aree di alta montagna, saranno colpiti in modo smisurato dagli impatti dei cambiamenti climatici (Caretta et al., 2022).

In quanto torri d'acqua, le montagne svolgono un ruolo vitale nell'immagazzinare acqua dolce e generare deflussi. I cambiamenti nei tempi di fusione stagionale delle nevi e i passaggi da un flusso di neve relativamente affidabile a regimi di pioggia e deflusso più variabili e meno prevedibili, insieme alla perdita della capacità tampone dei ghiacciai, possono ridurre la resilienza delle comunità in periodi di stress (Somers et al., 2019; Carroll et al., 2024). Le pianure a valle spesso contribuiscono in misura minore ai flussi fluviali di origine montana. Pertanto, anche le comunità che risiedono a migliaia di chilometri di distanza possono dipendere dalle alte montagne per le loro risorse idriche (comprese le acque sotterranee) e trarre importanti benefici di resilienza dalla criosfera montana (Whitfield et al., 2020).

I cambiamenti che interessano neve e ghiaccio possono influenzare le comunità a valle, che non hanno necessariamente un diretto legame con le montagne

La consapevolezza del declino dei servizi ecosistemici forniti dalla criosfera e la preparazione a questo scenario devono essere integrate nelle politiche regionali, nazionali e globali. Gli sforzi per la mitigazione e l'adattamento includono: l'uso dell'acqua a livello urbano e agricolo con sistemi di stoccaggio alternativi per compensare la perdita della risorsa proveniente dalla criosfera; il mantenimento dei tempi dei flussi attraverso lo stoccaggio in superficie e nel sottosuolo; il miglioramento della tecnologia e dell'efficienza dell'irrigazione; il miglioramento dell'efficienza nell'uso dell'acqua. Tuttavia, sebbene l'efficienza sia importante, le strategie per ridurre la domanda assoluta di acqua saranno fondamentali. Tali interventi devono essere sostenuti a livello locale e richiederanno un approccio multiforme che comprenda strategie per ridurre la povertà, raggiungere l'uguaglianza di genere e assicurare il riconoscimento dei diversi valori e usi culturali associati all'acqua.

2.4 Conclusioni

Gli impatti del declino della criosfera montana sulle risorse idriche sono complessi e variano tra i bacini a monte e le regioni a valle. La diminuzione in termini di SWE stagionale e durata della neve causerà uno slittamento dei tempi di fusione e una diminuzione del picco dell'idrogramma di piena, con una riduzione delle portate di base della tarda stagione e una maggiore dipendenza dal deflusso delle precipitazioni e dalle acque sotterranee. Ciò influirà sull'approvvigionamento idrico e aumenterà la siccità estiva per vaste regioni a valle. L'accelerazione dei tempi e l'aumento dell'entità dello scioglimento dei ghiacciai, con il riscaldamento atmosferico, possono all'apparenza mitigare la diminuzione dell'approvvigionamento idrico derivante dalla fusione delle nevi nel breve termine, soprattutto nei periodi più caldi e secchi. Tuttavia, il suddetto fenomeno è transitorio, limitato in termini di volume di acqua e destinato a ridursi notevolmente nel corso del secolo.

I tempi e la durata delle acque di fusione sono cruciali per l'integrità dell'ecosistema, la ricarica degli acquiferi e la sicurezza alimentare. I rischi naturali, tra cui frane, inondazioni e colate detritiche, disastri a lenta insorgenza, come quelli associati alla siccità, sono influenzati dallo stato della criosfera. Gli impatti sulla disponibilità di acqua e sui livelli di pericolo sono determinati da molti fattori; non è possibile effettuare analisi semplici e univoche. Questo crea sfide per una gestione sostenibile ed equa della qualità e della quantità dell'acqua per la salute e il benessere umano, l'integrità degli ecosistemi terrestri e acquatici e la solidità delle economie e delle comunità.

Riferimenti bibliografici

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. e Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Arenson, L. U., Harrington, J. S., Koenig, C. E. e Wainstein, P. A. 2022. Mountain permafrost hydrology – A practical review following studies from the Andes. *Geosciences*, vol. 12, N. 2, pag. 48. doi.org/10.3390/geosciences12020048.

Arimitsu, M. L., Piatt, J. F. e Mueter, F. 2016. Influence of glacier runoff on ecosystem structure in Gulf of Alaska fjords. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 560, pagg. 19-40. doi.org/10.3354/meps11888.

Aubry-Wake, C., Bertoncini, A. e Pomeroy, J. W. 2022. Fire and ice: The impact of wildfire affected albedo and irradiance on glacier melt. *Earth's Future*, vol. 10, N. 4, articolo e2022EF002685. doi.org/10.1029/2022EF002685.

Azócar, G. F. e Brenning, A. 2010. Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°–33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 21, N. 1, pagg. 42-53. doi.org/10.1002/ppp.669.

Barnett, T. P., Adam, J. C. e Lettenmaier, D. P. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, vol. 438, N. 7066, pagg. 303-309. doi.org/10.1038/nature04141.

Bernhardt, M. e Schulz, K. 2010. SnowSlide: A simple routine for calculating gravitational snow transport. *Geophysical Research Letters*, vol. 37, N. 11. doi.org/10.1029/2010GL043086.

Bertoncini, A. 2024. *Using Enhanced Observations to Improve Streamflow Prediction in Cold Mountain River Basins*. Tesi di dottorato, Università di Saskatchewan.

Bertoncini, A., Aubry-Wake, C. e Pomeroy, J. W. 2022. Large-area high spatial resolution albedo retrievals from remote sensing for use in assessing the impact of wildfire soot deposition on high mountain snow and ice melt. *Remote Sensing of Environment*, vol. 278, articolo 113101. doi.org/10.1016/j.rse.2022.113101.

Buytaert, W., Moulds, S., Acosta, L., De Bièvre, B., Olmos, C., Villacis, M., Tovar, C. e Verbist, K. M. 2017. Glacial melt content of water use in the Tropical Andes. *Environmental Research Letters*, vol. 12, N. 11, articolo 114014. doi.org/10.1088/1748-9326/aa926c.

Caretta, M. A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., Lissner, T. K., Liu, J., Lopez Gunn, E., Morgan, R., Mwanga, S. e Supratid, S. 2022. Warer. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okeme e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 551-712. doi.org/10.1017/9781009325844.006.

Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. e Haeberli, W. 2012. An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, vol. 112, pagg. 733-767. doi.org/10.1007/s10584-011-0249-8.

Carey, M., McDowell, G., Huggel, C., Marshall, B., Moulton, H., Portocarrero, C., Provant, Z., Reynolds, J. M. e Vicuña, L. 2021. Chapter 8 - A socio-cryospheric systems approach to glacier hazards, glacier runoff variability, and climate change. W. Haeberlie e C. Whiteman (a cura di), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters* (Seconda edizione). Amsterdam/Oxford, Regno Unito/Cambridge, Stati Uniti, Elsevier, pagg. 215-257. doi.org/10.1016/B978-0-12-817129-5.00018-4.

Carrivick, J. L. e Tweed, F. S. 2016. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Global and Planetary Change*, vol. 144, pagg. 1-16. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.001.

Carroll, R. W., Niswonger, R. G., Ulrich, C., Varadharajan, C., Siirila-Woodburn, E. R. e Williams, K. H. 2024. Declining groundwater storage expected to amplify mountain streamflow reductions in a warmer world. *Nature Water*, vol. 2, N. 5, pagg. 419-433. doi.org/10.1038/s44221-024-00239-0.

Chiarle, M., Geertsema, M., Mortara, G. e Clague, J. J. 2021. Relations between climate change and mass movement: Perspectives from the Canadian Cordillera and the European Alps. *Global and Planetary Change*, vol. 202, articolo 103499. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103499.

Clague, J. J. e O'Connor, J. E. 2021. Capitolo 14 - Glacier-related outburst floods. W. Haeberli e C. Whiteman (a cura di), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters* (Seconda edizione). Amsterdam/Oxford, Regno Unito/Cambridge, Stati Uniti, Elsevier, pagg. 467-499. doi.org/10.1016/B978-0-12-817129-5.00019-6.

Cook, S. J., Jouvet, G., Millan, R., Rabatel, A., Zekollari, H. e Dussaillant, I. 2023. Committed ice loss in the European Alps until 2050 using a deep learning aided 3D ice flow model with data assimilation. *Geophysical Research Letters*, vol. 50, N. 23, articolo e2023GL105029. doi.org/10.1029/2023GL105029.

Cunsolo, A., Borish, D., Harper, S. L., Snook, J., Shiwak, I. e Wood, M. 2020. "You can never replace the caribou": Inuit experiences of ecological grief from caribou declines. *American Imago*, vol. 77, n. 1, pagg. 31-59. doi.org/10.1353/aim.2020.0002.

DeBeer, C. M., Sharp, M. e Schuster-Wallace, C. 2020. Glaciers and ice sheets. M. I. Goldstein e D. A. Della Sala (a cura di), *Encyclopedia of the World's Biomes*. Amsterdam/Oxford, UK/Cambridge, Stati Uniti, Elsevier, pagg. 182-194. doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12441-8.

Ellis, C. R., Pomeroy, J. W. e Link, T. E. 2013. Modeling increases in snowmelt yield and desynchronization resulting from forest gap thinning treatments in a northern mountain headwater basin. *Water Resources Research*, vol. 49, N. 2, pagg. 936-949. doi.org/10.1002/wrcr.20089.

Emmer, A. 2017. Geomorphologically effective floods from moraine-dammed lakes in the Cordillera Blanca, Peru. *Quaternary Science Reviews*, vol. 177, pagg. 220-234. doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.10.028.

ESCAP (Commissione economica e sociale per l'Asia e il Pacifico). 2023. Climate Catastrophe in the Sikkim Himalayas: Twin Tack Resilience Strategy. Sito web dell'ESCAP, blog, 23 ottobre 2023. www.unescap.org/blog/climate-catastrophe-sikkim-himalayas-twin-track-resilience-strategy.

Essery, R. e Pomeroy, J. 2004. Implications of spatial distributions of snow mass and melt rate for snow-cover depletion: Theoretical considerations. *Annals of Glaciology*, vol. 38, pagg. 261-265. doi.org/10.3189/172756404781815275.

Fang, X. e Pomeroy, J. W. 2023. Simulation of the impact of future changes in climate on the hydrology of Bow River headwater basins in the Canadian Rockies. *Journal of Hydrology*, vol. 620, articolo 129566. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129566.

Forbes, B. C., Turunen, M. T., Soppela, P., Rasmus, S., Vuojala-Magga, T. e Kitti, H. 2019. Changes in mountain birch forests and reindeer management: Comparing different knowledge systems in Sápmi, northern Fennoscandia. *Polar Record*, vol. 55, N. 6, pagg. 507-521. doi.org/10.1017/S0032247419000834.

Ford, J. D., Clark, D., Pearce, T., Berrang-Ford, L., Copland, L., Dawson, J., New, M. e Harper, S. L. 2019. Changing access to ice, land and water in Arctic communities. *Nature Climate Change*, vol. 9, N. 4, pagg. 335-339. doi.org/10.1038/s41558-019-0435-7.

Gascoin, S. 2024. A call for an accurate presentation of glaciers as water resources. Wiley *Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 11, N. 2, articolo e1705. doi.org/10.1002/wat2.1705.

Gentle, P. e Thwaites, R. 2016. Transhumant pastoralism in the context of socioeconomic and climate change in the mountains of Nepal. *Mountain Research and Development*, vol. 36, N. 2, pagg. 173-182. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-15-00011.1.

Haeberli, W., Schaub, Y. e Huggel, C. 2017. Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*, vol. 293, pagg. 405-417. doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009.

Hanly, K. e McDowell, G. 2024. The evolution of 'riskscapes': 100 years of climate change and mountaineering activity in the Lake Louise area of the Canadian Rockies. *Climatic Change*, vol. 177, articolo 49. doi.org/10.1007/s10584-024-03698-2.

Harrington, J. S., Hayashi, M. e Kurylyk, B. L. 2017. Influence of a rock glacier spring on the stream energy budget and cold water refuge in an alpine stream. *Hydrological Processes*, vol. 31, N. 26, pagg. 4719-4733. doi.org/10.1002/hyp.11391.

Hedstrom, N. R. e Pomeroy, J. W. 1998. Measurements and modelling of snow interception in the boreal forest. *Hydrological Processes*, vol. 12, N. 10-11, pagg. 1611-1625. doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1611::AID-HYP684>3.0.CO;2-4.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. e Steltzer, H. 2019a. High mountain areas. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama e N. M. Weyer (a cura di), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 131-202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.

Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B. E. N., Giesen, R. H., Hirabayashi, Y., Huss, M., Radić, V. e Slangen, A. B. 2019b. GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology*, vol. 65, N. 251, pagg. 453-467. doi.org/10.1017/jog.2019.22.

Hopkinson, C. e Young, G. J. 1998. The effect of glacier wastage on the flow of the Bow River at Banff, Alberta, 1951–1993. *Hydrological Processes*, vol. 12, N. 10-11, pagg. 1745-1762. doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11%3C1745::AID-HYP692%3E3.0.CO;2-S.

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

Huss, M. e Hock, R. 2018. Global-scale hydrologicalresponse to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, vol. 8, N. 2, pagg. 135-140. doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x.

ICIMOD (Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna). 2022. *State of Gender Equality and Climate Change in South Asia and the Hindu Kush Himalaya*. Kathmandu, ICIMOD. https://lib.icimod.org/record/35996.

Ilyashuk, B. P., Ilyashuk, E. A., Psenner, R., Tessadri, R. e Koinig, K. A. 2018. Rock glaciers in crystalline catchments: Hidden permafrost related threats to alpine headwater lakes. *Global Change Biology*, vol. 24, N. 4, pagg. 1548-1562. doi.org/10.1111/gcb.13985.

Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B. J., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T. H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A. B., Viviroli, D., Wada, W., Xiao, C., Yao, T. e Baillie, J. E. M. 2020. Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, vol. 577, pagg. 364-369. doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y.

Ingty, T. 2017. High mountain communities and climate change: Adaptation, traditional ecological knowledge, and institutions. *Climatic Change*, vol. 145, N. 1, pagg. 41-55. doi.org/10.1007/s10584-017-2080-3.

IPCC (Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico). 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contributo dei gruppi di lavoro I, II e III al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico [Core Writing Team, H. Lee e J. Romero (a cura di)]. Ginevra, IPCC, pagg. 1-34. doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

Jakob, M., Davidson, S., Bullard, G., Busslinger, M., Collier-Pandya, B., Grover, P. e Lau, C. A. 2022. Debris flood hazard assessments in steep streams. *Water Resources Research*, vol. 58, N. 4, articolo e2021WR030907. doi.org/10.1029/2021WR030907.

Jones, H. G., Pomeroy, J. W., Walker, D. A. e Hoham, R. W. (a cura di). 2001. *Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-Covered Ecosystems*. Cambridge, Regno Unito, Cambridge University Press.

Kaser, G., Großhauser, M. e Marzeion, B. 2010. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 107, N. 47, pagg. 20223-20227. doi.org/10.1073/pnas.

Khalafzai, M.-A. K., McGee, T. K. e Parlee, B. 2019. Flooding in the James Bay region of Northern Ontario, Canada: Learning from traditional knowledge of Kashechewan First Nation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 36, articolo 101100. doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101100.

Konchar, K. M., Staver, B., Salick, J., Chapagain, A., Joshi, L., Karki, S., Lo, S., Paudel, A., Subedi, P. e Ghimire, S. K. 2015. Adapting in the shadow of Annapurna: A climate tipping point. *Journal of Ethnobiology*, vol. 35, N. 3, pagg. 449-471. doi.org/10.2993/0278-0771-35.3.449.

Lehning, M., Löwe, H., Ryser, M. e Raderschall, N. 2008. Inhomogeneous precipitation distribution and snow transport in steep terrain. *Water Resources Research,* vol. 44, N. 7. doi.org/10.1029/2007WR006545.

López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Alonso-González, E., Morán-Tejeda, E. e Revuelto, J. 2020. Decoupling of warming mountain snowpacks from hydrological regimes. *Environmental Research Letters*, vol. 15, N. 11, articolo 114006. doi.org/10.1088/1748-9326/abb55f.

López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Navarro-Serrano, F. M., Vidaller, I. e Alonso-González, E. 2021. Changes in the frequency of global high mountain rain-on-snow events due to climate warming. *Environmental Research Letters*, Vol. 16, N. 9, articolo 094021. doi.org/10.1088/1748-9326/ac0dde.

Marks, D., Kimball, J., Tingey, D. e Link, T. 1998. The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest cover during rain on snow: A case study of the 1996 Pacific Northwest flood. *Hydrological Processes*, vol. 12, N. 10-11, pagg. 1569-1587. doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1569::AID-HYP682>3.0.CO;2-L.

Mergili, M., Pudasaini, S. P., Emmer, A., Fischer, J. T., Cochachin, A. e Frey, H. 2020. Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 24, N. 1, pagg. 93-114. doi.org/10.5194/hess-24-93-2020.

Miles, K. E., Hubbard, B., Irvine-Fynn, T. D., Miles, E. S., Quincey, D. J. e Rowan, A. V. 2020. Hydrology of debris-covered glaciers in High Mountain Asia. *Earth-Science Reviews*, vol. 207, articolo 103212. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103212.

Milly, P. C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P. e Stouffer, R. J. 2008. Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, vol. 319, N. 5863, pagg. 573-574. doi.org/10.1126/science.1151915.

Milner, A. M., Khamis, K., Battin, T. J., Brittain, J. E., Barrand, N. E., Füreder, L., Cauvy-Fraunié, S., Már Gíslason, G., Jacobsen, D., Hannah, D. M., Hodson, A. J., Hood, E., Lencioni, V., Ólafsson, J. S., Robinson, C. T., Tranter, M. e Brown, L. E. 2017. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 114, N. 37, pagg. 9770-9778. doi.org/10.1073/pnas.1619807114.

Mountain Research Initiative EDW Working Group. 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, vol. 5, pagg. 424-430. doi.org/10.1038/nclimate2563.

Müller, T., Lane, S. N. e Schaefli, B. 2022. Towards a hydrogeomorphological understanding of proglacial catchments: An assessment of groundwater storage and release in an Alpine catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 26, N. 23, pagg. 6029-6054. doi.org/10.5194/hess-26-6029-2022.

Norton-Smith, K., Lynn, K., Chief, K., Cozzetto, K., Donatuto, J., Hiza Redsteer, M., Kruger, L. E., Maldonado, J., Viles, C. e Whyte, K. P. 2016. Climate *Change and Indigenous Peoples: A Synthesis of Current Impacts and Experiences*. Rapporto tecnico generale PNW-GTR-944. Portland, Stati Uniti, Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, Servizio forestale, Stazione di ricerca del Pacifico nord-occidentale. doi.org/10.2737/PNW-GTR-944.

Nyima, Y. e Hopping, K. A. 2019. Tibetan lake expansion from a pastoral perspective: Local observations and coping strategies for a changing environment. *Society and Natural Resources*, vol. 32, N. 9, pagg. 965-982. doi.org/10.1080/08941920.2019.1590667.

O'Neel, S., Hood, E., Bidlack, A. L., Fleming, S. W., Arimitsu, M. L., Arendt, A., Burgess, E., Sergeant, C. J., Beaudreau, A. H., Timm, K., Hayward, G. D., Reynolds, J. H. e Pyare, S. 2015. Icefield-to-ocean linkages across the northern Pacific coastal temperate rainforest ecosystem. *BioScience*, vol. 65, N. 5, pagg. 499-512. doi.org/10.1093/biosci/biv027.

Pepin, N. C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., Palazzi, E., Seibert, P., Serafin, S., Schöner, W., Terzago, S., Thornton, J. M., Vuille, M. e Adler, C. 2022. Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. *Reviews of Geophysics*, vol. 60, N. 1, articolo e20RG000730. doi.org/10.1029/2020RG000730.

Pomeroy, J. W. e Li, L. 2000. Prairie and arctic areal snow cover mass balance using a blowing snow model. *Journal of Geophysical Research*: Atmospheres, vol. 105, N. D21, pagg. 26619-26634. doi.org/10.1029/2000JD900149.

Pomeroy, J. W., Brown, T., Fang, X., Shook, K. R., Pradhananga, D., Armstrong, R., Harder, P., Marsh, C., Costa, D., Krogh, S. A., Aubry-Wake, C., Annand, H., Lawford, P., He, Z., Kompanizare, M. e Lopéz Moreno, J. L. 2022. The cold regions hydrological modelling platform for hydrological diagnosis and prediction based on process understanding. *Journal of Hydrology*, vol. 615, articolo 128711. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128711.

Postigo, J. C. 2020. The role of social institutions in Indigenous Andean pastoralists' adaptation to climate-related water hazards. *Climate and Development*, vol. 13, N. 9, pagg. 780-791. doi.org/10.1080/17565529.2020.1850409.

Rasmus, S., Turunen, M., Luomaranta, A., Kivinen, S., Jylhä, K. e Räihä, J. 2020. Climate change and reindeer management in Finland: Co-analysis of practitioner knowledge and meteorological data for better adaptation. *Science of the Total Environment*, Vol. 710, articolo 136229. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136229.

Rasouli, K., Pomeroy, J. W. e Whitfield, P. H. 2019. Are the effects of vegetation and soil changes as important as climate change impacts on hydrological processes? *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, N. 12, pagg. 4933-4954. doi.org/10.5194/hess-23-4933-2019.

Rounce, D. R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., Berthier, E., Compagno, L., Copland, L., Farinotti, D., Menounos, B. e McNabb, R. W. 2023. Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. *Science*, vol. 379, N. 6627, pagg. 78-83. doi.org/10.1126/science.abo1324.

Schaffer, N., MacDonell, S., Réveillet, M., Yáñez, E. e Valois, R. 2019. Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Regional Environmental Change*, vol. 19, pagg. 1263-1279. doi.org/10.1007/s10113-018-01459-3.

Sepúlveda, S. A., Tobar, C., Rosales, V., Ochoa-Cornejo, F. e Lara, M. 2023. Megalandslides and deglaciation: Modelling of two case studies in the Central Andes. *Natural Hazards*, vol. 118, N. 2, pagg. 1561-1572. doi.org/10.1007/s11069-023-06067-x.

Sharp, M. e Tranter, M. 2017. Glacier biogeochemistry. *Geochemical Perspectives*, vol. 6, N. 2, pagg. 173-174. doi.org/10.7185/geochempersp.6.2.

Shrestha, A. B., Eriksson, M., Mool, P., Ghimire, P., Mishra, B. e Khanal, N. R. 2010. Glacial lake outburst flood risk assessment of Sun Koshi basin, Nepal. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 1, N. 2, pagg. 157-169. doi.org/10.1080/19475701003668968.

Somers, L. D. e McKenzie, J. M. 2020. A review of groundwater in high mountain environments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 7, N. 6, articolo e1475. doi.org/10.1002/wat2.1475.

Somers, L. D., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Lagos, P., Ng, G. H. C., Wickert, A. D., Yarleque, C., Baraër, M. e Silva, Y. 2019. Groundwater buffers decreasing glacier melt in an Andean watershed – but not forever. *Geophysical Research Letters*, vol. 46, N. 22, pagg. 13016-13026. doi.org/10.1029/2019GL084730.

Stäubli, A., Nussbaumer, S. U., Allen, S. K., Huggel, C., Arguello, M., Costa, F., Hergarten, C., Martínez, R., Soto, J., Vargas, R., Zambrano, E. e Zimmermann, M. 2018. Analysis of weather-and climate-related disasters in mountain regions using different disaster databases. S. Mal, R. Singh e C. Huggel (a cura di), *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction: Towards Sustainable Development Goals*. Cham, Svizzera, Springer, pagg. 17-41. doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_2.

Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Viviroli, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. e Adler, C. 2022. Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls. *PLoS ONE*, vol. 17, N. 7, articolo e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.

UNESCO/IUCN (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura/Unione Internazionale per la conservazione della natura). 2022. *World Heritage Glaciers: Sentinels of Climate Change*. Parigi/Gland, Svizzera, UNESCO/IUCN. doi.org/10.3929/ethz-b-000578916.

USGS (United States Geological Survey). 2013. Glossary of Glacier Terminology. Sito web dell'USGS. https://pubs.usgs.gov/of/2004/1216/f/f.html#. (Consultato il 22 luglio 2024.)

––. 2019. Sublimation and the Water Cycle. Sito web dell'USGS. www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/sublimation-and-water-cycle#:~:text=Sublimation%20is%20the%20conversion%20between,with%20no%20intermediate%20liquid%20stage. (Consultato il 22 luglio 2024.)

Vahedifard, F., Abdollahi, M., Leshchinsky, B. A., Stark, T. D., Sadegh, M. e AghaKouchak, A. 2024. Interdependencies between wildfire induced alterations in soil properties, near surface processes, and geohazards. *Earth and Space Science*, vol. 11, N. 2, articolo e2023EA003498. doi.org/10.1029/2023EA003498.

Vanderwall, J. W., Muhlfeld, C. C., Tappenbeck, T. H., Giersch, J., Ren, Z. e Elser, J. J. 2024. Mountain glaciers influence biogeochemical and

ecological characteristics of high elevation lakes across the northern Rocky Mountains, USA, USA. *Limnology and Oceanography*, vol. 69, N. 1, pagg. 37-52. doi.org/10.1002/lno.12434.

Van Tiel, M., Aubry-Wake, C., Somers, L., Andermann, C., Avanzi, F., Baraer, M., Chiogna, G., Daigre, C., Das, S., Drenkhan, F., Farinotti, D., Fyffe, C. L., de Graaf, I., Hanus, S., Immerzeel, W., Koch, F., McKenzie, J. M., Müller, T., Popp, A. L., Saidaliyeva, Z., Schaefli, B., Schilling, O. S., Teagai, K., Thornton, J. M. e Yapiyev, V. 2024. Cryosphere–groundwater connectivity is a missing link in the mountain water cycle. *Nature Water*, vol. 2, N. 7, pagg. 624-637. doi.org/10.1038/s44221-024-00277-8.

Verrall, B. e Pickering, C. M. 2020. Alpine vegetation in the context of climate change: A global review of past research and future directions. *Science of the Total Environment*, vol. 748, articolo 141344. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141344.

Viviroli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M. e Wada, Y. 2020. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability*, vol. 3, N. 11, pagg. 917-928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.

Wedgwood, R. 2014. *Gone like a Ghost: The Ghost Glacier Failure and Subsequent Outburst Flood, Mt. Edith Cavell, Jasper National Park*. Sesta Conferenza canadese sui rischi geologici - GeoHazards (vol. 6). https://cgs.ca/docs/geohazards/kingston2014/Geo2014/pdfs/geoHaz6Paper201.pdf.

Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R. e Swetnam, T. W. 2006. Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. *Science*, vol. 313, N. 5789, pagg. 940-943. doi.org/10.1126/science.1128834.

Whitfield, P. H., Kraaijenbrink, P. D., Shook, K. R. e Pomeroy, J. W. 2020. The spatial extent of hydrological and landscape changes across the mountains and prairies of the Saskatchewan and Mackenzie basins. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, pagg. 1-68. doi.org/10.5194/hess-2019-671.

Williamson, C. J., Cameron, K. A., Cook, J. M., Zarsky, J. D., Stibal, M. e Edwards, A. 2019. Glacier algae: A dark past and a darker future. *Frontiers in Microbiology*, vol. 10, articolo 436973. doi.org/10.3389/fmicb.2019.00524.

Yager, K., Valdivia, C., Slayback, D., Jiménez, E., Meneses, R. I., Palabral, A., Bracho, M., Romero, D., Hubbard, A., Pacheco, P., Calle, A., Alberto, H., Yana, O., Ulloa, D., Zeballos, G. e Romero, A. 2019. Socio-ecological dimensions of Andean pastoral landscape change: Bridging traditional ecological knowledge and satellite image analysis in Sajama National Park, Bolivia. *Regional Environmental Change*, vol. 19, N. 5, pagg. 1353-1369. doi.org/10.1007/s10113-019-01466-y.

Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S. e Cogley, J. G. 2019. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, vol. 568, N. 7752, pagg. 382-386. doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0.

Zhang, Y., Gao, T., Kang, S., Shangguan, D. e Luo, X. 2021. Albedo reduction as an important driver for glacier melting in Tibetan Plateau and its surrounding areas. *Earth-Science Reviews*, vol. 220, articolo 103735. doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103735.

Capitolo 3

Alimentazione e agricoltura

FAO
Matthew England, Patricia Mejías-Moreno, Jippe Hoogeveen, Rosalaura Romeo, Sara Manuelli e Fabio Parisi

Questo capitolo è strutturato intorno a tre argomenti principali: lo stato della sicurezza alimentare e dell'agricoltura di montagna; le sfide dovute ai cambiamenti climatici e ad altri fattori che influenzano la disponibilità di acqua per l'agricoltura e la sicurezza alimentare; e le potenziali opzioni di risposta.

3.1 Sicurezza alimentare e agricoltura

3.1.1 La sicurezza alimentare in montagna

L'agricoltura e la pastorizia sono fonti essenziali di sostentamento[9] per le popolazioni delle aree montane[10] (FAO, 2019), dove si stima che risiedano circa 1,1 miliardi di persone. Nei paesi in via di sviluppo, in base alle valutazioni, sono 648 milioni le persone delle aree montane che vivono in zone rurali, di cui la maggior parte è impegnata in attività legate all'agricoltura e alla pastorizia. Nel 2017, più della metà di queste persone (346 milioni) versava in condizioni di insicurezza alimentare. In altre parole, nei paesi in via di sviluppo un abitante delle zone rurali di montagna su due viveva in aree in cui la disponibilità giornaliera di calorie e proteine era stimata al di sotto della soglia minima necessaria per una vita sana (Romeo et al., 2020). Nella regione dell'Hindu Kush Himalaya, più del 30% della popolazione di montagna soffre di insicurezza alimentare, e sono le donne e i bambini i più esposti al rischio (Wester et al., 2019).

L'agricoltura e la pastorizia sono fonti essenziali di sostentamento per le popolazioni delle aree montane

I fattori che contribuiscono all'insicurezza alimentare in montagna includono la variabilità climatica, gli eventi meteorologici estremi, i disastri causati dai rischi naturali, la geografia fisica e le condizioni socioeconomiche (riquadro 3.1). La sicurezza alimentare può essere ulteriormente limitata dall'isolamento e dall'inaccessibilità (ad esempio, la distanza dalle strade e dai mercati alimentari), dalle stagioni di crescita delle colture, dai conflitti, dal degrado dei terreni (che determina la scarsa qualità dei suoli), dalle grandi variazioni nella disponibilità di acqua per l'agricoltura e dai bassi livelli di meccanizzazione (Romeo et al., 2020).

Con riferimento ai bacini idrografici alimentati dallo scioglimento della criosfera, va da sé che la produttività agricola a valle nelle pianure è legata ai fenomeni di fusione che si verificano a monte. L'aumento dei livelli di fusione della neve e dei ghiacci sta portando a una maggiore variabilità stagionale (relativa sia ai tempi che ai volumi) del deflusso e della portata dei fiumi (Viviroli et al., 2020). Questo fenomeno è stato documentato, ad esempio, nelle pianure indo-gangetiche dell'Asia meridionale: una vera sfida per gli agricoltori del bacino del fiume Indo che si affidano allo scioglimento della criosfera per l'irrigazione nella stagione secca (Biemans et al., 2019).

3.1.2 Agricoltura di montagna

L'agricoltura di montagna è definita in senso lato come l'insieme delle attività agricole che si svolgono su terreni ad altezze elevate e su pendii montani, comprese le pratiche di raccolta e conservazione dell'acqua. I sistemi di produzione agricola in montagna includono la coltivazione di colture irrigue e pluviali, la pastorizia e l'agropastorizia, la silvicoltura e l'agroforestazione, la pesca d'acqua dolce e l'acquacoltura (FAO, 2022). L'agricoltura di montagna è caratterizzata da appezzamenti di terra di ridotte dimensioni e frammentati, coltivati prevalentemente da piccoli agricoltori[11].

---

[9] Insieme a fonti di reddito non derivanti dall'agricoltura come le rimesse, le piccole imprese, le piante officinali, il lavoro salariato e il turismo (FAO, 2019).

[10] L'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura utilizza la definizione di montagna del World Conservation Monitoring Centre del Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (Romeo et al., 2020, pag. 8).

[11] Piccoli agricoltori, pastori, guardie forestali e pescatori che gestiscono superfici che variano da meno di 1 ettaro a 10 ettari. I piccoli proprietari incentrano la loro attività sulla famiglia: in questo senso, cercano di favorire la stabilità della loro azienda agricola, utilizzano principalmente la manodopera di membri della famiglia per la produzione e destinano parte dei prodotti al consumo familiare.

Riquadro 3.1 Sicurezza alimentare e Obiettivi di sviluppo sostenibile

«La sicurezza alimentare esiste quando tutte le persone, in ogni momento, hanno accesso fisico ed economico a cibo sufficiente, sicuro e nutriente per soddisfare i loro bisogni dietetici e le loro preferenze alimentari per una vita attiva e sana» (FAO, 1996, punto 1). La sicurezza alimentare ha quattro dimensioni: disponibilità, accessibilità, utilizzo e stabilità (FAO, 2014).

La disponibilità alimentare si riferisce alla disponibilità fisica di livelli adeguati di cibo in una determinata area.

L'accessibilità degli alimenti si riferisce alla possibilità di accedere fisicamente ed economicamente al cibo.

L'utilizzo degli alimenti si riferisce alla qualità, alla sicurezza e all'assorbimento degli stessi, il tutto accompagnato da un adeguato stato di salute.

La stabilità alimentare è garantita quando la disponibilità, l'accessibilità e l'utilizzo degli alimenti sono assicurati per tutto l'anno e per un lungo periodo (Banca mondiale, s.d.).

La sicurezza alimentare è quindi fondamentale per il raggiungimento di numerosi Obiettivi di sviluppo sostenibile, tra cui l'Obiettivo 1 (sconfiggere la povertà), l'Obiettivo 2 (sconfiggere la fame), l'Obiettivo 3 (salute e benessere), l'Obiettivo 6 (acqua pulita e servizi igienico-sanitari), l'Obiettivo 12 (consumo e produzione responsabili) e l'Obiettivo 13 (lotta contro il cambiamento climatico), nonché l'indicatore 15.4.2 (indice di copertura verde delle montagne).

Le comunità montane conservano molte delle più rare varietà di colture e piante officinali

Si stima che il 45% delle aree montane del mondo non sia idoneo (o lo sia solo marginalmente) alla coltivazione, alla pastorizia o alle attività forestali (Romeo et al., 2020). Con l'aumento dell'altitudine, i suoli diventano meno profondi e meno fertili, e le temperature più basse limitano l'attività biologica. I terreni sono spesso soggetti a lisciviazione dei nutrienti attraverso il movimento dell'acqua e l'erosione eolica nelle aree esposte. Di conseguenza, i terreni di montagna sono spesso meno produttivi e più vulnerabili rispetto a quelli di pianura (FAO, 2015a).

Le montagne hanno caratteristiche distinte che influenzano lo sviluppo dell'agricoltura, come versanti ripidi e inclinati, creste e picchi arrotondati o taglienti. Le aree di coltivazione sono spesso ristrette e l'uso della meccanizzazione è limitato. Numerosi agricoltori di montagna hanno abbandonato i sistemi agricoli tradizionali e si affidano sempre più alle colture da reddito per il loro sostentamento (FAO, 2019). Per via dell'altitudine, le condizioni climatiche variano in modo significativo, con forti oscillazioni di temperatura giornaliere e stagionali. La crescita delle colture è più lenta a causa delle temperature più basse ad alta quota, e gli agricoltori in genere ottengono un raccolto all'anno (FAO, 2015b).

Le comunità montane conservano molte delle più rare varietà di colture e piante officinali. Hanno sviluppato preziose conoscenze e tecniche tradizionali riguardo a coltivazione, allevamento e raccolta dell'acqua che contribuiscono a sostenere interi ecosistemi (Romeo et al., 2020).

Sistemi di produzione agricola irrigua e pluviale

L'agricoltura irrigua è tipica delle aree montane aride e semi-aride, caratterizzate da precipitazioni annue inferiori a 350 millimetri. Le fonti d'acqua per l'irrigazione includono pozzi artesiani profondi, acqua di fiume, acqua immagazzinata localmente e acqua piovana raccolta nei bacini. I contadini che utilizzano i sistemi di irrigazione tendono a diversificare la produzione per garantire la sicurezza alimentare, optando per colture di alto valore, ortaggi, alberi da frutto e piante ornamentali. Vengono anche coltivate colture da campo come riso, grano e mais (FAO, 2022).

L'agricoltura pluviale in montagna viene praticata quando le precipitazioni superano i 400 millimetri durante la stagione umida. Viene spesso utilizzata come approccio all'agricoltura conservativa; prevede un uso minimo del suolo o l'assenza di lavorazione del terreno, la conservazione delle stoppie e la rotazione delle colture. Le colture non irrigue comprendono: cereali come orzo, mais, riso e grano; legumi come ceci, piselli e lenticchie; colture orticole come alberi da frutto, uva, ortaggi e piante officinali (FAO, 2019; 2022).

La coltivazione a terrazza è ampiamente praticata in tutto il mondo sui pendii delle montagne

Coltivazione a terrazza nelle zone montane

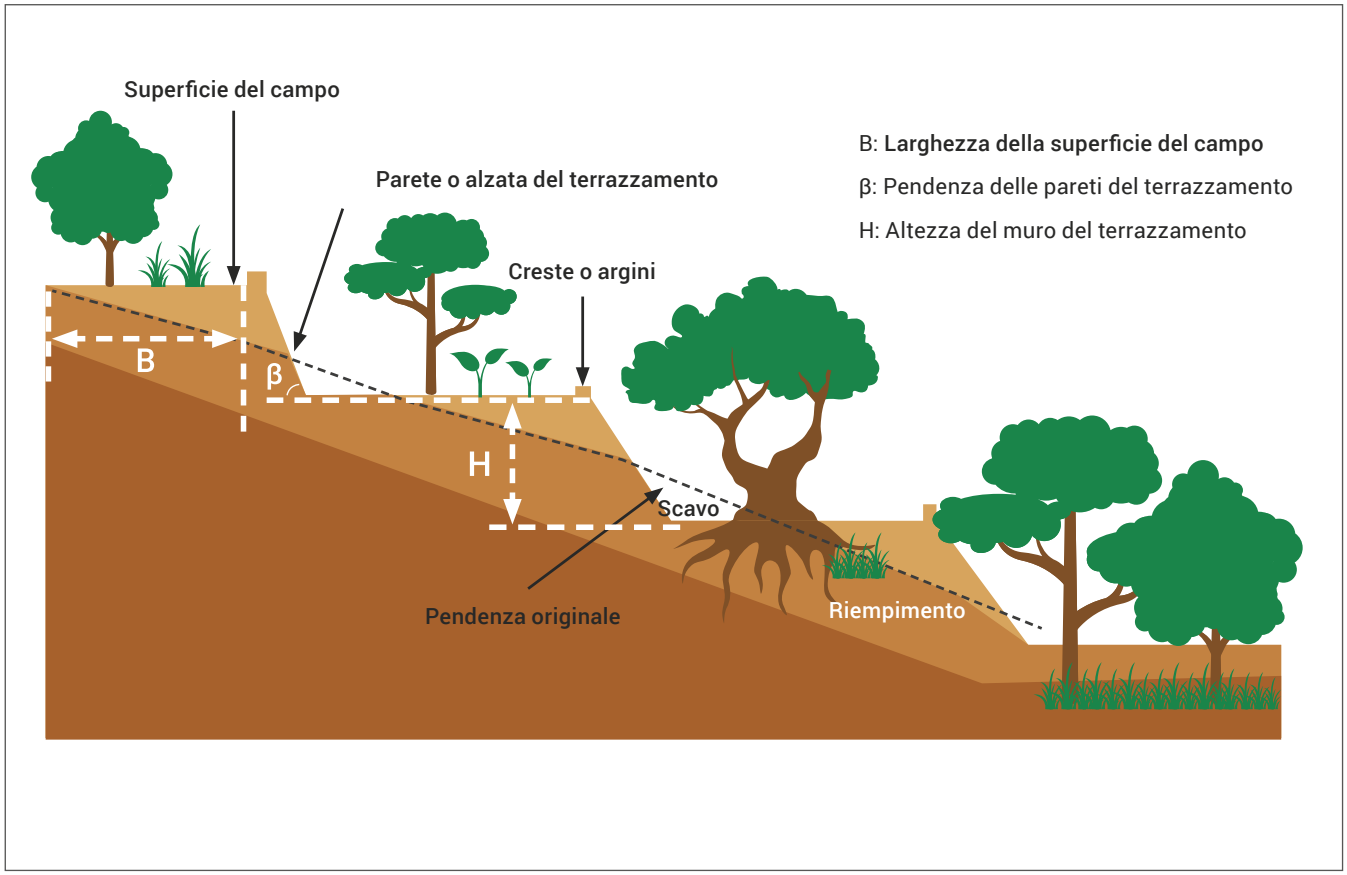
La coltivazione a terrazza è ampiamente praticata in tutto il mondo sui pendii delle montagne (Chapagain e Raizada, 2017; FAO, 2022). Si tratta di un'importante fonte di produzione alimentare e di reddito per i piccoli agricoltori. È stata praticata per migliaia di anni, a partire dal V secolo a.C. in Cina e nello Yemen (FAO, 2019).

La coltivazione a terrazza si adatta in modo innovativo alle condizioni di pendenza locali. Lungo la pendenza si realizzano tagli e riempimenti di terra (figura 3.1), mentre i terreni coltivabili vengono ampliati costruendo aree di riempimento. L'ampiezza di un terrazzamento dipende dall'inclinazione del pendio: quanto più quest'ultimo è ripido, tanto più sarà stretto il piano di coltivazione e più alto il muro. Le creste o argini svolgono un ruolo importante nell'intercettazione del deflusso dell'acqua (Deng et al., 2021).

Una coltivazione a terrazza adeguatamente progettata, costruita e mantenuta offre numerosi vantaggi (FAO, 2019). Tra questi, la diminuzione del deflusso delle acque superficiali, la promozione della conservazione dell'acqua, la riduzione dell'erosione del suolo, la stabilizzazione dei pendii, il miglioramento dell'habitat e della biodiversità e il mantenimento del patrimonio culturale (riquadro 3.2; Deng et al., 2021).

La coltivazione a terrazza si può praticare per numerose colture. Queste includono colture da campo e orticole, foraggi e altre colture che richiedono pratiche di gestione specifiche (ad esempio l'irrigazione), nonché sistemi agroforestali e acquacoltura. Nella maggior parte delle aziende agricole a terrazza, l'irrigazione dipende dalla pioggia: di conseguenza, molti terrazzamenti non sono produttivi se non si ricorre a macchinari e sistemi di irrigazione adeguati (Chapagain e Raizada, 2017).

Figura 3.1 Schema in sezione di un pendio terrazzato



Fonte: basato su Deng et al. (2021, fig. 1, pag. 345).

Una coltivazione arborea insostenibile può portare a un aumento dell'erosione del suolo e a una riduzione dell'infiltrazione dell'acqua nel terreno

Una sfida a questo tipo di coltivazione è costituita dal rischio di crollo dei terrazzamenti: più alto è il muro della terrazza, maggiore è il rischio di cedimento. Altre sfide che limitano la produzione sono rappresentate da: terreni stretti e limitati per la coltivazione; requisiti significativi di manodopera; difficoltà nell'uso di macchinari oltre agli strumenti tradizionali; scarso accesso ai mezzi necessari alla produzione agricola, ai mercati e ai servizi (Deng et al., 2021). La maggior parte delle aziende agricole che coltivano su terrazzamenti è gestita in modo tradizionale, utilizzando strumenti semplici, una limitata forza animale e una manodopera familiare relativamente abbondante. Tuttavia, una piccola percentuale di queste aziende è passata dalle tecniche antiche a quelle moderne (FAO, 2019).

Sistemi di produzione zootecnica pastorale e agropastorale

Nei sistemi pastorali il bestiame viene nutrito con vegetazione alimentata dalla pioggia come erbe, legumi, arbusti e altre varietà naturali che forniscono foraggio. Questa pratica rimane comune in molte aree montane e ad alta quota, come nella steppa tibetana a più di 4.000 metri di altitudine (Sheehy et al., 2006). Tuttavia, lo sfruttamento eccessivo può determinare il degrado dei pascoli, l'erosione del suolo e la perdita di biodiversità. I sistemi agropastorali integrano l'allevamento di bestiame di diverso tipo, l'utilizzo di pascoli naturali e la coltivazione di varie colture da campo come orzo, foraggio, arbusti e alberi (FAO, 2022).

Riquadro 3.2 Il sistema dei terrazzamenti di riso di Honghe Hani

Il sistema di risaie terrazzate di Honghe Hani, che copre un'area di circa 70.000 ettari, si trova nella provincia dello Yunnan, in Cina, sulle pendici meridionali della montagna Honghe Ailao. È stato costruito un complesso sistema di canali per portare l'acqua dalle cime boscose delle montagne alle terrazze in cui si coltiva il riso. Questa tecnica di gestione del territorio fornisce molteplici beni e servizi per il sostentamento locale, contribuendo al fabbisogno di cibo e biomasse a uso combustibile, favorendo al contempo la conservazione ecologica e preservando le pratiche culturali locali (FAO, 2019). Il sistema promuove le colture alimentari tradizionali e la biodiversità agricola: nell'area si coltivano 195 varietà di riso, tra cui 48 di riso locale. Tuttavia, le pratiche di coltivazione ad alto rendimento e varietà uniformi, oltre ad aver determinato un aumento del turismo, stanno minacciando l'equilibrio del sistema delle terrazze di riso di Honghe Hani (Yang et al., 2017).

Sistema dei terrazzamenti di riso di Honghe Hani nella provincia dello Yunnan, Cina

Foto: © FAO/Min Qingwen.

Il sistema di terrazze di riso di Honghe Hani nel 2010 è stato dichiarato sito GIAHS (Globally Important Agricultural Heritage Systems), in quanto sistema "foresta-villaggio-terrazza-acqua-cultura". I GIAHS sono definiti come sistemi eccezionali dal punto di vista dell'uso del suolo e del paesaggio, che è ricco di biodiversità significativa a livello globale e trae origine dall'adattamento di una comunità al suo ambiente (FAO, 2019). L'iniziativa mira a stabilire una base per il riconoscimento internazionale, la conservazione dinamica e la gestione sostenibile di tali sistemi. Le funzioni dei GIAHS in relazione all'agricoltura comprendono mezzi di sussistenza, conservazione del paesaggio e dell'agrobiodiversità, conoscenze tradizionali e servizi ecosistemici.

L'iniziativa dei GIAHS è stata lanciata nel 2002 ed è diventata un programma ufficiale dell'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura nel 2015. Al 2024, 89 siti in 28 paesi hanno ricevuto questo riconoscimento internazionale (FAO, 2024). I GIAHS sono esempi concreti di pratiche agricole sostenibili, che contribuiscono alla sicurezza alimentare e al sostentamento delle comunità rurali su piccola scala, conservando colture e conoscenze tradizionali e al contempo sviluppando resilienza (FAO, 2019). Un'alta percentuale di siti GIAHS si trova in montagna, dove vengono utilizzati strumenti e metodi tradizionali in uso da secoli.

Sistemi di produzione forestale e agroforestale

La silvicoltura e i sistemi agroforestali sono importanti fonti di sostentamento in montagna, in quanto forniscono beni e servizi ambientali essenziali come legname, legna da ardere, stoccaggio del carbonio e altri prodotti che migliorano la vita delle persone che vivono in montagna (vedere capitolo 6). Le foreste coprono circa il 40% delle aree montane e svolgono una funzione protettiva contro le calamità naturali stabilizzando i pendii ripidi, regolando i flussi verso gli acquiferi, riducendo il ruscellamento superficiale e l'erosione del suolo e mitigando il rischio di frane e inondazioni. Una coltivazione arborea insostenibile può portare a un aumento dell'erosione del suolo e a una riduzione dell'infiltrazione dell'acqua nel terreno (Romeo et al., 2021; FAO, 2022).

Acquacoltura e pesca d'acqua dolce

Nelle aree montane senza sbocco sul mare e senza accesso alle risorse ittiche marine, i pesci di laghi, fiumi e bacini idrici rappresentano un'importante fonte di proteine animali, spesso su base stagionale (Petr e Swar, 2002; Alpiev et al., 2013). La pesca in montagna viene praticata relativamente su piccola scala (FAO, 2003), per cui i sistemi integrati di agricoltura-acquacoltura possono essere particolarmente importanti in queste aree. Ad esempio, l'allevamento di pesci sui terrazzamenti coltivati a riso ottimizza la produttività del terreno, la redditività e la sostenibilità. I pesci migliorano la fertilità del suolo aumentando la disponibilità di ossigeno e depositando azoto e fosforo. Influiscono inoltre sulla presenza di parassiti, poiché regolano la proliferazione di piante acquatiche infestanti e di alghe che ospitano parassiti in competizione con il riso per i nutrienti. In cambio, la coltivazione del riso fornisce ai pesci cibo come plancton, organismi perifitici e bentonici. La temperatura dell'acqua viene inoltre mantenuta costante dall'effetto ombreggiante del riso, consentendo ai pesci di prosperare durante i caldi mesi estivi (Chapagain e Raizada, 2017).

A livello globale, l'acqua proveniente dalle montagne contribuisce in modo significativo all'irrigazione delle pianure

3.1.3 Dipendenza a valle dalle acque di montagna per l'agricoltura (irrigua)

A livello globale, l'acqua proveniente dalle montagne contribuisce in modo significativo all'irrigazione delle pianure. È stato stimato che il contributo varia a seconda dei bacini idrografici e delle regioni (Viviroli et al., 2020). Ad esempio, alcune aree del bacino dell'Indo dipendono in modo sostanziale dalle acque di montagna – comprese quelle originate dallo scioglimento della criosfera – per garantire l'irrigazione in pianura nella stagione secca (Biemans et al., 2019). Il contributo dell'acqua di montagna all'irrigazione è ancora più importante nei bacini con limitate risorse idriche alternative (Viviroli et al., 2020).

3.2 Sfide

Nelle zone di alta montagna, come quelle di Afghanistan, India e Pakistan, la neve e l'acqua di fusione dei ghiacciai vengono utilizzate per l'irrigazione e aiutano a mantenere l'umidità del suolo per pascoli e praterie (Rasul e Molden, 2019).

3.2.1 Impatti della fusione della criosfera indotta dal clima

I cambiamenti nel tasso di fusione dei ghiacciai e delle nevi influenzano i tempi e il volume del deflusso dell'acqua, e quindi la disponibilità della risorsa per l'agricoltura irrigua. Ciò è di importanza cruciale per la produzione agricola in montagna e nelle pianure a valle (Milner et al., 2017; Hock et al., 2019). Gli alti livelli di povertà e insicurezza alimentare di alcune comunità montane contribuiscono alla loro vulnerabilità agli impatti dei cambiamenti della criosfera sull'agricoltura (Adler et al., 2022). Questo fenomeno è stato osservato, ad esempio, nella regione dell'Hindu Kush Himalaya (McDowell et al., 2019; Rasul e Molden, 2019).

Su scala intra-annuale, all'interno dei bacini e dei fiumi alimentati dai ghiacciai è stato osservato un picco di fusione anticipato della neve primaverile. Ciò pone agli agricoltori la sfida di prevedere con precisione i tempi per lo stoccaggio dell'acqua per i sistemi di irrigazione, nonché di gestire i programmi di semina delle colture primaverili. La fusione dei ghiacciai e il deflusso sono maggiori in estate e durante il giorno, quando le temperature dell'aria e le radiazioni solari sono più elevate. All'interno di alcuni bacini idrografici, che dipendono dal bilancio di massa glaciale e dalle condizioni idrologiche locali, una maggiore fusione e un deflusso estivo più consistente possono giovare agli agricoltori, in quanto determinano una disponibilità superiore di acqua per l'irrigazione nella stagione secca. Tuttavia, esistono rischi associati a inondazioni locali dovute all'aumento delle acque di fusione estive (Hock et al., 2019).

Con la riduzione della massa glaciale, il deflusso annuale aumenta *in primis* nei bacini e nei fiumi alimentati dai ghiacciai. Dopo alcuni anni o decenni, viene raggiunto un punto definito picco idrico (vedere riquadro 2.2), superato il quale il deflusso delle acque di fusione dei ghiacciai diminuisce con la riduzione della massa glaciale: ciò può comportare una minore disponibilità di acqua per l'irrigazione e l'agricoltura. Vi sono forti evidenze che il picco idrico sia già stato superato nei fiumi alimentati dai ghiacciai delle Ande tropicali, del Canada occidentale e delle Alpi svizzere (Hock et al., 2019). I livelli e le tempistiche dell'aumento dell'acqua di fusione dei ghiacciai non sono stati esplorati nell'intera regione dell'Hindu Kush Himalaya (Wester et al., 2019).

La riduzione del manto nevoso può influire anche sull'agricoltura, attraverso effetti diretti sull'umidità del suolo

Impatto della fusione della criosfera sull'agricoltura nelle aree montane

Agricoltura irrigua e pluviale

È dimostrato che la diminuzione del flusso dei torrenti, dovuta alla fusione dei ghiacciai o alla riduzione del manto nevoso, ha determinato una minore disponibilità di acqua per l'irrigazione delle colture, con conseguente calo delle rese agricole in diverse località montane (Hock et al., 2019). Tra queste, ricordiamo le Ande peruviane, dove si è registrata una riduzione del deflusso stagionale a causa del ritiro dei ghiacciai, con ripercussioni negative sulle colture (Bury et al., 2011), nonché le montagne del Karakoram, in Pakistan, caratterizzate da una ridotta disponibilità stagionale di acqua per le colture irrigue a causa del ritiro dei ghiacciai e della riduzione del manto nevoso (Nüsser e Schmidt, 2017; Nüsser et al., 2019). Al contrario, sulle Ande meridionali è stata osservata una maggiore disponibilità di acqua per l'irrigazione che ha dato luogo a un incremento delle rese agricole; si tratta di una circostanza connessa all'aumento dell'acqua di fusione dovuto al ritiro dei ghiacciai (Young et al., 2010).

La riduzione del manto nevoso può influire anche sull'agricoltura, attraverso effetti diretti sull'umidità del suolo. Le comunità rurali dipendono da livelli adeguati di umidità del suolo al momento della semina, spesso associati ad attività irrigue rese possibili dallo scioglimento dei ghiacciai e delle nevi (Hock et al., 2019). La riduzione del manto nevoso è stata segnalata in Nepal, dove questo fenomeno ha portato all'inaridimento dei suoli e a rese inferiori sulle colture di patate e foraggio (Smadja et al., 2015).

Pastorizia

I cambiamenti nella temperatura e nei regimi idrici possono influenzare la pastorizia di montagna (Hock et al., 2019). «I cambiamenti relativi alla neve e ai ghiacciai influenzano negativamente i pastori nelle loro residenze estive e negli accampamenti invernali sull'Himalaya (Namgay et al., 2014) e le montagne scandinave (Mallory e Boyce, 2018). La riduzione delle nevicate invernali ha portato a una minore qualità dei pascoli [per il bestiame] in Nepal (Gentle e Maraseni, 2012) e in India (Ingty, 2017). In Nepal, gli allevatori hanno parlato di scarsità d'acqua in relazione alle fonti tradizionali ubicate lungo le rotte migratorie (Gentle e Thwaites, 2016). L'aumento dell'acqua di fusione dei ghiacciai ha causato un incremento delle dimensioni dei laghi sull'altopiano tibetano, intaccando le aree di pascolo e inducendo i pastori a modificare le loro rotte di spostamento stagionale (Nyima e Hopping, 2019). Tuttavia, l'aumento delle temperature, con i relativi effetti sul manto nevoso, ha alcuni impatti positivi. La migrazione stagionale inizia prima nel Pakistan settentrionale e la permanenza nei pascoli estivi dura più a lungo (Joshi et al., 2013), come in Afghanistan (Shaoliang et al., 2012)» (Hock et al., 2019, pag. 172).

Impatto della fusione della criosfera sull'agricoltura nei bacini idrografici a valle

Durante la stagione secca, l'acqua di fusione dei ghiacciai rappresenta un'importante fonte idrica per garantire l'irrigazione delle pianure a valle in estate. Può ridurre la variabilità del deflusso fluviale da un anno all'altro, in alcuni casi anche a distanze di centinaia di chilometri (Hock et al., 2019).

Le aree agricole di pianura che ricevono acqua per l'irrigazione da fiumi alimentati dalla fusione dei ghiacciai e delle nevi sono destinate a subire impatti negativi in alcune regioni. Ciò è dovuto alla riduzione della fusione e del deflusso, il che è strettamente legato alla diminuzione della massa glaciale e del manto nevoso nel tempo (Hock et al., 2019; Viviroli et al., 2020). Ad esempio, i sistemi fluviali che hanno origine nella regione dell'Hindu Kush Himalaya, come il fiume Indo, dipendono in modo significativo dall'acqua di fusione dei ghiacciai e delle nevi per l'irrigazione durante la stagione secca pre-monsonica. Sono altresì particolarmente vulnerabili alla riduzione dei fenomeni di fusione correlati alla diminuzione della massa glaciale e del manto nevoso nel tempo (Biemans et al., 2019; Nie et al., 2021; Lutz et al., 2022; Molden et al., 2022; riquadro 3.3). Inoltre, si prevede che i cambiamenti che interessano la prima fase del disgelo primaverile e il picco di fusione dell'acqua della neve possano alterare i tempi di deflusso per l'irrigazione a valle nella regione dell'Hindu Kush Himalaya e in Asia centrale (Hock et al., 2019); in quest'ultima zona, il fenomeno riguarda, ad esempio, la copertura nevosa e i ghiacciai dei monti Tien Shan (Xenarios et al., 2018).

3.2.2 Altri impatti dovuti al clima

L'agricoltura irrigua e quella pluviale risentono della crescente variabilità delle precipitazioni stagionali e annuali, cosa che rende difficile per gli agricoltori definire con precisione i programmi di semina e le strategie di gestione dell'acqua per le colture. L'aumento delle temperature dell'aria porta a una maggiore evapotraspirazione delle colture, che necessitano così di più acqua per mantenere ottimale la loro resa. La variabilità delle precipitazioni e delle nevicate, che in alcuni casi ha portato alla siccità, ha influito sulla crescita della vegetazione dei pascoli e delle praterie, con un impatto negativo sul bestiame e sul sostentamento dei pastori (Hock et al., 2019). Ad esempio, i pastori di Afghanistan, Nepal e Pakistan hanno notato che i modelli imprevedibili delle nevicate e la diminuzione delle precipitazioni hanno determinato un peggioramento della qualità della vegetazione e la sua riduzione (Gentle e Thwaites, 2016).

Riquadro 3.3 La dipendenza del bacino indo-gangetico dall'acqua di fusione della criosfera per l'irrigazione

Nel bacino del fiume Indo, durante la stagione pre-monsonica, fino al 60% dei prelievi totali per l'irrigazione proviene dalla fusione dei ghiacciai e delle nevi di montagna, il che contribuisce ad un incremento dell'11% della produzione totale di colture. In alcune aree irrigate nel bacino a valle dell'Indo, oltre il 50% dei raccolti di riso e cotone può essere attribuito alla fusione dei ghiacciai e delle nevi. Sebbene la dipendenza dall'acqua di fusione nelle pianure alluvionali del Gange sia relativamente più bassa, tale risorsa è essenziale durante la stagione secca, in particolare per colture come il riso e la canna da zucchero. Sulla base dei dati raccolti tra il 1981 e il 2010, è stato stimato che 129 milioni di agricoltori nei bacini dell'Indo e del Gange dipendono in modo sostanziale dalla fusione dei ghiacciai e delle nevi per il loro sostentamento. Tale processo fornisce acqua sufficiente per le colture alimentari e per sostenere la dieta di circa 38 milioni di persone.

Fonte: Biemans et al. (2019).

I disastri naturali legati al clima sono causa di migrazione, con impatti negativi indiretti sulla manodopera a sostegno delle attività agricole

I disastri causati dai rischi naturali, come quelli dovuti a precipitazioni imprevedibili e abbondanti, inondazioni, siccità e frane, hanno influito negativamente sulla stabilità dell'approvvigionamento e del trasporto dei prodotti agricoli nelle aree montane remote, aumentando così l'insicurezza alimentare. I disastri naturali legati al clima sono causa di migrazione, con impatti negativi indiretti sulla manodopera a sostegno delle attività agricole, come testimoniato, ad esempio, da casi in Ghana, Repubblica Unita di Tanzania, Thailandia e nella regione dell'Hindu Kush Himalaya. Dal 2003 al 2013, nei paesi in via di sviluppo il settore agricolo è stato interessato dal 25% dei pericoli legati al clima, che sono stati responsabili dell'80% dei danni e delle perdite del bestiame e del raccolto nelle aree montane (Romeo et al., 2020).

3.2.3 Ulteriori sfide

Accesso ai mercati alimentari

Per i piccoli agricoltori, il raggiungimento e il mantenimento della sicurezza alimentare sono legati alla capacità di vendere i propri prodotti, di accedere alle strutture di mercato e di usufruirne (Romeo et al., 2020). La quantità di tempo impiegata per raggiungere i mercati può aumentare la vulnerabilità delle popolazioni rurali, riducendo il loro accesso a fonti alternative di cibo e la loro capacità di far fronte alle carenze alimentari. Le sfide relative al trasporto verso i mercati alimentari includono le condizioni in cui versano strade, terreni, fiumi navigabili, corsi d'acqua e barriere naturali.

Accesso a infrastrutture e servizi

La sicurezza alimentare è determinata a livello familiare da fattori quali istruzione, salute, genere, patrimonio e spese, e a livello regionale da infrastrutture, mercati e istituzioni abilitanti. Le comunità montane che vivono in aree marginali hanno spesso una capacità limitata di sviluppare misure di adattamento per affrontare crisi ed emergenze, a causa dei livelli di reddito relativamente bassi e dell'accesso ristretto a misure di supporto e risorse esterne (Romeo et al., 2020).

Degrado dei terreni e deforestazione

Il degrado del suolo nelle zone montuose influisce negativamente sulla produttività agricola, mettendo a rischio la sostenibilità della produzione e dell'allevamento e

minacciando la sicurezza idrica (UNCCD, 1994). In molti paesi in via di sviluppo, l'impatto delle pratiche agricole non sostenibili sul degrado del suolo è elevato. Nei contesti interessati da un'attività agricola in espansione, la deforestazione influisce negativamente sulla regolazione dei flussi idrici verso gli acquiferi e i fiumi, aumentando così l'erosione del suolo e contribuendo ad accrescere la probabilità di frane e inondazioni (FAO/UNEP, 2023).

Pericoli

La frequenza e l'entità delle calamità e dei disastri in montagna sono aumentate negli ultimi decenni. Alluvioni, colate detritiche, frane e valanghe sono i pericoli che si verificano più spesso e che colpiscono il maggior numero di persone nelle regioni montane. Tali pericoli hanno un impatto generalmente negativo sulle attività agricole dei piccoli proprietari e sulla sicurezza alimentare (Adler et al., 2022). Anche la migrazione e la disponibilità di manodopera per l'agricoltura sono influenzate dall'incidenza di questi pericoli (Hock et al., 2019).

3.3 Risposte

Le risposte agli impatti del clima sulle zone montuose variano significativamente in termini di obiettivi e priorità, velocità di attuazione, governance e modalità decisionali, nonché entità delle risorse finanziarie e di altro tipo per attuarle (Adler et al., 2022). Le risposte di adattamento includono comunemente la modifica delle pratiche agricole, il potenziamento delle infrastrutture, comprese quelle relative allo stoccaggio dell'acqua, l'impiego delle conoscenze indigene, lo sviluppo di competenze a livello comunitario e l'adattamento basato sugli ecosistemi (McDowell et al., 2021).

Le risposte di adattamento osservate sono in gran parte incrementali e si concentrano principalmente sui sistemi di allerta precoce e sulla diversificazione delle strategie di sussistenza nell'ambito della piccola agricoltura e della pastorizia. Tuttavia, ci sono prove limitate della possibilità di attuazione e dell'efficacia a lungo termine di queste misure per affrontare gli impatti legati al clima e le relative perdite e danni (Hock et al., 2019; Adler et al., 2022).

3.3.1 Tecniche di adattamento al clima in montagna

Agricoltura irrigua

Il potenziamento delle infrastrutture di stoccaggio dell'acqua (allo stato liquido) è una strategia efficace per mitigare la scarsità idrica, soprattutto durante la stagione secca. Il tipo e la scala di stoccaggio variano a seconda delle caratteristiche del sito idrologico e dei materiali disponibili. In montagna, le infrastrutture di stoccaggio dell'acqua più comuni comprendono stagni, cisterne, dighe e serbatoi. Questi sistemi di stoccaggio offrono fonti idriche valide a supporto dei sistemi di irrigazione nelle regioni montane (Viviroli et al., 2011; Hock et al., 2019; Adler et al., 2022).

Gli approcci di adattamento per i sistemi di irrigazione includono: l'adozione di nuove tecnologie e infrastrutture o l'aggiornamento di quelle esistenti; misure di conservazione dell'acqua; razionamento dell'acqua all'interno del sistema; miglioramento dell'efficienza; cambiamento dei modelli di coltivazione, che possono essere promossi attraverso associazioni di utenti dell'acqua dedicate alle zone di montagna (riquadro 3.4; Nüsser et al., 2019; Rasul et al., 2019; Rosa, 2022). Questi approcci rappresentano misure di adattamento efficaci e a basso rischio (McDowell et al., 2019; Adler et al., 2022).

Riquadro 3.4 Una misura di adattamento innovativa allo scioglimento dei ghiacciai che influisce sulla disponibilità di acqua per l'agricoltura irrigua

In Ladakh, nell'India settentrionale, lo stoccaggio del ghiaccio svolge da tempo un ruolo importante nella fornitura di acqua durante la stagione agricola (Hasnain, 2012). Per far fronte alla scarsità d'acqua stagionale nei periodi critici per l'irrigazione, gli abitanti dei villaggi della regione ricorrono a quattro tipi di riserve di ghiaccio: bacini, cascate, deviazioni e una tecnica conosciuta localmente come stupa di ghiaccio. Questi bacini di ghiaccio catturano l'acqua in autunno e in inverno, lasciandola congelare e trattenendola fino alla primavera, quando si scioglie e si espande nei campi (Clouse et al., 2017; Nüsser et al., 2019). Tali bacini trattengono una parte inutilizzata del flusso annuale, che sarà usata per integrare il flusso la primavera successiva.

Tra i benefici osservati, si possono annoverare l'aumento della frequenza dell'irrigazione, della resa, dell'umidità del suolo e della ricarica degli acquiferi. Tuttavia, rimangono dubbi sull'efficacia di tale strategia di adattamento a lungo termine, poiché il suo funzionamento dipende dal deflusso invernale e dai cicli di gelo e disgelo, entrambi sensibili alla variabilità interannuale. Inoltre, restano degli interrogativi sui costi finanziari e sui requisiti di manodopera necessari, che variano a seconda del tipo di riserva per la quale si opta tra le quattro menzionate sopra.

Stupa di ghiaccio in Ladakh, India

Foto: © Naveen Macro/Shutterstock.*

Fonte: adattato da Hock et al. (2019, riquadro 2.3, pag. 156).

Agricoltura pluviale

Gli agricoltori di montagna che praticano l'agricoltura pluviale hanno imparato ad adattarsi, in vario modo, alla variabilità delle precipitazioni e della disponibilità idrica. Tra queste misure di adattamento, ci sono l'adozione di pratiche agricole intelligenti dal punto di vista climatico, la diversificazione delle colture, il ricorso a colture resistenti alla siccità, la conservazione del suolo, la raccolta dell'acqua, la costruzione di stagni di conservazione, lo sviluppo di sistemi di allerta per la siccità e l'impiego delle conoscenze indigene (Adhikari, 2018; Adler et al., 2022).

Le popolazioni indigene di montagna possiedono conoscenze preziose che contribuiscono alla sostenibilità dei sistemi alimentari, alla gestione del territorio e alla conservazione della biodiversità

Pastorizia

A proposito della pastorizia, le opzioni di adattamento includono la migrazione stagionale delle mandrie verso pascoli più fertili e l'utilizzo di programmi di assicurazione del bestiame, se esistenti (Fassio et al., 2014; Gentle e Thwaites, 2016; Tiwari et al., 2020).

Pesca d'acqua dolce

I gestori possono basarsi sui livelli di priorità dei laghi e sulle misure specifiche per gli ecosistemi per decidere dove e quando mettere in atto le strategie di gestione delle attività di pesca. Queste includono il ricorso a metodi tradizionali di ripopolamento, la prevenzione della perdita di habitat acquatici, il controllo delle specie invasive e la modifica delle pratiche di raccolta (FAO, 2003; Tingley III et al., 2019).

Gestione dei bacini idrografici

Gli approcci di gestione dei bacini idrografici che tengono conto del fabbisogno idrico per l'agricoltura, considerando aspetti del suolo, della biodiversità, della silvicoltura e degli ecosistemi, rafforzeranno la resilienza complessiva agli impatti dei cambiamenti climatici, fra cui lo scioglimento della criosfera (Adler et al., 2022; FAO, 2023). La riforestazione è una pratica di uso sostenibile del suolo che favorisce la ritenzione idrica dello stesso e dei bacini idrografici, aumentando così la disponibilità di acqua per l'agricoltura. I suoli di montagna sono particolarmente vulnerabili e sensibili ai processi di degrado, come l'erosione idrica e la perdita di qualità chimica e fisica (FAO, 2015b).

Pericoli

La maggior parte delle misure di adattamento ai pericoli naturali nelle regioni montane è pensata per rispondere a specifici stimoli climatici o riguarda il recupero post-catastrofe (McDowell et al., 2019). Le misure strutturali rigide, come la costruzione di dighe, bacini e argini, sono state ampiamente utilizzate per contenere i pericoli, insieme ai sistemi di allerta precoce, alla zonazione e alla gestione del territorio (Adler et al., 2022). L'adattamento basato sugli ecosistemi è ampiamente raccomandato per mitigare i rischi di frane (ad esempio, imboschimento, riforestazione e miglioramento della gestione forestale), inondazioni (come il ripristino e la rinaturalizzazione dei fiumi) e siccità (tra cui l'adattamento dei bacini idrografici; FAO, 2023). L'esperienza del Nepal evidenzia che l'introduzione dell'agroforestazione nell'agricoltura di montagna promuove un'efficace riduzione del rischio di disastri (Schick et al., 2018).

3.3.2 Conoscenze e competenze

Le reti di monitoraggio idrologico sono estremamente scarse nelle regioni montane, soprattutto nei paesi in via di sviluppo. La raccolta e il monitoraggio dei dati idrologici, spesso inesistenti o limitati, condizionano fortemente la possibilità di prevedere in anticipo i rischi e di condurre valutazioni idrologiche accurate per la gestione delle acque e della produzione agricola (Wilby, 2019; GEO Mountains, 2022). C'è urgente bisogno di tali valutazioni nel contesto di molte catene montuose a livello globale, come la regione dell'Hindu Kush Himalaya, dove le acque montane sostengono i mezzi di sussistenza agricoli oltre al fabbisogno idrico ed energetico di oltre 2 miliardi di persone (Immerzeel et al., 2010; Wester et al., 2019). È da tener presente anche il potenziale della scienza partecipata per aumentare il monitoraggio idrologico in montagna, ad esempio coinvolgendo le popolazioni locali nella ricerca e nella raccolta di dati (Njue et al., 2019). Questa attività rappresenta un'opportunità per la raccolta di dati e la partecipazione pubblica a progetti legati all'acqua (Hegarty et al., 2021).

Le popolazioni indigene di montagna possiedono conoscenze locali, tradizioni e pratiche culturali uniche e preziose che contribuiscono alla sostenibilità dei sistemi alimentari, alla gestione del territorio e alla conservazione della biodiversità (FAO, 2021). Ad esempio, nelle Ande le conoscenze indigene hanno favorito l'accesso alle reti di approvvigionamento di sementi locali e regionali e l'adozione di nuove varietà di colture (Skarbø e Van der Molen, 2014; riquadro 3.5).

3.3.3 La governance

La Mountain Partnership è l'unica struttura di governance globale per le regioni montane. Questa alleanza volontaria, istituita dalle Nazioni Unite nel 2002, riunisce governi, organizzazioni intergovernative e non governative e comunità locali. Attraverso la collaborazione, la condivisione delle conoscenze e l'attività di promozione, la Mountain Partnership affronta le sfide relative all'ambiente e alle comunità montane, tra cui sicurezza alimentare e nutrizione.

Riquadro 3.5 Il Global Mountain Participatory Guarantee System Network (PGS)

Il Global Mountain Participatory Guarantee System Network (PGS) costituisce un valido esempio di processo di condivisione delle conoscenze tra i popoli di montagna, comprese le comunità indigene. Creato nel 2019 da 13 organizzazioni di piccoli produttori di montagna dello Stato Plurinazionale della Bolivia, Filippine, India, Kirghizistan, Mongolia, Nepal, Panama e Perù, il Global Mountain Participatory Guarantee System Network è la prima rete internazionale di sistemi di garanzia partecipata. La rete mette in contatto piccoli agricoltori di montagna di tutto il mondo, promuove la condivisione orizzontale delle conoscenze tra i partner e la cooperazione innovativa sud-sud. Grazie a questa rete, il bagaglio di esperienze dei contadini di montagna può essere condiviso e ampliato, mantenendo quell'approccio basato sul contesto specifico che accomuna le iniziative PGS.

Fonte: estratto della FAO (2021, pag. 90).

Bisogna assicurarsi che le montagne possano offrire un flusso d'acqua sufficiente per l'irrigazione delle pianure

Questo approccio collaborativo alla governance delle montagne consente ai vari *stakeholder* di lavorare insieme per un obiettivo comune: un futuro prospero per i luoghi montani e le persone che ci vivono. L'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura ospita il Segretariato della Mountain Partnership ed è l'agenzia di riferimento per le questioni legate alle montagne all'interno del sistema delle Nazioni Unite, poiché l'agricoltura e la produzione alimentare sono fattori importanti nelle aree montane. Il *Global Framework for the Five Years of Action for the Development of Mountain Regions 2023-2027* raggruppa e orienta le attività per lo sviluppo sostenibile delle montagne. La Mountain Partnership è a capo di un impegno all'azione presentato alla Conferenza delle Nazioni Unite del 2023 sulla revisione globale intermedia per l'attuazione degli obiettivi del Decennio internazionale d'azione "Acqua per lo sviluppo sostenibile, 2018-2028", intitolato "Advancing sustainable mountain development and protecting the 'water towers' of the world".

A livello regionale, diverse organizzazioni che si occupano delle montagne affrontano sfide e opportunità specifiche nelle proprie aree (vedere capitolo 9). La Convenzione delle Alpi e la Convenzione dei Carpazi, a titolo di esempio, si concentrano sullo sviluppo sostenibile e sulla conservazione delle rispettive catene montuose europee (Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi, 2017). Nel frattempo, il Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna, nella regione dell'Hindu Kush Himalaya, promuove la cooperazione e la condivisione delle conoscenze a livello transfrontaliero. Il

Consorzio per lo sviluppo sostenibile della rete dell'ecoregione andina lavora sullo sviluppo sostenibile della Cordigliera delle Ande, promuovendo iniziative guidate dalle comunità e la condivisione delle conoscenze tra le nazioni andine.

3.4 Conclusioni

L'agricoltura di montagna deve affrontare numerosi ostacoli per poter garantire la sicurezza alimentare attraverso una produzione sostenibile e su più ampia scala. I cambiamenti climatici che influenzano la variabilità delle precipitazioni, insieme al riscaldamento globale che determina lo scioglimento dei ghiacciai e delle nevi, incideranno sempre di più sulla disponibilità di acqua in montagna su diverse scale temporali, ponendo così delle sfide agli agricoltori delle zone montane e all'agricoltura irrigua a valle. Oltre alla lontananza e all'inaccessibilità delle montagne, gli impatti dei cambiamenti climatici stanno facendo pressione sulle varie dimensioni della sicurezza alimentare: disponibilità, accessibilità, utilizzo e stabilità.

Per creare un ambiente favorevole all'attuazione di strategie di adattamento, bisogna considerare importanti fattori, fra cui i seguenti: lo sviluppo di competenze e il rafforzamento della gestione delle conoscenze, compreso un aumento del monitoraggio idrologico e della generazione di dati; il potenziamento di piani e politiche agricole che tengano pienamente conto delle esigenze specifiche delle comunità montane; il rafforzamento delle istituzioni di governance locale, comprese le organizzazioni degli agricoltori; il sostegno ai sistemi agricoli di montagna che preservano la diversità agricola; la fornitura di fondi sufficienti per attuare le misure di adattamento.

Una governance efficace che garantisca la sicurezza alimentare in alta e bassa montagna è più necessaria che mai. Bisogna assicurarsi che le montagne possano offrire un flusso d'acqua sufficiente per l'irrigazione delle pianure, ma anche preservare e valorizzare paesaggi agricoli montani unici e diversificati.

Riferimenti bibliografici

Adhikari, S. 2018. Drought impact and adaptation strategies in the mid-hill farming system of western Nepal. *Environments*, vol. 5, N. 9, articolo 101. doi.org/10.3390/environments5090101.

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. e Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Alpiev, M., Sarieva, M., Siriwardena, S. N., Valbo-Jørgensen, J. e Woynárovich, A. 2013. *Fish Species Introductions in the Kyrgyz Republic*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 584. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO). www.fao.org/4/i3268e/i3268e.pdf.

Banca mondiale. s.d. What is Food Security? Sito web della Banca mondiale. www.worldbank.org/en/topic/agriculture/brief/food-security-update/what-is-food-security. (Consultato il 2 ottobre 2024.)

Biemans, H., Siderius, C., Lutz, A. F., Nepal, S., Ahmad, B., Hassan, T., Von Bloh, W., Wijngaard, R. R., Wester, P., Shrestha, A. B. e Immerzeel, W. W. 2019. Importance of snow and glacier meltwater for agriculture on the Indo-Gangetic Plain. *Nature Sustainability*, vol. 2, pagg. 594-601. doi.org/10.1038/s41893-019-0305-3.

Bury, J. T., Mark, B. G., McKenzie, J. M., French, A., Baraer, M., Huh, K. I., Zapata Luyo, M. A. e Gómez López, R. J. 2011. Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, vol. 105, pagg. 179-206. doi.org/10.1007/s10584-010-9870-1.

Chapagain, T. e Raizada, M. N. 2017. Agronomic challenges and opportunities for smallholder terrace agriculture in developing countries. *Frontiers in Plant Science*, vol. 8, articolo 331. doi.org/10.3389/fpls.2017.00331.

Clouse, C., Anderson, N. e Shippling, T. 2017. Ladakh's artificial glaciers: Climate-adaptive design for water scarcity. *Climate and Development*, vol. 9, N. 5, pagg. 428-438. doi.org/10.1080/17565529.2016.1167664.

Deng, C., Zhang, G., Liu, Y., Nie, X., Li, Z., Liu, J. e Zhu, D. 2021. Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review. *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 9, N. 3, pagg. 344-359. doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.002.

FAO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura). 1996. *Rome Declaration on World Food Security*. World Food Summit, Roma, 13–17 novembre 1996. Roma, FAO. www.fao.org/4/w3613e/w3613e00.htm.

——. 2003. *Mountain Fisheries in Developing Countries*. Roma, FAO. www.fao.org/3/y4633e/y4633e.pdf.

——. 2014. *Developing Sustainable Food Value Chains: Guiding Principles*. Roma, FAO. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e47d2ad8-5910-435e-a6b4-92dda2367dc7/content.

——. 2015a. *Understanding Mountain Soils: A Contribution from Mountain Areas to the International Year of Soils 2015*. Roma, FAO. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8d557f4f-9458-4140-8f6b-42c9309ed060/content.

——. 2015b. *Mapping the Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity*. Roma, FAO. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fc51a31f-4d11-45da-a9f3-5d44277ab231/content.

——. 2019. *Mountain Agriculture: Opportunities for Harnessing Zero Hunger in Asia*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/ca5561en/ca5561en.pdf.

——. 2021. *The White/Wiphala Paper on Indigenous Peoples' Food Systems*. Roma, FAO. doi.org/10.4060/cb4932en.

——. 2022. *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021: Systems at Breaking Point*. Rapporto principale. Roma, FAO. doi.org/10.4060/cb9910en.

——. 2023. *Building Resilience into Watersheds: A Sourcebook*. Roma, FAO. doi.org/10.4060/cc3258en.

——. 2024. Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS). Agricultural Heritage Around the World. Sito web della FAO. www.fao.org/giahs/around-the-world/en. (Consultato il 6 novembre 2024.)

FAO/UNEP (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura/Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente). 2023. *Restoring Mountain Ecosystems: Challenges, Case Studies and Recommendations for Implementing the UN Decade Principles for Mountain Ecosystem Restoration*. Roma/Nairobi, FAO/UNEP. doi.org/10.4060/cc9044en.

Fassio, G., Battaglini, L. M., Porcellana, V. e Viazzo, P. P. 2014. The role of the family in mountain pastoralism: Change and continuity. *Mountain Research and Development*, vol. 34, N. 4, pagg. 336-343. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00019.1.

Gentle, P. e Maraseni, T. N. 2012. Climate change, poverty and livelihoods: Adaptation practices by rural mountain communities in Nepal. *Environmental Science and Policy*, vol. 21, pagg. 24-34. doi.org/10.1016/j.envsci.2012.03.007.

Gentle, P. e Thwaites, R. 2016. Transhumant pastoralism in the context of socioeconomic and climate change in the mountains of Nepal. *Mountain Research Development*, vol. 36, N. 2, 173-182. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-15-00011.1.

GEO Mountains. 2022. *Mountain Observations: Monitoring, Data, and Information for Science, Policy, and Society*. Policy Brief. GEO Mountains. https://geomountains.org/images/GEO_Mountains_Policy_Brief_IYSMD_2022.pdf.

Hasnain, M. 2012. *Artificial Glaciers in Ladakh: A Socio-Economic Analysis*. GERES India. www.geres.eu/wp-content/uploads/2019/10/Artifial-glaciers-Socio-economic-analysis.pdf.

Hegarty, S., Hayes, A., Regan, F., Bishop, I. e Clinton, R. 2021. Using citizen science to understand river water quality while filling data gaps to meet United Nations Sustainable Development Goal 6 objectives. *Science of the Total Environment*, vol. 783, articolo 146953. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146953.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. e Steltzer, H. 2019. High mountain areas. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama e N. M. Weyer (a cura di), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 131-202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.

Immerzeel, W. W., Van Beek, L. P. H. e Bierkens, M. F. P. 2010. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, vol. 328, N. 5984, pagg. 1382-1385. doi.org/10.1126/science.1183188.

Ingty, T. 2017. High mountain communities and climate change: Adaptation, traditional ecological knowledge, and institutions. *Climatic Change*, vol. 145, N. 1–2, pagg. 41-55. doi.org/10.1007/s10584-017-2080-3.

Joshi, S., Jasra, W. A., Ismail, M., Shrestha, R. M., Yi, S. L. e Wu, N. 2013. Herders' perceptions of and responses to climate change in northern Pakistan. *Environmental Management*, vol. 52, N. 3, pagg. 639-648. doi.org/10.1007/s00267-013-0062-4.

Lutz, A. F., Immerzeel, W. W., Siderius, C., Wijngaard, R. R., Nepal, S., Shrestha, A. B., Wester, P. e Biemans, H. 2022. South Asian agriculture increasingly dependent on meltwater and groundwater. *Nature Climate Change,* vol. 12, pagg. 566-573. doi.org/10.1038/s41558-022-01355-z.

Mallory, C. D. e Boyce, M. S. 2018. Observed and predicted effects of climate change on Arctic caribou and reindeer. *Environmental Reviews*, vol. 26, N. 1, pagg. 13-25.doi.org/10.1139/er-2017-0032.

McDowell, G., Huggel, C., Frey, H., Wang, F. M., Cramer, K. e Ricciardi, V. 2019. Adaptation action and research in glaciated mountain systems: Are they enough to meet the challenge of climate change? *Global Environmental Change*, vol. 54, pagg. 19-30. doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.10.012.

McDowell, G., Stevens, M., Lesnikowski, A., Huggel, C., Harden, A., Di Bella, J., Morecroft, M., Kumar, P., Joe, E. T., Bhatt, I. D. e the Global Adaptation Mapping Initiative. 2021. Closing the adaptation gap in mountains. *Mountain Research and Development*, vol. 41, N. 3, pagg. A1-A10. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-21-00033.1.

Milner, A. M., Khamis, K., Battin, T. J., Brittain, J. E., Barrand, N. E., Füreder, L., Cauvy-Fraunié, S., Gíslason, G. M., Jacobsen, D., Hannah, D. M., Hodson, A. J., Hood, E., Lencioni, V., Ólafsson, J. S., Robinson, C. T., Tranter, M. e Brown, L. E. 2017. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 114, N. 37, pagg. 9770-9778. doi.org/10.1073/pnas.1619807114.

Molden, D. J., Shrestha, A. B., Immerzeel, W. W., Maharjan, A., Rasul, G., Wester, P., Wagle, N., Pradhananga, S. e Nepal, S. 2022. The great glacier and snow-dependent rivers of Asia and climate change: Heading for troubled waters. A. K. Biswas e C. Tortajada (a cura di), *Water Security Under Climate Change*. Water Resources Development and Management. Singapore, Springer, pagg. 223-250. doi.org/10.1007/978-981-16-5493-0_12.

Namgay, K., Millar, J. E., Black, R. S. e Samdup, T. 2014. Changes in transhumant agro-pastoralism in Bhutan: A disappearing livelihood? *Human Ecology*, vol. 42, pagg. 779-792. doi.org/10.1007/s10745-014-9684-2.

Nie, Y., Pritchard, H. D., Liu, Q., Hennig, T., Wang, W., Wang, X., Liu, S., Nepal, S., Samyn, D., Hewitt, K. e Chen, X. 2021. Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram. *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. *2*, pagg. 91-106. doi.org/10.1038/s43017-020-00124-w.

Njue, N., Stenfert Kroese, J., Gräf, J., Jacobs, S. R., Weeser, B., Breuer, L. e Rufino, M. C. 2019. Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management: State of the art and future prospects. *Science of the Total Environment*, vol. 693, articolo 133531. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.337.

Nüsser, M. e Schmidt, S. 2017. Nanga Parbat revisited: Evolution and dynamics of sociohydrological interactions in the Northwestern Himalaya. *Annals of the American Association of Geographers*, vol. 107, N. 2, pagg. 403-415. doi.org/10.1080/24694452.2016.1235495.

Nüsser, M., Dame, J., Kraus, B., Baghel, R. e Schmidt, S. 2019. Socio-hydrology of "artificial glaciers" in Ladakh, India: Assessing adaptive strategies in a changing cryosphere. *Regional Environmental Changes*, vol. 19, pagg. 1327-1337. doi.org/10.1007/s10113-018-1372-0.

Nyima, Y. e Hopping, K. A. 2019. Tibetan lake expansion from a pastoral perspective: Local observations and coping strategies for a changing environment. *Society and Natural Resources*, vol. 32, N. 9, pagg. 965-982. doi.org/10.1080/08941920.2019.1590667.

Petr, T. e Swar, S. B. (a cura di). 2002. *Cold Water Fisheries in the Trans-Himalayan Countries.* FAO Fisheries Technical Paper No. 431. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO). https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b5590775-bdc9-4b9c-bfb1-1fb0c755afc7/content.

Rasul, G. e Molden, D. 2019. The global social and economic consequences of mountain cryospheric change. *Frontiers in Environmental Science*, vol. 7, articolo 91. doi.org/10.3389/fenvs.2019.00091.

Rasul, G., Pasakhala, B., Mishra, A. e Pant, S. 2019. Adaptation to mountain cryosphere change: Issues and challenges. *Climate and Development*, vol. 12, N. 4, pagg. 297-309. doi.org/10.1080/17565529.2019.1617099.

Romeo, R., Grita, F., Parisi, F. e Russo, L. 2020. *Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity: Updated Data and Analysis of Drivers*. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO)/Convenzione delle Nazioni Unite per la lotta alla desertificazione (UNCCD). doi.org/10.4060/cb2409en.

Romeo, R., Manuelli, S. R., Geringer, M. e Barchiesi, V. (a cura di). 2021. *Mountain Farming Systems – Seeds for the Future: Sustainable Agricultural Practices for Resilient Mountain Livelihoods*. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO). doi.org/10.4060/cb5349en.

Rosa, L. 2022. Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: Biophysical potentials and feedbacks. *Environmental Research Letters*, vol. 17, N. 6, articolo 063008. doi.org/10.1088/1748-9326/ac7408.

Schick, A., Wieners, E., Schwab, N. e Schickhoff, U. 2018. Sustainable disaster risk reduction in mountain agriculture: Agroforestry experiences in Kaule, mid-hills of Nepal. S. Mal, R. Singh e C. Huggel (a cura di), *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction: Towards Sustainable Development Goals*. Cham, Svizzera, Springer, pagg. 249-264. doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_17.

Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. 2017. *Alpine Convention Mountain Agriculture Platform: Mountain Agriculture.* Alpine Signals No. 8. Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/downloads/downloads_en/2_organisation_en/organisation_presidency_en/mountain_agriculture_A4_EN.pdf.

Shaoliang, Y., Ismail, M. e Zhaoli, Y. 2012. Pastoral communities' perspectives on climate change and their adaptation strategies in the Hindukush-Karakoram-Himalaya. H. Kreutzmann (a cura di), *Pastoral Practices in High Asia: Agency of 'Development' Effected by Modernisation, Resettlement and Transformation.* Advances in Asian Human-Environmental Research. Dordrecht, Paesi Bassi, Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-3846-1_17.

Sheehy, D. P., Miller, D. e Johnson, D. A. 2006. Transformation of traditional pastoral livestock systems on the Tibetan steppe. *Sécheresse*, vol. 17, N. 1–2, pagg. 142-151.

Skarbø, K. e Van der Molen, K. 2014. Irrigation access and vulnerability to climate induced hydrological change in the Ecuadorian Andes. *Culture, Agriculture, Food and Environment*, vol. 36, N. 1, pagg. 28-44. doi.org/10.1111/cuag.12027.

Smadja, J., Aubriot, O., Puschiasis, O., Duplan, T., Grimaldi, G., Hugonnet, M. e Buchheit, P. 2015. Climate change and water resources in the Himalayas: Field study in four geographic units of the Koshi basin, Nepal. *Journal of Alpine Research*, vol. 103, N. 2. doi.org/10.4000/rga.2910.

Tingley III, R. W., Paukert, C., Sass, G. G., Jacobson, P. C., Hansen, G. J. A., Lynch, A. J. e Shannon, P. D. 2019. Adapting to climate change: Guidance for the management of inland glacial lake fisheries. *Lake and Reservoir Management*, vol. 35, N. 4, pagg. 435-452. doi.org/10.1080/10402381.2019.1678535.

Tiwari, K. R., Sitaula, B. K., Bajracharya, R. M., Raut, N., Bhusal, P. e Sengel, M. 2020. Vulnerability of pastoralism: A case study from the high mountains of Nepal. *Sustainability*, vol. 12, N. 7, articolo 2737. doi.org/10.3390/su12072737.

UNCCD (Convenzione delle Nazioni Unite per la lotta alla desertificazione). 1994. *United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa*. Parigi, UNCCD. https://catalogue.unccd.int/936_UNCCD_Convention_ENG.pdf.

Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., Fowler, H. J., Greenwood, G. B., Hamlet, A. F., Huang, Y., Koboltschnig, G., Litaor, M. I., López-Moreno, J. I., Lorentz, S., Schädler, B., Schreier, H., Schwaiger, K., Vuille, M. e Woods, R. 2011. Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, N. 2, pagg. 471-504. doi.org/10.5194/hess-15-471-2011.

Viviroli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M. e Wada, Y. 2020. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability*, vol. 3, pagg. 917-928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.

Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. e Shrestha, A. B. (a cura di). 2019. *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Svizzera, Springer. lib.icimod.org/record/34383.

Wilby, R. L. 2019. A global hydrology research agenda fit for the 2030s. *Hydrology Research*, vol. 50, N. 6, pagg. 1464-1480. doi.org/10.2166/nh.2019.100.

Xenarios, S., Shenhav, R., Abdullaev, I. e Mastellari, A. 2018. Current and future challenges of water security in Central Asia. *Global Water Security: Lessons Learnt and Long-Term Implications*. Water Resources Development and Management. Singapore, Springer, pagg. 117-142. doi.org/10.1007/978-981-10-7913-9_5.

Yang, L., Liu, M., Lun, F., Yuan, Z., Zhang, Y. e Min, Q. 2017. An analysis on crops choice and its driving factors in agricultural heritage systems: A case of Honghe Hani rice terraces system. *Sustainability*, vol. 9, N. 7, articolo 1162. doi.org/10.3390/su9071162.

Young, G., Zavala, H., Wandel, J., Smit, B., Salas, S., Jiménez, E., Fiebig, M., Espinoza, R., Díaz, H. e Cepeda, J. 2010. Vulnerability and adaptation in a dryland community of the Elqui Valley, Chile. *Climatic Change*, vol. 98, pagg. 245-276. doi.org/10.1007/s10584-009-9665-4.

Capitolo 4

Insediamenti umani e riduzione del rischio di disastri

UN-Habitat
Hezekiah Pireh, Avi Sarkar, Sudha Shrestha e Shobana Srinivasan

Con il contributo di Nidhi Nagabhatla (UNU-CRIS), Sanae Okamoto e Serdar Turkeli (UNU-MERIT), Dipesh Chapagain e Navneet Kumar (UNU-EHS), Narayan Singh Khawas, Chicgoua Noubactep, Darren Saywell e Sean Furey (RWSN)

Le regioni montane sono importanti torri d'acqua e sostengono insediamenti umani che ospitano il 14% della popolazione mondiale (Ehrlich et al., 2021). Queste regioni devono affrontare una serie di sfide uniche che influiscono sulla fornitura di servizi idrici e igienico-sanitari (WASH nell'acronimo inglese; De Jong, 2015; Clerici et al., 2019; Zogaris et al., 2021). Sono spesso esposti a rischi naturali come inondazioni, frane causate da precipitazioni estreme, colate detritiche, valanghe di ghiaccio e neve, terremoti e siccità.

Questo capitolo si concentra sulle sfide e sulle risposte relative alla fornitura di servizi WASH e alla riduzione del rischio di disastri (DRR nell'acronimo inglese) nelle regioni montane: evidenzia l'impatto di un'urbanizzazione rapida e non pianificata, nonché dei pericoli naturali e dei cambiamenti climatici, sulla disponibilità, la qualità e la sicurezza dell'acqua in tali aree.

4.1 Sfide

4.1.1 Urbanizzazione

L'urbanizzazione rapida e non pianificata delle regioni di montagna sta esercitando una certa pressione sui fragili ecosistemi montani, incidendo sulla disponibilità, la qualità e la sicurezza dell'acqua. Nonostante le sfide associate alla complessità dei terreni e alla fragilità degli ecosistemi, la popolazione delle regioni montane è in costante crescita. Tra il 1975 e il 2015, circa il 35% delle regioni montane ha visto quantomeno raddoppiare la propria popolazione (Thornton et al., 2022). Nel medesimo periodo, la percentuale di residenti in zone urbane nelle stesse aree montane variava dal 6% al 39% (Ehrlich et al., 2021; Thornton et al., 2022).

Comprendere le modalità di espansione specifiche delle città di montagna è quindi essenziale per garantire una pianificazione sostenibile anche in materia di risorse idriche (Jia et al., 2020). Circa 1,1 miliardi di persone vivono in regioni montane. Sebbene il tasso di urbanizzazione vari notevolmente a seconda delle zone, circa il 34% della popolazione delle montagne vive in grandi città, il 31% in città meno popolose e aree a media densità abitativa e il 35% in aree rurali. Nonostante il tasso di urbanizzazione delle montagne (66%) sia inferiore a quello delle zone di pianura (78%), le catene montuose più popolate e urbanizzate, come l'Himalaya, le Ande, le Montagne Rocciose e le Alpi, sono anche quelle in cui il tasso di urbanizzazione è più alto (Ehrlich et al., 2021).

L'urbanizzazione rapida e non pianificata delle regioni di montagna sta esercitando una certa pressione sui fragili ecosistemi montani

L'urbanizzazione nelle regioni montane ha un forte impatto sul flusso delle acque superficiali e sotterranee (Somers e McKenzie, 2020) e sulla qualità dell'acqua (De Jong, 2015): altera significativamente il ciclo idrologico, influenzando il volume e la qualità delle acque di superficie. Le forti pendenze, l'alterazione dei modelli naturali di drenaggio delle acque e le superfici pavimentate riducono la ricarica degli acquiferi e aumentano il deflusso, con conseguenti inondazioni improvvise ed erosione del suolo. La qualità dell'acqua può diminuire a causa degli inquinanti prodotti dall'aumento del turismo, dalle acque reflue non trattate e dalle industrie. Sostanze contaminanti che permangono nell'ambiente, come gli inquinanti organici persistenti, in particolare i policlorobifenili e il diclorodifeniltricloroetano, gli idrocarburi policiclici aromatici e i metalli pesanti, possono essere rilasciati nelle sorgenti d'acqua a causa della fusione dei ghiacci e delle nevi associata ai cambiamenti climatici (Hodson, 2014).

Ad esempio, la regione himalayana dell'Asia meridionale è densamente popolata e ha conosciuto una rapida crescita urbana negli ultimi decenni. Senza dubbio, l'urbanizzazione della regione ha creato posti di lavoro e migliorato le infrastrutture, ma ha anche causato notevoli complicazioni ambientali e socioeconomiche. Tra gli impatti dei cambiamenti climatici, l'interruzione dei regimi idrologici ha ridotto la ricarica degli acquiferi e la disponibilità di acqua, aggravando l'insicurezza idrica. La deforestazione, la perdita di biodiversità e la probabilità che si verifichino disastri naturali come

Riquadro 4.1 Impatti del disastro alluvionale in Nepal del 2021

Il 15 giugno 2021, Melamchi Bazar in Nepal è stato colpito da una devastante alluvione improvvisa causata dai fiumi Melamchi e Indrawati, le cui conseguenze sono state 5 morti, 20 dispersi e ingenti danni. Anche il Melamchi Drinking Water Project è stato colpito. Questo evento fa parte di una serie di inondazioni che, nell'arco di 3-4 giorni, hanno danneggiato 337 case e sfollato 525 famiglie. Infrastrutture essenziali come 13 ponti sospesi, 7 ponti motorizzati e numerose strade sono state distrutte, con gravi ripercussioni sugli insediamenti umani, sull'agricoltura e sui mezzi di sussistenza basati sul fiume in un'ampia area.

Le inondazioni hanno anche trasportato detriti di enormi dimensioni, depositandoli fino a 54 chilometri di distanza a Dolalghat. Inoltre, il 18 giugno 2021 una frana ha bloccato il fiume Tama Koshi, formando un lago che ha minacciato le aree a valle. L'Autorità nazionale per la riduzione e la gestione del rischio di disastri ha fatto un resoconto delle prime vittime e dei primi danni, sottolineando l'urgente necessità di una gestione efficace del suddetto rischio.

Fonte: Maharjan et al. (2021).

inondazioni e frane sono aumentate (Tiwari et al., 2018). L'espansione urbana ha degradato ecosistemi fragili, tra cui foreste, habitat della fauna selvatica e fonti d'acqua. Affrontare queste sfide richiede soluzioni basate sulla natura e una pianificazione urbana specifica per la montagna, al fine di garantire uno sviluppo sostenibile e resilienza.

4.1.2 Pericoli naturali

Le regioni montane sono spesso interessate da pericoli naturali come frane, terremoti, inondazioni, inondazioni da collasso di laghi glaciali (GLOF nell'acronimo inglese) e valanghe (vedere sezione 2.2.3). Questi eventi possono danneggiare le infrastrutture di approvvigionamento idrico e igienico-sanitarie e interrompere l'accesso ai servizi WASH. Ad esempio, dall'850 al 2022 sono stati registrati 3.151 eventi GLOF nelle principali regioni glaciali del mondo (Lützow et al., 2023). I danni alle infrastrutture essenziali, come strade, ponti, dighe, strutture per la raccolta dell'acqua e la protezione dalle inondazioni, centrali idroelettriche, linee elettriche e reti di comunicazione, sono stati significativi. Tali minacce aumentano la vulnerabilità delle comunità montane, già di per sé esposte a fenomeni critici e spesso marginalizzate; inoltre, questo fatto destabilizza alcuni settori che generano ricchezza, tra cui agricoltura, turismo e biodiversità (Alfthan et al., 2018; Hock et al., 2019).

Ad esempio, il terremoto dell'aprile 2015 in Nepal ha danneggiato le strutture idriche e igienico-sanitarie nelle aree circostanti: «Su un totale di 11.288 sistemi di approvvigionamento idrico nei 14 distretti più colpiti, 1.570 hanno subito danni gravi, 3.663 sono stati parzialmente danneggiati e circa 220.000 servizi igienico-sanitari sono stati parzialmente o totalmente distrutti» (UN-Habitat, 2016, pag. 4). Come ulteriore esempio, il riquadro 4.1 evidenzia gli impatti del disastro alluvionale che ha colpito il Nepal nel 2021.

4.1.3 Cambiamenti climatici

Gli habitat montani sono molto sensibili ai cambiamenti climatici. L'aumento della frequenza, della gravità e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi può determinare condizioni di vita precarie e compromettere l'accesso a servizi idrici e igienico-sanitari spesso fragili. L'aumento delle temperature e il cambiamento dei modelli di precipitazione dovuti ai cambiamenti climatici possono influire sulla disponibilità di acqua nelle regioni montane, aumentando l'esposizione a rischi come siccità e inondazioni (Adler et al., 2022).

La crescente intensità, frequenza e durata delle precipitazioni estreme può portare a un improvviso aumento del picco di portata dei fiumi, innescando alluvioni improvvise nelle valli fluviali. In Nepal, l'incremento di un'unità delle precipitazioni massime in un giorno ha determinato un aumento del 33% dei decessi legati alle alluvioni; allo stesso modo, l'incremento di un'unità del numero di giorni di pioggia intensa e di giorni di pioggia consecutivi ha causato un aumento dei decessi legati alle frane rispettivamente del 45% e del 34% (Chapagain et al., 2024). Al contrario, un deficit di precipitazioni, soprattutto a causa della diminuzione dei giorni di pioggia sparsi e consecutivi di bassa intensità, riduce la percolazione dell'acqua nel sottosuolo nelle aree scoscese. Ciò influisce negativamente sulla ricarica delle acque sotterranee e, di conseguenza, diminuisce il contributo del flusso di base ai corsi d'acqua, alle sorgenti naturali e allo stoccaggio negli acquiferi (Chapagain et al., 2021; Seneviratne et al., 2021).

L'intensificarsi dello stress idrico ha determinato migrazioni e spostamenti nelle aree montuose (Joshi e Dongol, 2018; Almulhim et al., 2024). Durante le stagioni secche e calde, la scarsità d'acqua induce a mantenere pratiche igieniche scadenti e aumenta il rischio di diffusione delle malattie (Dhimal et al., 2015; Bhandari et al., 2020). Altre minacce di origine antropica, come l'inquinamento dovuto a servizi igienico-sanitari inadeguati, l'esaurimento delle fonti d'acqua, gli incendi boschivi, l'estrazione mineraria e l'agricoltura non sostenibile, possono influire sulla disponibilità e sulla qualità dell'acqua.

Le regioni che dipendono dal manto nevoso delle montagne come riserva idrica temporanea possono anche essere interessate da episodi di grave siccità idrologica con l'aumento delle temperature (Seneviratne et al., 2021).

4.1.4 Terreni di montagna

I terreni montuosi pongono sfide significative per la costruzione e la manutenzione delle infrastrutture idrauliche e igienico-sanitarie

I terreni montuosi, caratterizzati da pendii ripidi, condizioni meteorologiche spesso difficili, luoghi remoti e reti stradali carenti, pongono sfide significative per la costruzione e la manutenzione delle infrastrutture idrauliche e igienico-sanitarie. La topografia delle regioni montane favorisce la presenza naturale o la costruzione di serbatoi d'acqua ad altezze elevate e di sistemi idrici a flusso gravitazionale, che possono funzionare senza bisogno di costose risorse energetiche. Tuttavia, la costruzione e la manutenzione dei bacini idrici, degli impianti di trattamento delle acque e delle condutture di distribuzione possono essere disagevoli e costose. Per le comunità non collegate alla rete idrica, i pendii scoscesi e i terreni rocciosi limitano anche la disponibilità di fonti di superficie, rendendo l'approvvigionamento idrico dispendioso in termini di tempo e fisicamente impegnativo, soprattutto per donne e ragazze, alle quali tradizionalmente è affidato il compito di provvedere all'acqua per uso domestico (Shrestha et al., 2019).

4.1.5 Salute mentale e benessere psicosociale

Gli eventi meteorologici estremi nelle regioni montane possono influire significativamente sulla salute, non solo in termini di lesioni fisiche (Sumann et al., 2020), ma anche di salute mentale e benessere psicosociale (Poudyal et al., 2021). Le comunità della regione dell'Hindu Kush Himalaya hanno subito gli impatti dei cambiamenti climatici soprattutto negli ultimi anni. Le popolazioni locali del distretto di Ghizer, nella regione di Gilgit-Baltisan, nel Pakistan settentrionale, si sono trovate esposte ad alluvioni improvvise e frane che hanno distrutto infrastrutture locali, terreni agricoli e abitazioni (Abbas e Khan, 2020).

Molte comunità montane che dipendono dall'agricoltura, dal turismo o dall'industria forestale sono più vulnerabili agli impatti degli eventi meteorologici estremi. La perdita dei mezzi di sostentamento, a causa dei danni ai raccolti, alle infrastrutture e alle attività turistiche, potenzialmente può portare all'instabilità economica. Inevitabilmente, questi eventi hanno un enorme impatto sulla salute mentale delle comunità locali. Queste esperienze possono causare stress, ansia e disturbi da stress post-traumatico tra le persone colpite (OMS, 2022).

Le popolazioni possono esitare a parlare apertamente di problemi di salute mentale per paura dello stigma sociale associato a tali condizioni (Ebrahim, 2022). Inoltre, i fenomeni meteorologici estremi possono isolare le comunità interrompendo i percorsi e le reti di comunicazione, il che limita o impedisce l'accesso ai servizi sanitari e a quelli dedicati alla salute mentale (Dewi et al., 2023). Questa sfida è aggravata dalle difficoltà di accesso a tali servizi dovute alla lontananza geografica o alla carenza di professionisti qualificati.

4.2 Risposte

Per migliorare l'accesso ai servizi WASH e le attività di DRR nelle regioni montane è necessario dare priorità all'acqua nella pianificazione urbana, oltre a integrare gli stessi servizi WASH e attività di DRR nei contributi determinati a livello nazionale (NDC nell'acronimo inglese) e nei piani nazionali di adattamento (NAP nell'acronimo inglese). È essenziale investire in infrastrutture resilienti al clima e in strategie di adattamento basate sulla comunità, così come nelle conoscenze locali. Inoltre, la promozione della collaborazione transfrontaliera migliorerà la stessa resilienza e contribuirà a mitigare gli impatti degli eventi meteorologici estremi.

È essenziale investire in infrastrutture resilienti al clima e in strategie di adattamento basate sulla comunità

4.2.1 Pianificazione urbana e territoriale

L'urbanizzazione nelle regioni montane può essere pianificata in modo migliore ponendo il settore WASH al centro delle strategie di pianificazione urbana e territoriale. È necessario sviluppare e attuare politiche efficaci di uso del territorio urbano per la protezione e la conservazione di questo ambiente e dei servizi ecosistemici, nonché per rendere i sistemi urbani resilienti al clima (Tiwari et al., 2018).

Le pratiche di gestione sostenibile del territorio, tra cui la riforestazione e il pascolo controllato, hanno contribuito a ridurre l'erosione del suolo e a migliorare la ritenzione idrica, ad esempio nelle Alpi. Gli sforzi operati nella gestione del suolo e nella riforestazione riflettono l'intento di stabilizzare i pendii, oltre che di favorire l'infiltrazione della neve sciolta e dell'acqua piovana, incrementando così la ricarica degli acquiferi e riducendo il rischio di alluvioni improvvise (Repe et al., 2020).

4.2.2 Gestione della riduzione del rischio di disastri

Nelle regioni montane, la DRR richiede una combinazione di adattamento e mitigazione dei cambiamenti climatici, pianificazione strategica urbana e territoriale, utilizzo di soluzioni ingegneristiche e sviluppo di sistemi di allerta precoce.

Attraverso la Nepal Karnali Water Activity, donatori come la United States Agency for International Development hanno utilizzato modelli idrologici come il Soil & Water Assessment Tool e il Water Accounting+ per valutare l'uso delle risorse idriche e la loro disponibilità nel bacino del fiume Karnali. Tali valutazioni modellano i piani di gestione della DRR a livello locale, guidando strategie di mitigazione e adattamento come la costruzione di stagni, la conservazione delle sorgenti, la riforestazione e l'identificazione di colture resilienti alle inondazioni e alla siccità.

Integrare gli sforzi volti a contrastare gli impatti dei cambiamenti climatici e le decisioni informate in materia di pianificazione urbana è fondamentale per ridurre al minimo le vulnerabilità, anche per quanto riguarda la fornitura di servizi igienico-sanitari. La collaborazione tra ricerca e politica è essenziale per affrontare le sfide peculiari delle regioni montane e proteggerne i servizi ecosistemici vitali. Iniziative come la Global Mountain Safeguard Research e la Mountain Partnership mirano a promuovere comunità montane sostenibili e resilienti, garantendo il benessere sociale ed economico e conservando al contempo gli ecosistemi montani (FAO, 2022; UNU-EHS, 2023).

4.2.3 Finanziamento delle misure di adattamento e delle infrastrutture resilienti al clima

Una revisione degli NDC[12] e dei NAP[13] presentati dai paesi alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici prima del giugno 2024 suggerisce che quelli dei servizi WASH e della gestione dei disastri sono settori prioritari nei paesi montani in via di sviluppo. Esempi di azioni di adattamento nelle regioni montane possono essere: studi di fattibilità per la costruzione di impianti di stoccaggio e di deviazione di emergenza dell'acqua, il rilascio controllato di acqua dai laghi glaciali, la gestione e la pianificazione per l'ottimizzazione dei bacini idrografici, il controllo nel tempo dei cambiamenti dei ghiacciai, la creazione di sistemi di riduzione del rischio e di allerta precoce delle GLOF nei bacini idrografici con aree ghiacciate.

Secondo le stime, i finanziamenti necessari per promuovere l'adattamento nei paesi in via di sviluppo nello specifico ammontano a 187 miliardi di dollari all'anno (in base a stime del 2021), pari all'1,3% del loro prodotto interno lordo per il decennio attuale. Il fabbisogno di finanziamenti per l'adattamento nei settori della sanità e dei servizi igienico-sanitari, dell'approvvigionamento idrico e della DRR rappresenta complessivamente circa il 20% del totale dei finanziamenti necessari per l'adattamento dei paesi montani in via di sviluppo. Tuttavia, il flusso di finanziamenti pubblici disponibile a livello internazionale per l'adattamento di tali paesi nel 2022 è stato di soli 13,8 miliardi di dollari, il che denota una consistente mancanza di sussidi (vedere capitolo 9). Questo vale anche per i settori dell'approvvigionamento idrico, della DRR, della sanità e dei servizi igienico-sanitari nelle regioni montane. Nonostante le considerevoli lacune, questi settori raccolgono nell'insieme circa il 30% dell'attuale flusso di finanziamenti per l'adattamento nei paesi montani in via di sviluppo (UNEP, 2024).

Le comunità montane si sono affidate alle conoscenze indigene per costruire la propria resilienza davanti alle sfide legate all'acqua e ai servizi igienico-sanitari

Le infrastrutture resilienti al clima, come argini rinforzati e canali di deviazione delle piene, possono proteggere le comunità montane e gli utenti a valle dagli impatti di eventi meteorologici estremi e dal cambiamento dei modelli idrologici. Il rapporto *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (IPCC, 2022) sottolinea che le infrastrutture possono essere progettate per resistere all'aumento del deflusso dovuto allo scioglimento della neve e dei ghiacci, garantendo la continuità dell'approvvigionamento idrico per uso urbano e agricolo.

Il caso delle Montagne Rocciose mette in evidenza l'importanza della comprensione dei flussi idrici stagionali (estivi, autunnali e invernali) ai fini della progettazione di interventi efficaci per il servizio idrico (Rood, 2008; IPCC, 2022).

Il costo a breve termine della realizzazione di infrastrutture resilienti al clima è generalmente superiore a quello delle tecnologie convenzionali. I costi aggiuntivi possono essere proibitivi, bloccando così lo sviluppo di tecnologie appropriate. Non ci si può aspettare che i mercati finanziari assorbano da soli tali costi, che quindi devono essere sostenuti dallo Stato, almeno fino a quando non si raggiunge una massa critica e il costo della tecnologia può essere ridotto. A tal riguardo, i fornitori di servizi potrebbero aver bisogno di supporto per sviluppare soluzioni tecnologiche mantenendo la loro redditività finanziaria.

[12] https://unfccc.int/NDCREG.

[13] https://napcentral.org/submitted-NAPs.

4.2.4 Promuovere strategie e azioni partecipative e basate sulla comunità

Le comunità montane si sono affidate alle conoscenze indigene per costruire la propria resilienza davanti alle sfide legate all'acqua e ai servizi igienico-sanitari. I progressi dell'ingegneria civile hanno favorito la messa in pratica di queste conoscenze, che hanno permesso di costruire sistemi modulari come serbatoi e cisterne per lo stoccaggio dell'acqua. Anche l'installazione di infrastrutture per la raccolta dell'acqua piovana in luoghi in cui è difficile trovare acqua potabile può essere utile alle comunità montane.

Il ricorso a strategie di adattamento basate sulla comunità, e che riconoscano l'importanza di dare voce alle popolazioni indigene, può offrire alle comunità locali la possibilità di partecipare ai processi decisionali relativi alla gestione dell'acqua e di incorporare le conoscenze locali e tradizionali nella progettazione e nell'attuazione di soluzioni adatte alle loro esigenze specifiche.

4.2.5 Gestione integrata delle risorse idriche

L'adattamento dei progetti di gestione integrata delle risorse idriche (IWRM nell'acronimo inglese) al contesto locale delle regioni montane ha il potenziale di aiutare ad affrontare alcune sfide legate all'acqua, come l'impatto dei cambiamenti del manto nevoso e del ritiro dei ghiacciai sulla disponibilità idrica (vedere riquadro 2.2). Ad esempio, il potenziamento della capacità di stoccaggio dell'acqua attraverso la costruzione di nuovi bacini e il ripristino dei sistemi tradizionali di stoccaggio dell'acqua, come stagni e cisterne, può contribuire ad attutire gli effetti della variabilità stagionale dell'acqua e a mitigare l'impatto delle alluvioni improvvise. È inoltre importante prendere in considerazione le innovazioni tecnologiche, come il monitoraggio efficiente dei ghiacciai e i sistemi di allerta precoce (vedere capitolo 8), che possono fornire informazioni essenziali sullo scioglimento dei ghiacciai e sulle GLOF (Taylor et al., 2023).

In alcuni paesi andini sono stati istituiti sistemi di IWRM per monitorare il ritiro dei ghiacciai e la formazione di laghi glaciali, fornendo così alle comunità avvisi tempestivi, riducendo il rischio di inondazioni improvvise, proteggendo vite umane e infrastrutture WASH. Nello Stato Plurinazionale della Bolivia e in Perù sono in corso valutazioni nazionali del rischio e della pericolosità di eventi GLOF, per garantire che le sfide legate alla sicurezza idrica e ai servizi di approvvigionamento possano essere affrontate insieme agli impatti dei cambiamenti climatici (Emmer et al., 2022).

4.2.6 Sviluppo di sistemi idrici e igienico-sanitari decentralizzati

I sistemi idrici e igienico-sanitari decentralizzati possono essere particolarmente efficaci nelle regioni montane (riquadro 4.2), riducendo il rischio di danni alle infrastrutture durante le calamità in terreni accidentati, soggetti a frequenti frane. A tal proposito, nelle regioni montane della Repubblica Democratica Popolare del Laos e del Nepal, le iniziative condotte dalle comunità sono riuscite a creare soluzioni resilienti e sostenibili in materia di acqua e servizi igienico-sanitari, dimostrando l'efficacia dei sistemi decentralizzati in ambienti difficili (IUCN, s.d.).

Riquadro 4.2 Un sistema di approvvigionamento idrico e igienico-sanitario alimentato a gravità e basato sulla comunità

Nel distretto di Xiengngeun, nella provincia di Luang Prabang della Repubblica Democratica Popolare del Laos, l'85% delle famiglie non aveva accesso ai servizi igienico-sanitari di base e le infrastrutture erano inutilizzabili a causa dell'incuria. Le persone che risiedevano nei villaggi dovevano spesso percorrere lunghe distanze a piedi per raccogliere l'acqua, che di frequente era contaminata e provocava la diffusione di problemi di salute come la diarrea.

Per affrontare le sfide tipiche della maggior parte delle aree montane (pendii scoscesi, lontananza e scarsa densità di popolazione), il Programma delle Nazioni Unite per gli insediamenti umani ha realizzato un progetto pilota in materia di acqua e servizi igienico-sanitari (WASH nell'acronimo inglese) basato sulla comunità e rivolto a 1.221 famiglie residenti in sei villaggi. Una componente chiave dell'iniziativa è stata lo sviluppo di un sistema di tubature per l'acqua alimentato a gravità, che sfrutta la topografia locale per fornire acqua in modo efficiente, senza la necessità di sistemi di pompaggio ad alta intensità energetica. Questo approccio, insieme ai fondi di rotazione per il miglioramento dei servizi igienico-sanitari gestiti dalla comunità, ha permesso di collegare alla rete idrica oltre il 90% delle famiglie dei sei villaggi, mentre prima la percentuale era pari allo 0%. Al coinvolgimento della comunità è stata data molta importanza e i residenti sono stati formati per proteggere e mantenere le infrastrutture di approvvigionamento idrico.

Il progetto ha affrontato anche diverse sfide che persistevano da tempo. Tra queste, l'assenza di un sistema di drenaggio formale rappresentava un problema significativo per chi risiedeva nelle aree a valle soggette a inondazioni. Inoltre, la bassa densità di popolazione ha complicato gli sforzi per conseguire economie di scala nella fornitura di servizi WASH, rendendo difficile giustificare i costi di costruzione e manutenzione di infrastrutture estese ad aree scarsamente popolate nel contesto di terreni così accidentati.

Con oltre l'80% delle famiglie attualmente collegate alla rete idrica, e più del 90% con accesso ai servizi igienico-sanitari di base, il progetto pilota di Xiengngeun dimostra il potenziale degli approcci basati sulla comunità per superare le sfide legate alla fornitura di servizi idrici tipiche delle regioni montane.

Fonte: UN-Habitat (s.d.).

4.3 Conclusioni

Le molteplici sfide che devono affrontare gli insediamenti umani nelle regioni montane, con particolare riferimento alla gestione delle risorse idriche, servizi WASH, misure di DRR e questioni sanitarie, sono aggravate dalla crescente frequenza e intensità di eventi meteorologici estremi, come GLOF, frane e alluvioni improvvise. Sebbene sia necessario valutare in che misura i servizi WASH vengano interrotti, il coinvolgimento della popolazione è un fattore che ha favorito la riduzione dei rischi per la salute pubblica nelle comunità montane vulnerabili.

Le risposte per migliorare l'accesso ai servizi WASH e alla DRR includono: dare priorità all'acqua nella pianificazione urbana e territoriale, nonché ai servizi WASH e alla DRR nei NDC e nei NAP; investire in infrastrutture resistenti al clima; promuovere strategie di adattamento basate sulla comunità che riconoscano le conoscenze locali e indigene e ne tengano conto. L'adattamento dei progetti di IWRM al contesto locale può dover affrontare sfide come l'impatto del ritiro dei ghiacciai sulla disponibilità di acqua. La collaborazione transfrontaliera e il rafforzamento delle misure di DRR possono contribuire a mitigare gli impatti degli eventi estremi.

Le azioni politiche coordinate per affrontare queste sfide puntano sull'IWRM come quadro di riferimento che dà priorità all'equilibrio tra esigenze sociali, economiche e ambientali, incorporando conoscenze tradizionali e tecnologie moderne. L'uso di sistemi idrici e igienico-sanitari decentralizzati può aumentare la resilienza e ridurre i danni alle

infrastrutture nell'eventualità di disastri. Tali sistemi responsabilizzano le comunità locali attraverso lo sviluppo di competenze e approcci partecipativi, assicurando che le strategie WASH adottate siano culturalmente appropriate e rilevanti a livello locale, il che è fondamentale per garantire misure di adattamento al clima e servizi di supporto alla salute efficaci nelle aree ad alta quota.

Questo capitolo sollecita anche a investire in infrastrutture resilienti ai rischi legati all'acqua e al clima, come argini rinforzati e canali di deviazione delle inondazioni, e ad applicare soluzioni basate sulla natura. Le strategie di azione per il clima e di sicurezza idrica per le comunità vulnerabili che vivono in zone ad alta quota devono prendere in considerazione i servizi di supporto alla salute, compresi sistemi di sostegno alla salute mentale.

Riferimenti bibliografici

Abbas, S. e Khan, A. 2020. Socioeconomic impacts of natural disasters: Implication for flood risk measurement in Damas Valley, District Ghizer, Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Pakistan Geographical Review*, vol. 75, N. 1, pagg. 71-83. www.researchgate.net/publication/343098654.

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. e Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Alfthan, B., Gjerdi, H. L., Puikkonen, L., Andresen, M., Semernya, L., Schoolmeester, T. e Jurek, M. 2018. *Mountain Adaptation Outlook Series: Synthesis Report.* Nairobi/Vienna/Arendal, Norvegia, Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP)/GRID-Arendal. https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/412/original/SynthesisReport_screen.pdf?1544437610.

Almulhim, A. I., Alverio, G. N., Sharifi, A., Shaw, R., Huq, S., Mahmud, M. J., Ahmad, S. e Abubakar, I. R. 2024. Climate-induced migration in the Global South: An in depth analysis. *npj Climate Action*, vol. 3, articolo 47. doi.org/10.1038/s44168-024-00133-1.

Bhandari, D., Bi, P., Sherchand, J. B., Dhimal, M. e Hanson-Easey, S. 2020. Assessing the effect of climate factors on childhood diarrhoea burden in Kathmandu, Nepal. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 223, N. 1, pagg. 199-206. doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.09.002.

Chapagain, D., Dhaubanjar, S. e Bharati, L. 2021. Unpacking future climate extremes and their sectoral implications in western Nepal. *Climatic Change*, vol. 168, articolo 8. doi.org/10.1007/s10584-021-03216-8.

Chapagain, D., Bharati, L., Mechler, R., Samir, K. C., Pflug, G. e Borgemeister, C. 2024. Understanding the role of climate change in disaster mortality: Empirical evidence from Nepal. *Climate Risk Management*, vol. 46, articolo 100669. doi.org/10.1016/j.crm.2024.100669.

Clerici, N., Cote-Navarro, F., Escobedo, F. J., Rubiano, K. e Villegas, J. C. 2019. Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes. *Science of the Total Environment*, vol. 685, pagg. 1181-1192. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.275.

De Jong, C. 2015. Challenges for mountain hydrology in the third millennium. *Frontiers in Environmental Science*, vol. 3. doi.org/10.3389/fenvs.2015.00038.

Dewi, S. P., Kasim, R., Sutarsa, I. N., Hunter, A. e Dykgraaf, S. H. 2023. Effects of climate-related risks and extreme events on health outcomes and health utilization of primary care in rural and remote areas: A scoping review. *Family Practice*, vol. 40, N. 3, pagg. 486-497. doi.org/10.1093/fampra/cmac151.

Dhimal, M., Ahrens, B. e Kuch, U. 2015. Climate change and spatiotemporal distributions of vector-borne diseases in Nepal: A systematic synthesis of literature. *PLoS ONE*, vol. 10, articolo e0129869. doi.org/10.1371/journal.pone.0129869.

Ebrahim, Z. 2022. Climate Disasters Trigger Mental Health Crisis in Pakistan's Mountains. Sito web di Dialogue Earth. https://dialogue.earth/en/climate/climate-disasters-trigger-mental-health-crisis-in-pakistans-mountains/.

Ehrlich, D., Melchiorri, M. e Capitani, C. 2021. Population trends and urbanisation in mountain ranges of the world. *Land*, vol. 10, N. 3, articolo 255. doi.org/10.3390/land10030255.

Emmer, A., Wood, J. L., Cook, S. J., Harrison, S., Wilson, R., Díaz-Moreno, A., Reynolds, J. M., Torres, J. C., Yarleque, C., Mergili, M., Jara, H. W., Bennett, G., Caballero, A., Glasser, N. F., Melgarejo, E., Riveros, C., Shannon, S., Turpo, E., Tinoco, T., Torres, L., Garay, D., Villafane, H., Garrido, H., Martínez, C., Apaza, N., Araujo, J. e Poma, C. 2022. 160 glacial lake outburst floods (GLOFs) across the Tropical Andes since the Little Ice Age. *Global and Planetary Change*, vol. 208, articolo 103722. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103722.

FAO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura). 2022. The Mountain Partnership Vision and Mission. Sito web di Mountain Partnership. www.fao.org/mountain-partnership/about/vision-and-mission/en#:~:text=By%202030%2C%20the%20Mountain%20Partnership,livelihood%20and%20well%2Dbeing%20of.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. e Steltzer, H. 2019. High mountain areas. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama e N. M. Weyer (a cura di), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 131-202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.

Hodson, A. J. 2014. Understanding the dynamics of black carbon and associated contaminants in glacial systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews (WIREs): Water*, vol. 1, N. 2, pagg. 141-149. doi.org/10.1002/wat2.1016.

IPCC (Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico). 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di)]. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009325844.

IUCN (Unione internazionale per la conservazione della natura). s.d. Nepal. Sito web dell'IUCN. https://iucn.org/our-work/region/asia/countries/nepal.

Jia, L., Ma, Q., Du, C., Hu, G. e Shang, C. 2020. Rapid urbanization in a mountainous landscape: Patterns, drivers, and planning implications. *Landscape Ecology*, vol. 35, pagg. 2449-2469. doi.org/10.1007/s10980-020-01056-y.

Joshi, N. e Dongol, R. 2018. Severity of climate induced drought and its impact on migration: A study of Ramechhap District, Nepal. *Tropical Agricultural Research*, vol. 29, N. 2, pagg. 19-211.

Lützow, N., Veh, G. e Korup, O. 2023. A global database of historic glacier lake outburst floods. *Earth System Science Data*, vol. 15, N. 7, pagg. 2983-3000. doi.org/10.5194/essd-15-2983-2023.

Maharjan, S. B., Steiner, J. F., Shrestha, A. B., Maharjan, A., Nepal, S., Shrestha, M. S., Bajracharya, B., Rasul, G., Shrestha, M., Jackson, M. e Gupta, N. 2021. *The Melamchi Flood Disaster. Cascading Hazard and the Need for Multihazard Risk Management*. Kathmandu, Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna (ICIMOD). https://lib.icimod.org/record/35284.

OMS (Organizzazione mondiale della sanità). 2022. *Mental Health and Climate Change: Policy Brief*. OMS. https://iris.who.int/handle/10665/354104.

Poudyal, N. C., Joshi, O., Hodges, D. G., Bhandari, H. e Bhattarai, P. 2021. Climate change, risk perception, and protection motivation among high-altitude residents of the Mt. Everest region in Nepal. *Ambio*, vol. 50, pagg. 505-518. doi.org/10.1007/s13280-020-01369-x.

Repe, A. N., Poljanec, A. e Vrščaj, B. (a cura di). 2020. *Soil Management Practices in the Alps: A Selection of Good Practices for the Sustainable Soil Management in the Alps*. Lubiana, EU Interreg Alpine Space. www.alpine-space.eu/wp-content/uploads/2022/06/46-1-links4soils-Soil%20Management%20Practices%20in%20the%20Alps%20-%20a%20collection-output.pdf.

Rood, S. B., Pan, J., Gill, K. M., Franks, C. G., Samuelson, G. M. e Shepherd, A. 2008. Declining summer flows of Rocky Mountain rivers: Changing seasonal hydrology and probable impacts on floodplain forests. *Journal of Hydrology*, vol. 349, N. 3-4, pagg. 397-410. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.012.

Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M. e Zhou, B. 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, J. B. R. Matthews, S. Berger, M. Huang, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, E. Lonnoy, T. K. Maycock, T. Waterfield, K. Leitzell e N. Caud (a cura di), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contributo del Gruppo di lavoro I al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 1513-1766. doi.org/10.1017/9781009157896.013.

Shrestha, S., Chapagain, P. S. e Ghimire, M. 2019. Gender perspective on water use and management in the context of climate change: A case study of Melamchi watershed area, Nepal. *Sage Open*, vol. 9, N. 1. doi.org/10.1177/2158244018823078.

Somers, L. D. e McKenzie, J. M. 2020. A review of groundwater in high mountain environments. *Wiley Interdisciplinary Reviews (WIREs): Water*, vol. 7, N. 6, articolo e1475. doi.org/10.1002/wat2.1475.

Sumann, G., Moens, D., Brink, B., Brodmann Maeder, M., Greene, M., Jacob, M., Koirala, P., Zafren, K., Ayala, M., Musi, M., Oshiro, K., Sheets, A., Strapazzon, G., Macias, D. e Paal, P. 2020. Multiple trauma management in mountain environments: A scoping review. *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, vol. 28, articolo 117. doi.org/10.1186/s13049-020-00790-1.

Taylor, C., Robinson, T. R., Dunning, S., Carr, J. R. e Westoby, M. 2023. Glacial lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communications*, vol. 14, articolo 487. doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x.

Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Viviroli, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. e Adler, C. 2022. Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls. *PLoS ONE*, vol. 17, N. 7, articolo e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.

Tiwari, P. C., Tiwari, A. e Joshi, B. 2018. Urban growth in Himalaya: Understanding the process and options for sustainable development. *Journal of Urban and Regional Studies on Contemporary India*, vol. 4, N. 2, pagg. 15-27. https://core.ac.uk/download/pdf/222961854.pdf.

UNEP (Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente). 2024. *Adaptation Gap Report 2024. Come Hell and High Water: As Fires and Floods Hit the Poor Hardest, it is Time for the World to Step Up Adaptation Actions*. Nairobi, UNEP. doi.org/10.59117/20.500.11822/46497.

UN-Habitat (Programma delle Nazioni Unite per gli insediamenti umani). 2016. *Nepal Earthquake 2015: Reviving Sanitation Campaign*. Global Sanitation Fund Lessons. Kathmandu, UN-Habitat. https://unhabitat.org/sites/default/files/documents/2019-05/gsf-021-eq-final.pdf.

——. s.d. Community-based Water Supply and Sanitation Project Xieng Ngeun, Luangprabang, Lao PDR. *The Mekong Region Water and Sanitation Initiative (MEK-WATSAN)*. Sito web di UN-Habitat. https://unhabitat.la/projects/community-based-wash-project-xieng-ngeun/.

UNU-EHS (United Nations University Institute for Environment and Human Security). 2023. 5 Insights Towards Systemic Risk Reduction in Mountains. Sito web dell'UNU-EHS. (Consultato il 9 ottobre 2023.) https://unu.edu/ehs/series/5-insights-towards-systemic-risk-reduction-mountains.

Zogaris, S., Jayasinghe, A. D., Sanjaya, K., Vlami, V., Vavalidis, T., Grapci-Kotori, L. e Vanhove, M. P. M. 2021. Water management impacts on mountain rivers: Insights from tropical, subtropical and Mediterranean-climate basins. E. Dimitriou e C. Papadaki (a cura di), *Environmental Water Requirements in Mountainous Areas*. Elsevier, pagg. 155-200. doi.org/10.1016/B978-0-12-819342-6.00004-X.

Capitolo 5

Industria ed energia

UNIDO
Jon Marco Church
Con il contributo di John Payne e Christian Susan (UNIDO)

È un paradosso che l'industria e l'energia siano la causa dei cambiamenti climatici che interessano le aree montane e la criosfera, e al tempo stesso ne subiscano le conseguenze. I rilevamenti condotti a metà del XIX secolo indicano che i ghiacciai si sono ritirati bruscamente a causa del forzante radiativo determinato «dalla crescente deposizione di *black carbon* di origine industriale sulla neve» (vedere riquadro 2.1), in particolare nell'Europa occidentale (Sigl et al., 2018, pag. 50; Beard et al., 2022a; 2022b). Inoltre, il riscaldamento globale intensifica il loro ritiro.

Questo capitolo mostra come l'uso dell'acqua da parte dei settori industriale ed energetico nelle aree montane possa essere adattato ai rapidi cambiamenti che interessano la criosfera (IPCC, 2019), come la fusione dei ghiacciai, la diminuzione del manto nevoso e i relativi impatti sulle acque superficiali e sotterranee.

Le industrie dipendenti dall'acqua si sono sviluppate nelle aree montane, dove l'acqua e altre risorse sono presenti in quantitativi relativamente abbondanti

Così come l'industria e l'energia sono importanti per l'acqua e i ghiacciai nelle aree montane, anche l'acqua è rilevante per questi settori. Le industrie dipendenti dall'acqua si sono sviluppate nelle aree montane, dove l'acqua e altre risorse sono presenti in quantitativi relativamente abbondanti (Perlik, 2019; Modica, 2022); ciò ha contribuito all'industrializzazione di tali aree (Collantes, 2009). Di conseguenza, in Europa il numero di persone impiegate nel settore industriale è relativamente più alto nelle aree montane che in quelle di pianura (Nordregio, 2004). In America Latina, si stima che l'85% dell'energia idroelettrica generata nei paesi andini sia prodotta nelle aree montane (Mountain Partnership, 2014). La fornitura di acqua potabile minerale è un'attività industriale strategica, poiché la risorsa viene spesso estratta dalle aree montane.

Oltre che per la produzione industriale ed energetica, in particolare nelle centrali idroelettriche, ma anche in quelle a carbone e a legna, l'acqua è necessaria per la lavorazione dei minerali, la produzione di legname e lo sviluppo del turismo nelle aree montane (Talandier e Donsimoni, 2022). Ad esempio, è indispensabile per produrre la neve artificiale utilizzata dall'industria sciistica quando i fenomeni atmosferici non garantiscono quantità sufficienti di neve naturale. L'acqua è alla base del rafting e della navigazione a vela, è essenziale per la pesca sportiva e per il settore dell'ospitalità (FAO/OMT, 2023). La quantità e la qualità dell'acqua e la biodiversità acquatica sono influenzate dalle attività industriali e dalla produzione di energia, nonché dai cambiamenti climatici; questi fattori determinano, ad esempio, lo scioglimento dei ghiacciai e del permafrost, così come le variazioni del limite superiore degli alberi e di altri tipi di vegetazione (Zou et al., 2023).

Mancano tuttavia dati sulle tendenze dello sviluppo industriale ed energetico ad alta intensità idrica nelle aree montane. Con l'evoluzione delle economie dei paesi in via di sviluppo, se prima erano le attività agricole ed estrattive ad essere i principali motori economici (Connor e Chaves Pacheco, 2024), ora questa funzione è svolta dal settore dei servizi (turismo, commercio, istruzione e assistenza sanitaria), che spesso è quello che genera più opportunità di lavoro. Questo cambiamento sta interessando anche le aree montane.

A causa dell'espansione globale delle industrie che dipendono dall'acqua, è probabile che l'uso industriale dell'acqua aumenti anche in montagna. Ad esempio, a livello globale entro il 2060 l'estrazione delle materie prime potrebbe crescere di circa il 60% rispetto al livello del 2020 (UNEP, 2024). Inoltre, l'importazione di acqua virtuale, ossia l'acqua "nascosta" impiegata per consentire lo scambio di prodotti e materiali, è un fattore di produzione significativo per l'industria di montagna.

L'acqua che ritorna alle montagne in termini di beni e servizi non deve essere sottovalutata. Le aree montane sono ambienti che, a causa dei limiti che presentano, possono richiedere l'importazione di più acqua virtuale di quella esportata (Cabello et al., 2015; Malo-Larrea et al., 2022; Church, 2024).

5.1 Sfide

Una sfida importante per l'industria e l'energia è l'altitudine a cui è possibile operare. Ciò è legato alla pendenza e anche alla temperatura, poiché l'acqua ghiacciata non è adatta al consumo e ad altri usi. Ciononostante, ci sono attività industriali che vengono svolte anche nelle aree glaciali e nelle regioni polari, come l'estrazione mineraria e la trasmissione di energia, nonché le operazioni legate alle infrastrutture di telecomunicazione e ad alcune industrie turistiche (Smith López et al., 2024). Dal momento che le condizioni sopra menzionate possono comportare notevoli investimenti e costi di esercizio, le attività industriali si limitano di norma a quelle con elevati ritorni sugli investimenti.

Il riscaldamento globale sta rendendo più rischiosi gli investimenti a causa delle incertezze, dei pericoli più frequenti e a cascata legati ai fenomeni naturali (come collasso di laghi glaciali, valanghe, colate di fango e inondazioni), nonché di quelli connessi a eventi causati da vulnerabilità tecniche, come cedimento di dighe o di altre infrastrutture (Tuihedur Rahman et al., 2024).

Quando le temperature aumentano, il ghiaccio inizia a fondersi, con dinamiche che variano soprattutto a seconda dell'altitudine, della latitudine e della stagione. Il cambiamento della criosfera sta rapidamente spostando i limiti dell'altitudine a cui si può operare, poiché un numero crescente di montagne non presenta ghiacciai e neve. La pioggia e le acque sotterranee, compresi gli acquiferi carsici, sono importanti per l'industria e l'energia. Anche i cambiamenti relativi alle precipitazioni e alla permeabilità del suolo nelle aree montane rappresentano una considerevole sfida dal punto di vista tecnico.

La gestione di una risorsa spesso percepita come abbondante a livello locale è una sfida impegnativa. Tale risorsa può essere data per scontata, soprattutto nelle aree alimentate dai ghiacciai; secondo le previsioni, però, questi si fonderanno più rapidamente a causa del riscaldamento globale. Si tratta di un fattore che può determinare un uso eccessivo della risorsa e aumentare così il rischio di siccità, sia a valle che nelle stesse aree montane (Orr et al., 2024). I cambiamenti climatici e le variazioni nei modelli delle precipitazioni in molti casi intensificano i fenomeni siccitosi.

La sfida più urgente consiste nello svincolare la disponibilità e l'approvvigionamento idrico locale dall'uso dell'acqua per soddisfare la domanda dei settori industriale ed energetico; una domanda che dipende dalle economie e dai mercati locali, nazionali e globali. In periodi di scarsità d'acqua può infatti esserci una domanda di prodotti ad alta intensità idrica, il che può generare conflitti per l'uso della risorsa a livello locale nelle aree montane, oltre che tra le comunità a monte e a valle (Füreder et al., 2018).

5.2 Impatto dell'inquinamento industriale sulla qualità dell'acqua

Lo sviluppo industriale ed energetico può influire sulla qualità dell'acqua (figura 5.1). Inoltre, a causa del progressivo declino demografico ed economico, le aree montane remote possono essere difficili da regolamentare, il che può determinare prelievi e scarichi incontrollati di acqua, compreso il rilascio di inquinanti (Machate et al., 2023). Lo sviluppo industriale e le aree dismesse alterano il regime idrico dei siti e degli ecosistemi legati all'acqua e possono provocare l'infiltrazione di inquinanti nelle acque superficiali e sotterranee (Modica, 2022).

La gestione delle acque reflue industriali può rappresentare una sfida importante nelle aree montane, dove la pendenza può rendere difficile lo sviluppo di sistemi per lo stoccaggio, il trattamento e il riutilizzo *in loco* di acqua e rifiuti. Attività non sufficientemente regolamentate, come l'estrazione mineraria e l'allevamento ittico,

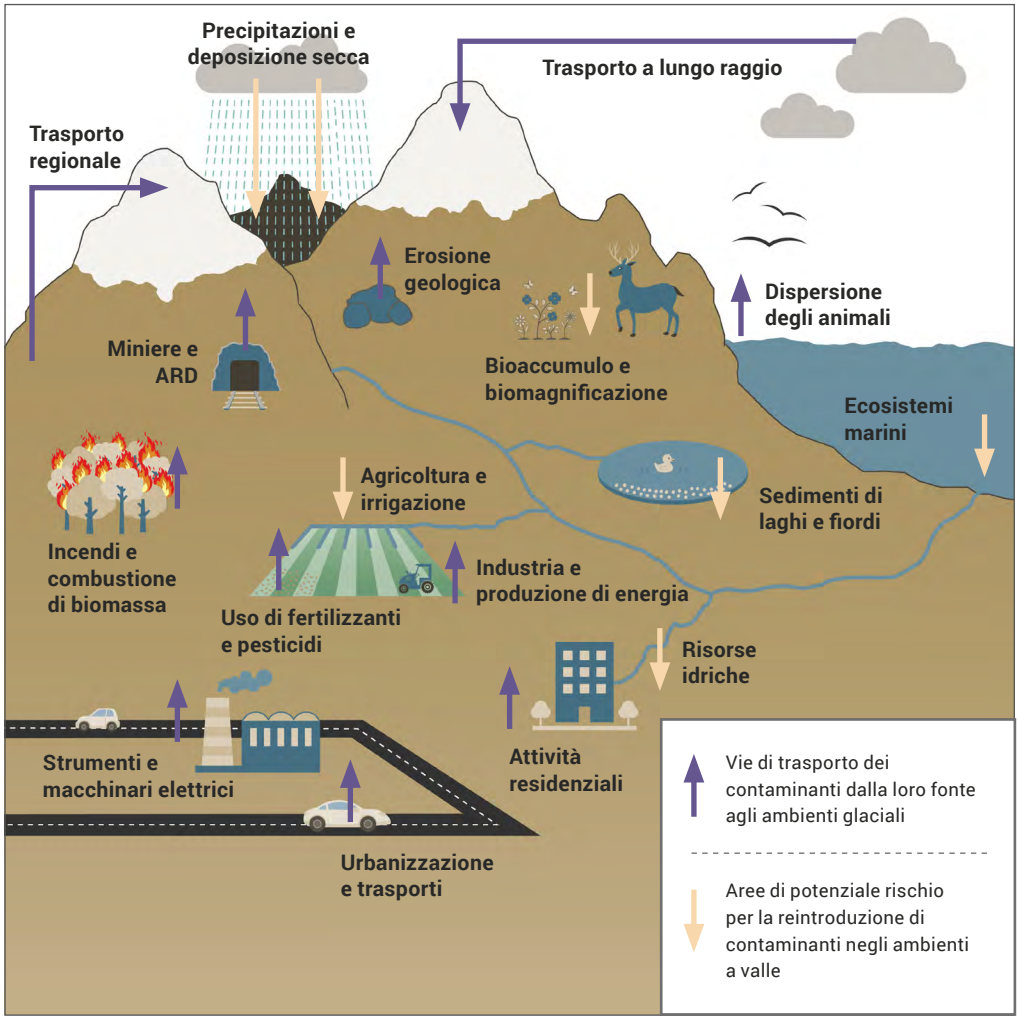
possono causare una significativa dispersione di sostanze inquinanti, tra cui metalli pesanti e inquinanti organici persistenti come pesticidi e antibiotici (Wright et al., 2011; UNIDO, 2017). La gestione dei residui minerari, anche quelli provenienti da miniere chiuse, è di fondamentale importanza, anche in considerazione dei potenziali rischi naturali che interessano le aree montane (Zoï Environment Network, 2013; UNECE, 2014).

Le comunità montane possono essere vulnerabili all'inquinamento delle acque dovuto alle attività industriali

Le comunità montane possono essere vulnerabili all'inquinamento delle acque dovuto alle attività industriali. Ne deriva che uno sviluppo industriale ed energetico non sufficientemente regolamentato può avere ripercussioni negative sulle aree a monte e a valle. È evidente che le aree a valle dipendono dagli sviluppi che si verificano a monte e sono vulnerabili ad essi, anche se le zone di pianura sono in genere più ricche di quelle montane e quindi possono contare su maggiori risorse per la loro resilienza (Perlik, 2015). Inoltre, gli impatti negativi a livello transfrontaliero e gli incidenti industriali che coinvolgono le risorse idriche possono inasprire le relazioni tra le comunità a monte e a valle (UNECE, 2016).

Il numero di donne, bambini, anziani e persone con disabilità è spesso molto alto nelle comunità montane, a causa della migrazione di manodopera verso aree più ricche (Mishra, 2002). Ciò significa che nelle aree montane l'inquinamento industriale colpisce in modo particolare questi gruppi.

Figura 5.1
Vie di trasporto e processi di deposizione dei contaminanti in ambienti glaciali



Nota: ARD, drenaggio acido delle rocce.

Fonte: basato su Beard et al. (2022a, fig. 2, pag. 635).

5.3 Esempi di utilizzo dell'acqua in ambito industriale ed energetico

Un esempio di impiego dell'acqua per fini industriali ed energetici nelle aree montane riguarda l'estrazione su larga scala del litio, utilizzato per produrre batterie e recuperato dalle salamoie tramite metodi di estrazione basati sull'evaporazione; un'attività concentrata, in particolare, nell'area che si estende dal sud-ovest dello Stato plurinazionale della Bolivia al nord dell'Argentina e del Cile. Quest'area ospita il 56% delle risorse totali di litio conosciute a livello mondiale. L'attività estrattiva esercita una pressione significativa sulle acque superficiali e sotterranee, nonché sulle zone umide e altri ecosistemi legati all'acqua. Questa pressione, di conseguenza, viene percepita anche dalle comunità che dipendono da tali risorse idriche. Per produrre una tonnellata di litio sono necessari circa 2.000 metri cubi di acqua, in un'area dal clima arido e con scarse precipitazioni (UNECLAC, 2023).

L'estrazione mineraria su piccola scala e artigianale può anche avere enormi impatti a monte e a valle. Ad esempio, l'uso del mercurio nell'estrazione dell'oro è nocivo per la qualità e la disponibilità dell'acqua e per la salute pubblica (UNEP, 2012). I movimenti comunitari e ambientalisti svolgono un ruolo fondamentale nel sensibilizzare a questi problemi e aiutare ad affrontarli: la miniera d'oro di Pascua-Lama costituisce un esempio concreto in questo senso (riquadro 5.1).

Il rapido sviluppo del cryptomining legato all'energia idroelettrica nelle aree montane rappresenta una minaccia per i settori dell'industria e dell'energia

Inoltre, il rapido sviluppo del *cryptomining* legato all'energia idroelettrica nelle aree montane rappresenta una minaccia per i settori dell'industria e dell'energia. Il *cryptomining* è un processo chiave per l'emissione di criptovalute che utilizza risorse informatiche specializzate, le quali richiedono grandi quantità di energia a basso costo. Il carbone è la principale fonte di energia utilizzata, con una quota del 45%, e l'energia idroelettrica la principale fonte di energia rinnovabile, con una percentuale pari al 16% (Chamanara e Madani, 2023). Entrambe queste fonti sono spesso prodotte in aree montane, con impatti significativi sulla quantità e sulla qualità delle risorse idriche (tabella 5.1), nonché sulle reti elettriche. Ad esempio, in Asia centrale diverse criptominiere operano sulle montagne del Kazakhstan e del Kirghizistan, dove è disponibile elettricità a basso costo. Tali attività aumentano la pressione sul sistema elettrico al punto che, nel gennaio 2022, l'intero Sistema elettrico unificato dell'Asia centrale è temporaneamente collassato, provocando un *blackout* su larga scala che ha colpito milioni di persone nella parte meridionale del Kazakhstan, in Kirghizistan e in Uzbekistan.

Tabella 5.1 Impronta idrica annuale del processo di creazione di bitcoin a livello mondiale, 2020-2021

Paese	**Impronta idrica** (milioni di m³)	**Impronta idrica** (m³/persona)
Cina	780,05	0,55
Stati Uniti d'America	205,73	0,62
Canada	150,01	3,85
Kazakhstan	104,18	5,31
Federazione russa	94,11	0,65
Malesia	64,57	1,90
Germania	51,94	0,62
Norvegia	39,91	7,31
Iran (Repubblica Islamica)	19,25	0,22
Thailandia	17,98	0,25
Tutti gli altri paesi	119,84	0,02

Fonti: elaborazione dell'autore, basata sui dati di Chamanara e Madani (2023, fig. 7, pag. 17) e UNSD (s.d.).

La produzione di neve artificiale utilizza una quantità significativa di acqua. Ad esempio, si stima che, solo nella zona delle Alpi, si utilizzino 280 milioni di metri cubi di acqua (Unbehaun e Pröbstl, 2006) e 2.100 gigawatt di elettricità (Hamberger e Doering, 2015). Nel 2009, la Convenzione delle Alpi ha riferito che in due località sciistiche svizzere «la produzione di neve artificiale è responsabile del 22% e del 36% dei prelievi idrici annuali» e che «l'innevamento artificiale può entrare in conflitto con la domanda d'acqua per altri usi (ad esempio, l'approvvigionamento di acqua potabile)» (Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi, 2009, pag. 65). Per garantire l'approvvigionamento idrico necessario alla produzione di neve artificiale quando l'acqua scarseggia in inverno, sono stati costruiti bacini di accumulo per immagazzinare l'acqua nelle stagioni in cui è abbondante, ovvero in estate e in autunno.

La silvicoltura e la produzione di legname sono importanti per le aree montane, anche se l'altitudine e altri fattori rendono, in media, le foreste di montagna meno produttive e redditizie di quelle di pianura. Le attività di produzione e lavorazione del legname si sono quindi spesso spostate in pianura (Price et al., 2011). Tuttavia, le foreste di montagna svolgono un ruolo fondamentale per la gestione delle acque (Schyns e Vanham, 2019). A seconda delle tipologie di alberi che ospitano, questi ambienti possono trattenere quantità significative di acqua e umidità nei bacini idrografici situati a una maggiore altitudine, stabilizzare il suolo e contrastare l'erosione, contribuendo così a ridurre i rischi legati all'acqua. In questo senso, si può dire che le foreste di montagna offrano soluzioni basate sulla natura. Questo non è il caso delle piantagioni di alberi per la produzione di legname, la cui capacità di assorbimento è solitamente inferiore a quella delle foreste naturali. Gli impatti della silvicoltura sulla qualità dell'acqua includono «il trasporto di sedimenti, la perdita di nutrienti, il trasporto di carbonio, il rilascio di metalli e di cationi basici», oltre a «cambiamenti nell'acidità e nella temperatura» (Shah et al., 2022, pag. 1).

Riquadro 5.1 Proteggere i ghiacciai dall'impatto delle attività estrattive: Pascua-Lama, Cile

Pascua-Lama è una miniera a cielo aperto per l'estrazione dell'oro situata sulle Ande a 3.800-5.200 metri sul livello del mare, a cavallo del confine tra Argentina e Cile. Il sito mette in evidenza la complessa interazione di interessi, prospettive e percezioni di imprese, governi e popolazioni indigene attraverso la lente dei ghiacciai e dell'approvvigionamento idrico (Kronenberg, 2009; Amos-Landgraf, 2021).

I tre ghiacciai coinvolti si trovano sul versante cileno e sono di piccole dimensioni. Inizialmente, una società mineraria aveva ricevuto l'approvazione, dopo una valutazione dell'impatto ambientale, per spostare e ricollocare il ghiaccio su un ghiacciaio vicino. Questo piano ha incontrato l'opposizione del governo cileno e delle comunità locali, nonché di quella internazionale, per le potenziali minacce all'agricoltura, all'ambiente e alla salute.

Nel 2006, le autorità ambientali cilene hanno stabilito che la società mineraria non poteva agire sui ghiacciai, ma doveva proteggerli e monitorarli. Il valore per le comunità a valle della disponibilità intrinseca di acqua, garantita dal deflusso glaciale, ha influenzato fortemente la decisione. I ghiacciai più piccoli sono più sensibili al riscaldamento globale e il loro valore è probabilmente più vincolato al contesto locale (Kronenberg, 2009). Dunque, se lo scioglimento dei ghiacciai è diventato il simbolo del riscaldamento globale è anche perché le questioni politiche e sociali devono aver giocato un ruolo decisivo in questo senso.

Nel 2013, il progetto minerario è stato sospeso in seguito a una petizione della comunità indigena Diaguita, che risiede vicino alla miniera e lamentava gli eccessivi prelievi di acqua dai ghiacciai e dal fiume Estrecho. Nel 2020, il primo tribunale ambientale del Cile ha ordinato la chiusura del giacimento multando la società mineraria. Tra le accuse mosse alla società, ci sono la contaminazione del fiume Estrecho, alimentato dai ghiacciai e importante fonte d'acqua per uso domestico e irriguo a livello regionale, e la mancanza di un'adeguata valutazione dell'impatto della miniera sui ghiacciai andini. È stato inoltre dichiarato che i pozzi di esplorazione hanno compromesso la filtrazione delle acque sotterranee, causando l'inquinamento dei fiumi locali.

Il contesto del sito di Pascua-Lama dimostra come ci sia una maggior propensione ad attivarsi per la conservazione dei ghiacciai e il riconoscimento del loro valore, il che ha portato ad ottenere la protezione legale dei ghiacciai della zona. Il progetto ha incoraggiato un'ampia discussione sull'attività mineraria e sui suoi potenziali effetti sui ghiacciai.

5.4 Energia idroelettrica nelle aree montane

La produzione di energia idroelettrica è una delle principali attività industriali che si praticano nelle aree montane (WWAP, 2014). Lo sviluppo di questo settore è iniziato alla fine del XIX secolo in Europa e in America settentrionale, dove ha poi subito un rallentamento fino agli anni '70, a causa della crescente resistenza dei movimenti ambientalisti e della carenza di siti adatti. Nel resto del mondo, lo sviluppo dell'energia idroelettrica è ripreso dopo la Seconda guerra mondiale e continua a essere notevole. Gli impianti idroelettrici possono essere di capacità grande (più di 100 megawatt), media (fra 15 e 100 megawatt) e piccola (meno di 15 megawatt).

Un classico esempio di sviluppo significativo del settore idroelettrico in aree montane è rappresentato dalla diga, dal bacino e dalla centrale idroelettrica di Nurek, in Asia centrale. Situato lungo il fiume Vakhsh, in Tagikistan, l'impianto fa parte di un complesso che comprende la centrale idroelettrica di Rogun, attualmente in costruzione (Rahimzoda, 2024). Nurek è stata coinvolta in un programma di sviluppo integrato concepito negli anni '60, quando l'area faceva parte dell'ex Unione Sovietica. Scopo di tale programma era generare elettricità per lo sviluppo industriale e per potenziare l'agricoltura di montagna attraverso l'irrigazione a pompaggio, regolando al contempo i sistemi irrigui nelle zone pianeggianti e il controllo delle inondazioni in Tagikistan e nei paesi a valle (Kalinovsky, 2021).

Dopo aver generato la maggior parte dell'elettricità prodotta nel paese per quattro decenni, Nurek è in fase di ammodernamento per ottimizzare la propria funzionalità. Tuttavia, il serbatoio si sta progressivamente riducendo a causa dell'insabbiamento, perdendo così la sua capacità di regolare l'acqua e generare energia. Il completamento di altri progetti lungo la cascata del Vakhsh, in particolare quello che riguarda la centrale idroelettrica di Rogun, contribuirà a risolvere tale problema. Il finanziamento richiesto è enorme per l'economia del paese, così come gli impatti sociali e ambientali, che sono stati valutati in collaborazione con i paesi vicini (Banca mondiale, 2014).

La produzione di energia idroelettrica è una delle principali attività industriali che si praticano nelle aree montane

Esistono anche molti esempi di impianti idroelettrici di medie e piccole dimensioni nelle aree montane, compresa la tipologia ad acqua fluente (*run-of-the-river*). La presenza di un pendio permette di generare energia idroelettrica senza costruire grandi dighe e serbatoi. Un'adeguata progettazione e ubicazione delle piccole centrali idroelettriche di solito riduce l'impatto della produzione di energia sulle risorse idriche, sulla biodiversità e sul paesaggio. Tuttavia, ad altezze elevate le piccole centrali idroelettriche spesso non sono operative nei periodi freddi a causa del gelo e della mancanza di precipitazioni (Katsoulakos e Kaliampakos, 2014).

Lo sviluppo non regolamentato e mal pianificato di centrali idroelettriche di piccole dimensioni può avere un impatto negativo sulle risorse idriche. Ad esempio, in Georgia alcuni fiumi si sono prosciugati a causa del numero eccessivo di piccole centrali idroelettriche (Japoshvili et al., 2021). Nel 2018 la Convenzione delle Alpi, un accordo sull'ambiente stipulato a livello regionale, ha istituito delle linee guida specifiche riguardo all'utilizzo di piccole centrali idroelettriche (Piattaforma gestione dell'acqua nello spazio alpino, 2018).

Gli impianti idroelettrici nelle aree montane possono quindi essere troppo grandi per il contesto, ma anche troppo piccoli per essere efficaci. La loro progettazione è dunque estremamente rilevante. Per guidarne lo sviluppo sono indispensabili importanti pianificazioni, che tengano conto delle specificità delle aree montane, compresi gli effetti a cascata. Ad esempio, possono essere necessari un piano di gestione dei bacini idrografici, una valutazione ambientale strategica, una politica energetica nazionale, una valutazione dei rischi legati ai cambiamenti climatici e una valutazione dell'impatto ambientale e sociale (che non sempre viene condotta per i progetti più piccoli), oltre a un piano di gestione ambientale e sociale e a regole operative.

L'acqua di fusione dei ghiacciai e il deflusso delle precipitazioni possono scorrere lungo pendii ripidi su distanze relativamente brevi, rendendoli adatti alla generazione di energia. La forma delle valli montane si presta alla realizzazione di dighe. Anche i materiali da costruzione per i *coffer-dam*[14] e altre strutture rilevanti possono essere reperiti localmente nelle aree montane. Quando le sale macchine sono costruite all'interno delle montagne, turbine e altri componenti di impianti idroelettrici sono protetti da inondazioni, colate di fango e altri pericoli.

I serbatoi nelle aree montane possono immagazzinare grandi quantità d'acqua per generare energia idroelettrica quando è necessaria, riducendo così la dipendenza stagionale. Tale fonte di energia sta diventando sempre più importante con lo sviluppo delle rinnovabili, come il solare e l'eolico, la cui produzione è variabile e deve essere bilanciata rapidamente per garantire il funzionamento delle reti elettriche. Per questo motivo, i bacini idroelettrici fungono da deposito per le risorse idriche e per le energie rinnovabili (Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi, 2017). I bacini possono generare nuovi ecosistemi configurandosi come aree d'interesse in relazione alla biodiversità. Ad esempio, il lago Vlasina in Serbia è ora protetto dalla *Convenzione di Ramsar* sulle zone umide.

A livello globale, le aree montane tendono ad avere una minore densità di popolazione e minori entrate economiche rispetto alle pianure adiacenti (Thornton et al., 2022). Per questo motivo, lo sviluppo dell'energia idroelettrica può avere un impatto sociale ed economico minore a monte rispetto alle pianure. Inoltre, le comunità montane e chi ne è a capo solitamente dispongono di limitate risorse umane e finanziarie per opporsi a tali circostanze. Tuttavia, le aree montane non sono scollegate dalle altre regioni: abitanti delle alture, *élite* urbane e altri soggetti interessati, anche dall'altra parte del mondo, possono unire le proprie forze e proporre alternative per lo sviluppo di aree altrimenti destinate alla produzione di energia idroelettrica e a grandi progetti infrastrutturali (Perlik, 2019).

La protezione dell'ambiente è uno dei principali fattori di resistenza allo sviluppo del settore idroelettrico, poiché gli ecosistemi montani sono fragili

La protezione dell'ambiente è uno dei principali fattori di resistenza allo sviluppo del settore idroelettrico, poiché gli ecosistemi montani sono fragili. La costruzione e la presenza di dighe e serbatoi, linee di trasmissione e centraline possono avere un impatto significativo. Ad esempio, le dighe creano barriere alla biodiversità acquatica e gli ampi bacini ostacolano la migrazione dei grandi mammiferi, mentre i lavori di costruzione destabilizzano i letti dei fiumi, distruggono zone umide, modificano habitat, idrogeologia e clima locale, e disturbano la vita acquatica (WWAP, 2014).

I passaggi per pesci e altre tecniche utilizzate per mitigare o compensare i danni sono efficaci solo parzialmente (FAO/DVWK, 2002; Venus et al., 2020). Anche i progetti relativi agli alvei, come quelli sperimentati nei fiumi Loisach e Iller in Germania, possono contribuire a ridurre alcuni impatti ambientali; tuttavia, dipendono comunque dalla disponibilità di acqua (UNIDO/ICSHP, 2022). I sedimenti, che si solito sono presenti nelle acque di montagna, danneggiano anche i componenti e riempiono i serbatoi, riducendo così la durata della vita delle centrali idroelettriche: il lavaggio degli stessi sedimenti e altre tecniche aiutano a gestire questo problema. Le centrali idroelettriche possono anche essere costruite in successione lungo lo stesso fiume per contenere i loro impatti. L'approccio del nesso acqua-energia-cibo-ambiente può essere utile per affrontare questi problemi (Wymann von Dach e Fleiner, 2019).

I bacini idrici montani svolgono un ruolo importante nel contesto dell'adattamento ai cambiamenti climatici: immagazzinano l'acqua per utilizzarla in periodi di siccità e contengono le portate elevate dei fiumi, riducendo così la probabilità di inondazioni a valle (Presidenza francese della Convenzione delle Alpi, 2020; Adler et al., 2022). Possono

[14] Recinzioni temporanee a tenuta stagna per impedire l'infiltrazione dell'acqua.

rappresentare infrastrutture fondamentali per la riduzione del rischio di disastri, ma anche essere interessate da terremoti, frane, smottamenti, inondazioni e deterioramento strutturale. Un esempio ben noto è il disastro avvenuto nel 2021 nel distretto di Chamoli, nell'India settentrionale (Shugar et al., 2021), quando una valanga di roccia e ghiaccio ha causato un'inondazione di fango e detriti che ha distrutto due centrali idroelettriche in costruzione a valle, del valore di oltre 223 milioni di dollari. Nel 1963, sono state 1.917 le morti provocate da un evento simile sul torrente Vajont, nell'Italia settentrionale: la diga ha tracimato, inondando un'intera valle (Merlin, 2001). La cattiva gestione dei bacini montani può contribuire a causare incidenti, anche a livello transfrontaliero.

I cambiamenti climatici stanno influenzando la produzione di energia idroelettrica a causa di fattori quali la fusione dei ghiacciai, il cambiamento dei modelli di precipitazione e l'aumento dell'evaporazione. Non esistono dati su quanto la produzione di energia idroelettrica, sia quella attualmente in corso che quella pianificata, dipenda dallo scioglimento dei ghiacciai a livello globale. È quindi difficile valutare come il cambiamento della criosfera stia influenzando la generazione di energia idroelettrica e se questa situazione sia compensata positivamente o negativamente da altri fattori, come l'aumento delle precipitazioni e dell'evaporazione. Inoltre, non ci sono prove che il riscaldamento globale aumenti la quantità di acqua disponibile per l'energia idroelettrica; sembra che l'incremento della fusione dei ghiacciai sia controbilanciato da una maggiore evaporazione (Cooley, 2023). A livello mondiale, i satelliti rivelano una diffusa diminuzione della disponibilità di acqua nei laghi, compresi i bacini artificiali (Yao et al., 2023). Pertanto, il picco di fusione (vedere riquadro 2.2) potrebbe essere già stato raggiunto a livello globale, soprattutto nel caso delle centrali idroelettriche con grandi serbatoi situati a latitudini e altitudini inferiori, dove l'evaporazione è maggiore.

5.5 Risposte per uno sviluppo industriale inclusivo e sostenibile

Esistono soluzioni, alcune delle quali attualmente in elaborazione, volte a rendere più sostenibile la produzione dei settori industriale ed energetico nelle aree montane. Queste strategie di risposta possono essere suddivise in tre gruppi: quelle volte alla promozione di un'economia circolare dell'acqua, quelle finalizzate allo sviluppo di tecnologie ecocompatibili (nonché all'aumento degli investimenti ambientali, sociali e di governance) e quelle relative alla gestione dell'acqua.

L'economia circolare promuove la riduzione dell'uso dell'acqua, il riciclo dell'acqua utilizzata e il riutilizzo delle risorse idriche (WBCSD, 2017; Delgado et al., 2021). Ad esempio, ad Arequipa, in Perù, un'azienda mineraria sita in una zona montuosa ha affrontato le questioni legate al proprio fabbisogno idrico e ai problemi relativi alle acque reflue della città istituendo un partenariato pubblico-privato con l'ente idrico locale. L'azienda mineraria ha finanziato e costruito un impianto di trattamento che depura il 95% delle acque reflue della città, utilizzandone una parte per le operazioni di estrazione e rilasciando acqua pulita nel fiume locale. Questa soluzione ha permesso di potenziare la miniera, ha fatto risparmiare alla città oltre 335 milioni di dollari e ha rivitalizzato il fiume, a beneficio degli agricoltori e dei residenti locali (Banca mondiale, 2019).

Le centrali idroelettriche di pompaggio (PSH nell'acronimo inglese) utilizzano l'elettricità in eccesso generata al di fuori delle ore di massimo consumo per pompare l'acqua in un serbatoio, consentendo così di immagazzinare acqua e potenzialmente energia. Le PSH concentrano il 95% della capacità di stoccaggio di elettricità a livello mondiale, soprattutto nelle aree montane (IRENA, 2023). L'acqua immagazzinata viene rilasciata per generare elettricità nei periodi in cui la domanda è più alta. Anche se le PSH consumano più energia di quella che generano e trattengono a monte l'acqua che potrebbe essere persa per evaporazione, la loro capacità di accumulare acqua ed energia e di bilanciare il carico è preziosa per la stabilità della rete elettrica. Ad esempio, la centrale di Fengning, in Cina, è il più grande impianto idroelettrico di pompaggio al mondo, con una capacità di 3.600 megawatt. La sua costruzione è iniziata nel 2013 ed è stata completata nel 2021, per un valore complessivo di 1,87 miliardi di dollari. La centrale funziona con due serbatoi: quello inferiore può contenere fino a 66,15 milioni di metri cubi di acqua e quello superiore 48,83 milioni. La centrale di Fengning è progettata per fornire 6.612 gigawattora di energia da accumulo all'anno (IRENA, 2020; Morales Pedraza, 2024).

Rendere "verdi" le infrastrutture "grigie" o sostituirle direttamente con infrastrutture verdi può essere la migliore tecnica disponibile per le aree montane

Le tecnologie ecocompatibili comprendono pratiche come l'uso di tecnologie meno inquinanti, una migliore gestione delle risorse e un riciclaggio efficiente dei rifiuti. Tali tecnologie possono formare sistemi integrati che combinano conoscenze tecniche, procedure operative e strutture organizzative volte a promuovere la sostenibilità. Inoltre, rappresentano alternative più ecologiche ai metodi convenzionali, compresi gli sforzi per ridurre il consumo di acqua ed energia nella produzione di neve artificiale (Grünewald e Wolfsperger, 2019). Le aziende stanno migliorando la tecnologia delle valvole per aumentare l'efficienza nell'uso dell'acqua e utilizzano compressori *oil-free* per garantire che il petrolio non si disperda nell'ambiente. Inoltre, i dati possono essere sfruttati per produrre la giusta quantità e qualità di neve, riducendo così lo spreco di risorse. Un co-beneficio in questo senso è rappresentato dalle opportunità di formazione e dalla creazione di consapevolezza sull'efficienza idrica ed energetica (TechnoAlpin, 2023).

Quando le infrastrutture industriali ed elettriche esistenti non soddisfano i moderni standard relativi alle tecnologie ecocompatibili, rendere "verdi" le infrastrutture "grigie" o sostituirle direttamente con infrastrutture verdi (WWAP/UN-Water, 2018), compreso il *rewilding*, può essere la migliore tecnica disponibile per le aree montane.

La gestione dell'acqua, gli investimenti nei settori ambientale, sociale e di governance, la ricerca e lo sviluppo, nonché la supervisione normativa, sono elementi fondamentali nei casi in cui si conseguono risposte efficaci in materia di economia circolare, tecnologie ecocompatibili e di altro tipo (Kohler et al., 2012). Esistono pochi approcci incentratri sull'uso dell'acqua da parte dei settori industriale ed energetico nelle aree montane (Scott et al., 2023). I tentativi di istituire divieti specifici per le zone montane in relazione allo sviluppo di impianti idroelettrici, così come di altri tipi di infrastrutture, non sono riusciti a tradursi in strumenti giuridici vincolanti e politici forti, come nel caso del *Protocollo Energia* del 2005 della Convenzione delle Alpi, che fornisce solo indicazioni generiche (Austria/Comunità europea/Francia/Germania/Italia/Liechtenstein/Monaco/Slovenia/Svizzera, 2005; ARE, 2014). Date le specificità dell'uso dell'acqua da parte dei settori dell'industria e dell'energia nelle aree montane, in particolare in un contesto di scioglimento dei ghiacciai, la speranza è che questo esempio possa ispirare approcci più mirati in futuro (Katsoulakos e Kaliampakos, 2014).

Riferimenti bibliografici

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. e Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Amos-Landgraf, I. 2021. Chile's Pascua-Lama Mine Legally Shut Down, but Mining Exploration Continues. *State of the Planet*. New York, Columbia Climate School. https://news.climate.columbia.edu/2021/01/15/pascua-lama-mine-shut-down/.

ARE (Ufficio federale dello sviluppo territoriale, Svizzera). 2014. *Activity Report of the Energy Platform for the Years 2013–2014*. Berna, ARE.

Austria/Comunità europea/Francia/Germania/Italia/Liechtenstein/Monaco/Slovenia/Svizzera. 2005. Protocollo di attuazione della Convenzione delle Alpi del 1991 nell'ambito dell'energia (Protocollo Energia). *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, L 337 IT, 22 dicembre 2005. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2005:337:FULL.

Banca mondiale. 2014. *Rogun Hydropower Project: Final Report of the Environmental and Social Panel of Experts*. Washington DC, Banca mondiale. www.worldbank.org/en/country/tajikistan/brief/final-reports-related-to-the-proposed-rogun-hpp.

——. 2019. *Wastewater: From Waste to Resource – The Case of Arequipa, Peru*. Washington DC, Banca mondiale. https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/120995b1-dbbb-5e48-b6b8-afbabe6f312f/content.

Beard, D. B., Clason, C. C., Rangecroft, S., Poniecka, E., Ward, K. J. e Blake, W. H. 2022a. Anthropogenic contaminants in glacial environments I: Inputs and accumulation. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, vol. 46, N. 4, pagg. 630-648. doi.org/10.1177/03091333221107376.

——. 2022b. Anthropogenic contaminants in glacial environments II: Release and downstream consequences. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, vol. 46, N. 5, pagg. 790-808. doi.org/10.1177/03091333221127342.

Cabello, V., Willaarts, B. A., Aguilar, M. e Del Moral Ituarte, L. 2015. River basins as social-ecological systems: Linking levels of societal and ecosystem water metabolism in a semiarid watershed. *Ecology and Society*, vol. 20, N. 3, pag. 20. doi.org/10.5751/ES-07778-200320.

Chamanara, S. e Madani, K. 2023. *The Hidden Environmental Cost of Cryptocurrency: How Bitcoin Mining Impacts Climate, Water and Land*. Hamilton, Canada, United Nations University Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH). doi.org/10.53328/INR23ASC02.

Church, J. M. 2024. *Policy Brief "Central Asia's Trade in Virtual Water: SPECA Policy Brief on Sustainable Trade and Water Management"*. 2024 Economic Forum, Dushanbe, 26 novembre 2024. Programma speciale delle Nazioni Unite per le economie dell'Asia centrale (UNSPECA). https://unece.org/speca/documents/2024/11/working-documents/policy-brief-central-asias-trade-virtual-water-speca-0.

Collantes, F. 2009. Rural Europe reshaped: The economic transformation of upland regions, 1850–2000. *The Economic History Review*, vol. 62, N. 2, pagg. 306-323. doi.org/10.1111/j.1468-0289.2008.00439.x.

Connor, R. e Chaves Pacheco, S. M. 2024. *Global Employment Trends and the Water Dependency of Jobs*. Parigi, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO). https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388410.

Cooley, S. W. 2023. Global loss of lake water storage. *Science*, vol. 380, N. 6646, pag. 693. doi.org/10.1126/science.adi0992.

Delgado, A., Rodríguez, D. J., Amadei, C. A. e Makino, M. 2021. *Water in Circular Economy and Resilience (WICER)*. Washington DC, Banca internazionale per la ricostruzione e lo sviluppo/Banca mondiale. https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/36254/163924.pdf.

FAO/DVWK (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura/Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau). 2002. *Fish Passes: Design, Dimensions and Monitoring*. Roma, FAO/DVWK. www.fao.org/3/y4454e/y4454e.pdf.

FAO/OMT (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura/Organizzazione mondiale del turismo). 2023. *Understanding and Quantifying Mountain Tourism*. Roma/Madrid, FAO/OMT. doi.org/10.18111/9789284424023.

Füreder, L., Weingartner, R., Heinrich, K., Braun, V., Köck, G., Lanz, K. e Scheurer, T. (a cura di). 2018. *Alpine Water – Common Good or Source of Conflicts?* Atti del Forum Alpinum 2018 e della VII Conferenza sull'acqua. Breitenwang, Austria, 4-6 giugno 2018. Austrian Academy of Sciences Press. doi.org/10.1553/forumalpinum2018.

Grünewald, T. e Wolfsperger, F. 2019. Water losses during technical snow production: Results from field experiments. *Frontiers in Earth Science*, vol. 7, N. 78. doi.org/10.3389/feart.2019.00078.

Hamberger, S. e Doering, A. 2015. *Der gekaufte Winter: eine Bilanz der künstlichen Beschneiung in den Alpen* [L'inverno acquistato: una revisione della produzione di neve artificiale nel contesto delle Alpi]. Monaco di Baviera, Germania, Gesellschaft für ökologische Forschung (GöF)/Bund Naturschutz in Bayern (BN). www.vzsb.de/media/docs/Der_gekaufte_Winter_-_8.12.2015.pdf. (In tedesco.)

IPCC (Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico). 2019. *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009157964.

IRENA (Agenzia internazionale per le energie rinnovabili). 2020. *Innovation Landscape Brief: Innovative Operation of Pumped Hydropower Storage*. Abu Dhabi, IRENA. www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Innovative_PHS_operation_2020.pdf.

——. 2023. *The Changing Role of Hydropower: Challenges and Opportunities*. Abu Dhabi, IRENA. www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_Changing_role_of_hydropower_2023.pdf.

Japoshvili, B., Couto, T. B. A., Mumladze, L., Epitashvili, G., McClain, M. E., Jenkins, C. N. e Anderson, E. P. 2021. Hydropower development in the Republic of Georgia and implications for freshwater biodiversity conservation. *Biological Conservation*, vol. 263, N. 109359. doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109359.

Kalinovsky, A. M. 2021. *Laboratory of Socialist Development: Cold War Politics and Decolonization in Soviet Tajikistan*. Ithaca, Stati Uniti, Cornell University Press.

Katsoulakos, N. M. e Kaliampakos, D. C. 2014. What is the impact of altitude on energy demand? A step towards developing specialized energy policy for mountainous areas. *Energy Policy*, vol. 71, pagg. 130-138. doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.003.

Kohler, T., Pratt, J., Debarbieux, B., Balsiger, J., Rudaz, G. e Maselli, D. (a cura di). 2012. *Sustainable Mountain Development, Green Economy and Institutions: From Rio 1992 to Rio 2012 and Beyond*. Agenzia svizzera per lo sviluppo e la cooperazione (SDC)/ Centro per lo sviluppo e l'ambiente (CDE). www.fao.org/3/cc9690en/cc9690en.pdf.

Kronenberg, J. 2009. *Global Warming, Glaciers and Gold Mining.* Atti dell'VIII Conferenza internazionale della Società Europea per l'Economia Ecologica. Lubiana, 29 giugno-2 luglio 2009. https://center-hre.org/wp-content/uploads/2013/03/Kronenberg-Global-warming-Glaciers-and-Gold-Mining.pdf.

Machate, O., Schmeller, D. S., Schulze, T. e Brack, W. 2023. Review: Mountain lakes as freshwater resources at risk from chemical pollution. *Environmental Sciences Europe*, vol. 35, N. 3. doi.org/10.1186/s12302-022-00710-3.

Malo-Larrea, A., Santillán, V. e Torracchi-Carrasco, E. 2022. Looking inside the blackbox: Cuenca's water metabolism. *PLoS ONE*, vol. 17, N. 9, articolo e0273629. doi.org/10.1371/journal.pone.0273629.

Merlin, T. 2001. *Sulla pelle viva: come si costruisce una catastrofe, il caso del Vajont*. Sommacampagna, Italia, Cierre edizioni. https://edizioni.cierrenet.it/wp-content/uploads/2021/12/Sulla-pelle-viva_2021_anteprima.pdf.

Mishra, H. R. 2002. Mountains of the developing world: Pockets of poverty or pinnacles for prosperity. *Unasylva*, vol. 53, N. 1. www.fao.org/3/Y3549E/y3549e06.htm.

Modica, M. 2022. *Alpine Industrial Landscapes: Towards a New Approach for Brownfield Redevelopment in Mountain Regions*. Wiesbaden, Germania, Springer. doi.org/10.1007/978-3-658-37681-9.

Morales Pedraza, J. 2024. Toward a green economy in China: Current status and perspective in electricity generation. *Academia Green Energy*, vol. 1, N. 1, pagg. 1-28. doi.org/10.20935/AcadEnergy6236.

Mountain Partnership. 2014. *Why Mountains Matter for Energy: A Call for Action on the Sustainable Development Goals (SDGs)*. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO). https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd1802en.

Nordregio (Centro nordico per lo sviluppo territoriale). 2004. *Mountain Areas in Europe: Analysis of Mountain Areas in EU Member States, Acceding and other European Countries.* Studio per la Commissione europea, DG REGIO. Stoccolma, Nordregio. https://archive.nordregio.se/en/Publications/Publications-2004/Mountain-areas-in-Europe/index.html.

Orr, B. J., Dosdogru, F. e Sánchez Santiváñez, M. 2024. Chapter 3: Land degradation and drought in mountains. S. Schneiderbauer, P. Fontanella Pisa, J. F. Shroder e J. Szarzynski (a cura di), *Safeguarding Mountain Social-Ecological Systems*. Amsterdam, Elsevier, pagg. 17-22. doi.org/10.1016/B978-0-12-822095-5.00003-6.

Perlik, M. 2015. Mountains as global suppliers: New forms of disparities between mountain areas and metropolitan hubs. *Journal of Alpine Research*, vol. 103, N. 3. doi.org/10.4000/rga.3142.

——. 2019. *The Spatial and Economic Transformation of Mountain Regions: Landscapes as Commodities.* Londra, Regno Unito, Routledge. doi.org/10.4324/9781315768366.

Piattaforma gestione dell'acqua nello spazio alpino. 2018. *Linee guida comuni per l'uso del piccolo idroelettrico nella regione alpina.* Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia, Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. https://www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/AS/AS_FOCUS_1_IT.pdf.

Presidenza francese della Convenzione delle Alpi. 2020. *Water Resources and Alpine Rivers: Adaptation to the Challenges of Climate Change. Report of the Conference Organized in the Framework of the French Presidency of the Alpine Convention*. Impérial Palace, Annecy, Francia, 18-19 febbraio 2020. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia, Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Fotos/Banner/Topics/watermanagement/Report_water_conference_Annecy_EN.pdf.

Price, M. F., Gratzer, G., Alemayehu Duguma, L., Kohler, T., Maselli, D. e Romeo, R. (a cura di). 2011. *Mountain Forests in a Changing World: Realizing Values, Addressing Challenges*. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO)/Segretariato del Mountain Partnership/Agenzia svizzera per lo sviluppo e la cooperazione (SDC). www.fao.org/3/i2481e/i2481e.pdf.

Rahimzoda, S. 2024. Water–energy equation in Central and South Asia: A perspective from Tajikistan. Z. Adeel e B. Boër (a cura di), *The Water, Energy, and Food Security Nexus in Asia and the Pacific – Central and South Asia*. Cham, Svizzera, Springer. doi.org/10.1007/978-3-031-29035-0_4.

Schyns, J. F. e Vanham, D. 2019. The water footprint of wood for energy consumed in the European Union. *Water*, vol. 11, N. 2, pag. 206. doi.org/10.3390/w11020206.

Scott, C. A., Khaling, S., Shrestha, P. P., Sebastián Riera, F., Choden, K. e Singh, K. 2023. Renewable electricity production in mountain regions: Toward a people-centered energy transition agenda. *Mountain Research and Development*, vol. 43, N. 1, pagg. A1-A8. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-21-00062.

Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. 2009. *Water and Water Management Issues: Report on the State of the Alps.* Alpine Convention: Alpine Signals - Special Edition 2. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia, Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA2_long_EN.pdf.

——. 2017. *Towards Renewable Alps: A Progress Report for the Period 2015–2016*. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia, Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/Towards_Renewable_Alps_2017.pdf.

Shah, N. W., Baillie, B. R., Bishop, K., Ferraz, S., Högbom, L. e Nettles, J. 2022. The effects of forest management on water quality. *Forest Ecology and Management*, vol. 522, N. 120397. doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120397.

Shugar, D. H., Jacquemart, M., Shean, D., Bhushan, S., Upadhyay, K., Sattar, A., Schwanghart, W., McBride, S., Van Wyk de Vries, M., Mergili, M., Emmer, A., Deschamps-Berger, C., McDonnell, M., Bhambri, R., Allen, S., Berthier, E., Carrivick, J. L., Clague, J. J., Dokukin, M., Dunning, S. A., Frey, H., Gascoin, S., Haritashya, U. K., Huggel, C., Kääb, A., Kargel, J. S., Kavanaugh, J. L., Lacroix, P., Petley, D., Rupper, S., Azam, M. F., Cook, S. J., Dimri, A. P., Eriksson, M., Farinotti, D., Fiddes, J., Gnyawali, K. R., Harrison, S., Jha, M., Koppes, M., Kumar, A., Leinss, S., Majeed, U., Mal, S., Muhuri, A., Noetzli, J., Paul, F., Rashid, I., Sain, K., Steiner, J., Ugalde, F., Watson, C. S. e Westoby, M. J. 2021. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, vol. 373, N. 6552, pagg. 300-306. doi.org/10.1126/science.abh4455.

Sigl, M., Abram, N. J., Gabrieli, J., Jenk, T. M., Osmont, D. e Schwikowski, M. 2018. 19th century glacier retreat in the Alps preceded the emergence of industrial black carbon deposition on high-alpine glaciers. *The Cryosphere*, vol. 12, N. 10, pagg. 3311-3331. doi.org/10.5194/tc-12-3311-2018.

Smith López, C., Bogdan, A. M., Belcher, K. e Natcher, D. 2024. Advancing a WEF nexus security index for Alaska: An informed starting point for policy making. *Polar Geography*, vol. 47, N. 2, pagg. 71-89. doi.org/10.1080/1088937X.2024.2311785.

Talandier, M. e Donsimoni, M. 2022. Industrial metabolism and territorial development of the Maurienne Valley (France). *Regional Environmental Change*, vol. 22, N. 1, pag. 9. doi.org/10.1007/s10113-021-01845-4.

TechnoAlpin. 2023. *2023 Report di sostenibilità.* Bolzano, Italia, TechnoAlpin. www.technoalpin.com/fileadmin/user_upload/Nachhaltigkeit/Rapporto_sostenibilita_ITA.pdf.

Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Viviroli, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. e Adler, C. 2022. Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls. *PLoS ONE*, vol. 17, N. 7, articolo e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.

Tuihedur Rahman, H. M., Ingram, S. e Natcher, D. 2024. The cascading disaster risk of water, energy and food systems. *Environmental Hazards*, vol. 23, N. 5, pagg. 423-442. doi.org/10.1080/17477891.2024.2323105.

Unbehaun, W. e Pröbstl, U. 2006. Cloudy prospects in winter sport: How competitive are the Austrian winter sport destinations under conditions of climate change? *Sustainable Solutions for the Information Society.* XI Conferenza internazionale sulla pianificazione urbana e lo sviluppo spaziale per la società dell'informazione. Vienna, pagg. 381-387. https://programm.corp.at/cdrom2006/archiv/papers2006/CORP2006_UNBEHAUN.pdf.

UNECE (Commissione economica delle Nazioni Unite per l'Europa). 2014. *Safety Guidelines and Good Practices for Tailings Management Facilities.* Ginevra, UNECE. https://unece.org/DAM/env/documents/2014/TEIA/Publications/1326665_ECE_TMF_Publication.pdf.

——. 2016. *Checklist for Contingency Planning for Accidents Affecting Transboundary Waters – with Introductory Guidance.* Ginevra, UNECE. https://unece.org/DAM/env/documents/2016/TEIA/ece.cp.teia.34.e_Checklist_for_contingency.pdf.

UNECLAC (Commissione economica delle Nazioni Unite per l'America Latina e i Caraibi). 2023. *Lithium Extraction and Industrialization: Opportunities and Challenges for Latin America and the Caribbean.* Santiago, UNECLAC. https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/8d505030-7686-44e1-9f60-77ceb0610826/content.

UNEP (Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente). 2012. *A Practical Guide: Reducing Mercury Use in Artisanal and Small-Scale Gold Mining.* Nairobi, UNEP. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11524/reducing_mercury_artisanal_gold_mining.pdf.

——. 2024. *Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend – Pathways to a Liveable Planet as Resource Use Spikes. Global Resources Outlook 2024.* Nairobi, International Resource Panel, UNEP. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44901.

UNIDO (Organizzazione delle Nazioni Unite per lo sviluppo industriale). 2017. *Green Chemistry and Beyond Manufacturing Without POPs.* Vienna, UNIDO. www.unido.org/sites/default/files/2017-07/UNIDO_leaflet_08_ManufacturingWithoutPOPs_170124_final_0.pdf.

UNIDO/ICSHP (Organizzazione delle Nazioni Unite per lo sviluppo industriale/International Centre on Small Hydro Power). 2022. *World Small Hydropower Development Report 2022.* Vienna/Hangzhou, Cina, UNIDO/ICSHP. www.unido.org/WSHPDR2022.

UNSD (Divisione statistica delle Nazioni Unite). s.d. UN Data: A World of Information. Sito web dell'UNSD. https://data.un.org/.

Venus, T. E., Smialek, N., Pander, J., Harby, A. e Geist, J. 2020. Evaluating cost trade-offs between hydropower and fish passage mitigation. *Sustainability*, vol. 12, N. 20, pag. 8520. doi.org/10.3390/su12208520.

WBCSD (Consiglio mondiale delle imprese per lo sviluppo sostenibile). 2017. *Business Guide to Circular Water Management: Spotlight on Reduce, Reuse and Recycle.* Ginevra, WBCSD. https://docs.wbcsd.org/2017/06/WBCSD_Business_Guide_Circular_Water_Management.pdf.

Wright, I. A., Wright, S., Graham, K. e Burgin, S. 2011. Environmental protection and management: A water pollution case study within the Greater Blue Mountains World Heritage area, Australia. *Land Use Policy*, vol. 28, N. 1, pagg. 353-360. doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.07.002.

WWAP (Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche delle Nazioni Unite). 2014. *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy.* Parigi, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO). https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000225741.

WWAP/UN-Water (Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche delle Nazioni Unite/UN-Water). 2018. *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water.* Parigi, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO). https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424.

Wymann von Dach, S. e Fleiner, R. 2019. *Shaping the Water–Energy–Food Nexus for Resilient Mountain Livelihoods.* Issue Brief on Sustainable Mountain Development. Berna, Centro per lo sviluppo e l'ambiente (CDE). doi.org/10.7892/boris.131606.

Yao, F., Livneh, B., Rajagopalan, B., Wang, J., Crétaux, J. F., Wada, Y. e Berge-Nguyen, M. 2023. Satellites reveal widespread decline in global lake water storage. *Science*, vol. 380, N. 6646, pagg. 743-749. doi.org/10.1126/science.abo2812.

Zoï Environment Network. 2013. *A Short Introduction to Environmental Remediation for Mining Legacies: Case Studies from ENVSEC Work in South East Europe.* Ginevra, Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP)/Iniziativa per l'ambiente e la sicurezza (ENVSEC). https://zoinet.org/wp-content/uploads/2017/10/Mining-SEE-Ebook-.pdf.

Zou, L., Tian, F., Liang, T., Eklundh, L., Tong, X., Tagesson, T., Dou, Y., He, T., Liang, S. e Fensholt, R. 2023. Assessing the upper elevational limits of vegetation growth in global high-mountains. *Remote Sensing of Environment*, vol. 286, N. 113423. doi.org/10.1016/j.rse.2022.113423.

Capitolo 6

Ambiente

UNESCO WWAP
David Coates e Richard Connor
Con il contributo di Elisabeth Bernhardt e Ansgar Fallendorf (UNEP),
Birguy Lamizana Diallo (UNCCD)

Spesso le montagne presentano una biodiversità endemica maggiore rispetto alle pianure, con una notevole varietà genetica di colture agricole e di animali

Le montagne sono caratterizzate da un'ampia gamma di zone ecologiche differenti; ciascuna di queste è il risultato di una combinazione specifica di fattori quali l'altitudine, la geomorfologia, il livello di isolamento e le condizioni microclimatiche (ad esempio l'esposizione al sole). Di conseguenza, spesso le montagne presentano una biodiversità endemica maggiore rispetto alle pianure, con una notevole varietà genetica di colture agricole e di animali (FAO, 2019). Inoltre, presentano una gamma di culture umane altrettanto ampia (UNEP/GRID-Arendal, 2022). I sistemi montani sono generalmente caratterizzati da temperature più basse e livelli di precipitazioni più elevati rispetto ad altri contesti (FAO, 2022) e ospitano 25 delle 34 zone di interesse relative alla biodiversità mondiale (FAO/UNEP, 2023).

Negli ecosistemi montani, le foreste coprono circa il 40% della superficie. A quote più elevate, le foreste lasciano il posto a praterie e tundra alpina, così come al permafrost e ai ghiacciai. I suoli di montagna si sviluppano in condizioni climatiche rigide. Si differenziano notevolmente dai terreni di pianura, in quanto sono meno profondi e più vulnerabili all'erosione (Repe et al., 2020). Questi terreni sono soggetti al deterioramento con frequenza e facilità a causa delle attività umane, in particolare della rimozione della vegetazione, che lascia il suolo scoperto. Il recupero dei suoli degradati e dei relativi ecosistemi ad alta quota è lento.

La catena montuosa dell'Hindu Kush Himalaya è il più vasto e più alto ecosistema alpino del mondo, con un'altitudine media di 4.000 metri sul livello del mare. Copre un'area di oltre cinque milioni di chilometri quadrati ed è il più grande deposito di neve e ghiaccio, se si escludono l'Artide e l'Antartide: conta circa 100.000 chilometri quadrati di ghiacciai che forniscono acqua dolce a più di 12.000 laghi e a più di 10 sistemi fluviali (UNEP, 2022a). Il 60% di questa regione presenta una criosfera stagionale costituita da neve, ghiacciai, permafrost e laghi glaciali (ICIMOD, 2023). Altri esempi di ecosistemi unici sono costituiti dai parami delle Ande sudamericane (riquadro 6.1), dalla catena montuosa dei Carpazi, dall'immensa Antartide e dal passaggio dalla rigogliosa foresta pluviale ai prati alpini e alle cime innevate del Monte Kilimangiaro in Africa.

6.1 Servizi ecosistemici della criosfera montana

Le criosfere montane e gli ecosistemi degli altipiani forniscono servizi essenziali a chi vive in montagna e ai miliardi di persone che risiedono nelle aree di pianura circostanti (figura 6.1a). Sono servizi che contribuiscono al conseguimento degli Obiettivi di sviluppo sostenibile (figura 6.1b). La regolazione dell'acqua (compreso il suo stoccaggio e la regolazione delle inondazioni) è uno dei servizi più importanti: si stima, ad esempio, che l'agricoltura irrigua a livello globale dipenda per due terzi dal contributo del deflusso proveniente dalle montagne (Adler et al., 2022; vedere capitolo 3). Altri servizi ecosistemici chiave includono la riduzione del rischio di erosione e frane, la diminuzione delle temperature locali, il sequestro del carbonio e la fornitura di cibo e fibre, oltre alla conservazione dei *pool* genetici di colture e bestiame adattati alle condizioni locali (FAO/UNEP, 2023).

I terreni montani con permafrost contengono circa 66 petagrammi di carbonio organico nel suolo, pari al 4,5% delle riserve globali (FAO, 2022). Le torbiere di alta quota sono depositi di carbonio particolarmente importanti a livello globale (UNEP, 2022b). Anche le grandi catene montuose, come le Ande, il Gran Caucaso e l'Hindu Kush Himalaya, svolgono un ruolo rilevante in termini di regolazione del clima.

L'agricoltura, insieme all'allevamento, alla produzione di legname e allo sfruttamento di altre risorse forestali, è spesso un pilastro della sussistenza locale. La pesca ad alta quota, basata su specie ittiche adattate, può essere un'importante ma spesso trascurata fonte di sostentamento e di sicurezza alimentare e nutrizionale a livello locale (FAO, 2003). Tuttavia, c'è da considerare che i cambiamenti climatici stanno alterando gli ambienti di pesca nelle zone dei laghi glaciali (Tingley III et al., 2019).

Riquadro 6.1 I parami: un ecosistema montano unico in America meridionale

I parami sono distribuiti lungo la catena montuosa neotropicale delle Ande in Colombia, Ecuador, Perù settentrionale e Repubblica Bolivariana del Venezuela. Costituiscono uno degli ecosistemi di alta quota più ricchi di biodiversità e sono fondamentali per la sopravvivenza di milioni di persone: costituiscono infatti la principale fonte di acqua pulita per capitali come Bogotà e Quito.

La vegetazione svolge un ruolo importante nel regolare la quantità e la qualità dell'acqua fornita da queste "spugne" andine. Oltre a favorire l'infiltrazione dell'acqua nel suolo, la copertura vegetale ne riduce l'evaporazione rispetto al terreno nudo. Le piante possono anche catturare l'acqua dalla nebbia.

I parami sono stati anche fonte di piante officinali, pascoli e terreni agricoli per le popolazioni indigene. Tuttavia, i paesaggi stanno cambiando e la loro funzionalità si sta riducendo.

Le lagune di Siecha, paramo di Chingaza, Colombia

Foto: © Matthieu Cattin/Shutterstock*.

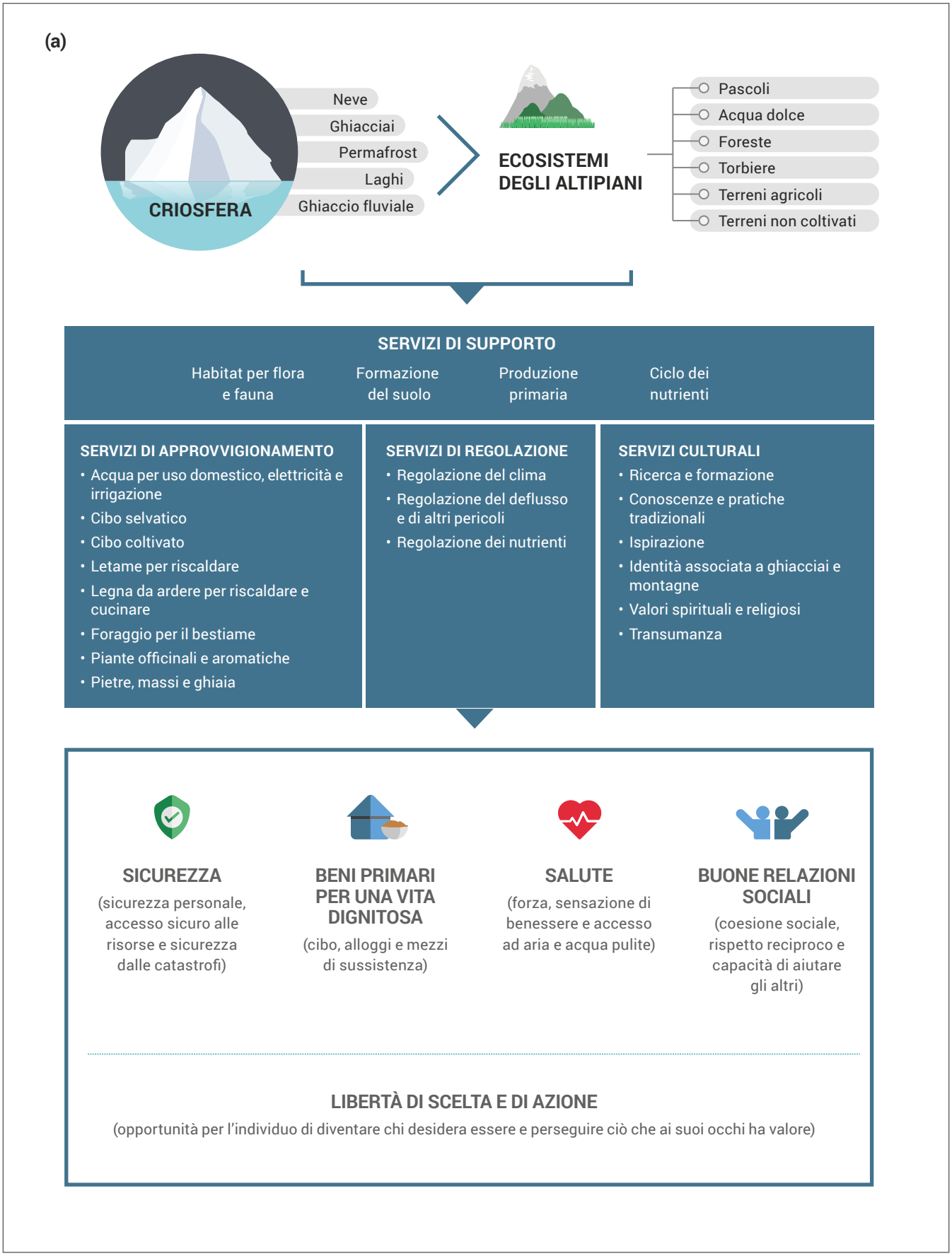
Fonte: Baruffol (2020).

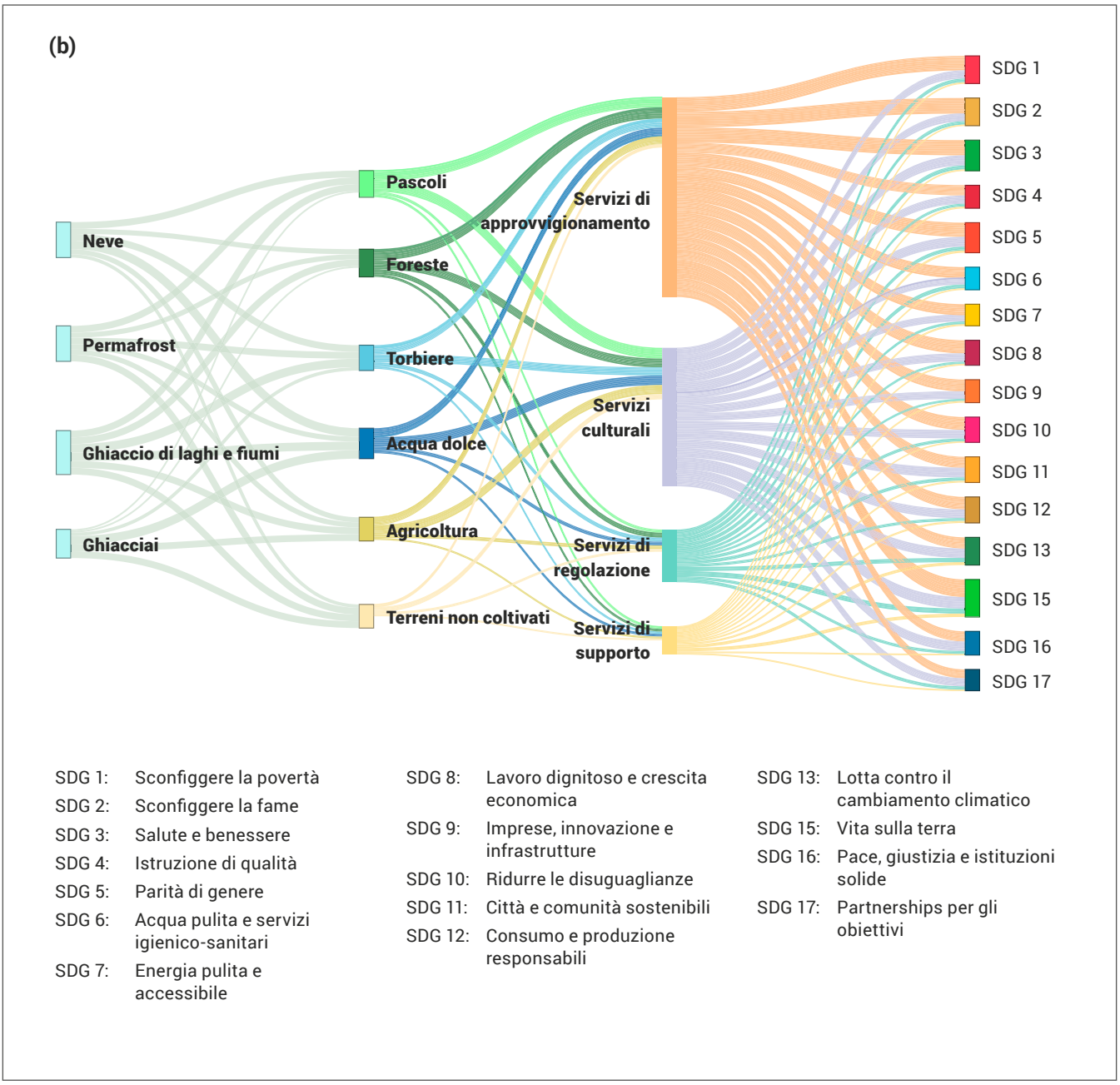
6.2 Tendenze dei servizi ecosistemici della criosfera e della montagna

Le regioni di tutto il mondo si trovano nella condizione di dover affrontare i profondi impatti causati dai cambiamenti climatici e dalle attività umane incontrollate, come deforestazione, agricoltura intensiva, costruzione di infrastrutture e altre pratiche inquinanti. Nelle aree montane, questi fenomeni possono causare perdite irreversibili di biodiversità e servizi ecosistemici (FAO/UNEP, 2023). Nel 2020, il 57% delle aree montane a livello globale era sottoposto a una forte pressione, nonché interessato da un degrado degli ecosistemi concentrato alle quote più basse, dove si svolge la maggior parte delle attività umane (Elsen et al., 2020). Ad esempio, l'aumento dell'urbanizzazione e delle attività minerarie ha degradato diversi ecosistemi montani (Jiang et al., 2021). Altro aspetto critico riguarda l'installazione di impianti sciistici, che prevede un'ampia opera di rimozione di flora e sottrazione di terreni alla natura, con conseguenti ripercussioni sulla vegetazione autoctona e sulle proprietà strutturali dei suoli (Pintaldi et al., 2017). Opere di ingegneria idraulica mal progettate o mal gestite, come la canalizzazione dei fiumi, possono provocare l'erosione delle sponde e la dispersione dei sedimenti, che influiscono sulla qualità dell'acqua e sull'ecologia degli ecosistemi acquatici (Mikuś et al., 2021).

Nelle aree glaciali e di alta montagna si registra una tendenza all'aumento della frequenza e dell'intensità dei pericoli naturali (vedere capitolo 2). Tuttavia, non tutte le minacce che interessano le aree montane sono dovute ai cambiamenti climatici: il degrado degli ecosistemi si presenta come causa o fattore che innesca o amplifica l'impatto di molte di esse. Ad esempio, una deforestazione su larga scala e una cattiva pianificazione urbana hanno aggravato le conseguenze di una devastante frana a Freetown, in Sierra Leone, che nel 2017 ha causato la morte di oltre 1.000 persone (Kargel et al., 2021).

Figura 6.1 Servizi ecosistemici forniti dalla criosfera montana e dagli ecosistemi degli altipiani (a) e collegamenti tra questi e gli Obiettivi di sviluppo sostenibile (b)





Fonte: Chaudhary et al. (2023, figg. 4.2 e 4.3, pagg. 132-134).

Le variazioni idrologiche determineranno il mutamento della maggior parte degli ecosistemi montani, più degli impatti diretti delle variazioni di temperatura. Si prevede che tali alterazioni dell'idrologia determineranno un aumento a breve e medio termine del deflusso stagionale, a causa del riscaldamento della criosfera montana. In un arco di tempo più lungo, comporteranno una riduzione del deflusso: ciò è dovuto alla diminuzione del volume d'acqua immagazzinato dalle montagne, con alterazioni nell'apporto idrico annuale complessivo causate però dalle variazioni delle precipitazioni (Adler et al., 2022). Ad esempio, nella Cordigliera Real boliviana, dove la superficie occupata dalle zone umide è aumentata nel periodo 1984-2011 a causa dell'incremento degli eventi estremi legati alle precipitazioni e allo scioglimento dei ghiacciai, è probabile che tale tendenza si inverta se, come previsto, in futuro diminuiranno le precipitazioni totali e il deflusso dei ghiacciai (Dangles et al., 2017). Nelle Greater Kinggan Mountains, situate nella Cina nordorientale, si prevede che circa il 30% dell'area umida scomparirà entro il 2050; un

valore che raddoppierà entro il 2100 secondo uno scenario alternativo in materia di cambiamenti climatici (Wang et al., 2022). Nelle Ande neotropicali, le previsioni indicano che le dimensioni dell'ecosistema paramo (riquadro 6.1) diminuiranno del 30% entro il 2050, senza considerare il processo di distruzione dovuto al cambiamento dell'uso dei terreni (Alfthan et al., 2018).

I cambiamenti climatici comportano notevoli cicli di retroazione. Poiché i terreni ad alta quota e ad alta latitudine sono soggetti a temperature più calde dell'aria, e il permafrost è più esposto a causa del ritiro dei ghiacciai, l'ispessimento dello strato attivo durante il disgelo porta a forti emissioni di carbonio. Se non verranno rapidamente ricoperti da una nuova vegetazione, i terreni nudi saranno interessati da un incremento dell'erosione e delle frane (FAO, 2022). Due differenti scenari relativi ai cambiamenti climatici prevedono che l'area di permafrost vicino alla superficie potrebbe diminuire fino al 66% o al 99% entro il 2100. In base alle previsioni, a causa di questo fenomeno verranno rilasciate nell'atmosfera fino a 240 miliardi di tonnellate di carbonio sotto forma di anidride carbonica e metano in grado di accelerare significativamente i cambiamenti climatici (Meredith et al., 2019).

Le variazioni idrologiche determineranno il mutamento della maggior parte degli ecosistemi montani, più degli impatti diretti delle variazioni di temperatura

L'aumento delle temperature nelle zone montane e l'arretramento della criosfera, determinando lo sviluppo di vegetazione ad altitudini più elevate, fanno sì che le comunità ecologiche e le varie specie tendano a spostarsi ad alta quota. Questa tendenza può avere impatti positivi e negativi. «Il riscaldamento aumenta la produttività primaria netta e l'assorbimento di carbonio della vegetazione della tundra e delle Alpi, oltre ad aumentare la respirazione, il che può comportare un cambiamento significativo nel ciclo del carbonio terrestre e nello stoccaggio del carbonio nel suolo» (UNEP, 2022a, pag. 17). L'aumento della copertura vegetale rafforza anche la capacità di ritenzione idrica del suolo, poiché lo strato attivo si ispessisce con il riscaldamento del permafrost e la copertura vegetale favorisce l'infiltrazione. Tuttavia, la desertificazione si sta espandendo in alcune regioni dove hanno origine i fiumi (ICIMOD, 2023). «L'avanzamento verso l'alto di specie non autoctone sta diventando sempre più comune negli ecosistemi montani, causando la soppressione [e in casi estremi l'estinzione] di specie autoctone e incidendo sulla fornitura di servizi ecosistemici» (FAO/UNEP, 2023, pag. 6).

Sebbene l'aumento della temperatura ad alta quota possa contribuire all'espansione delle aree agricole e di coltivazione, può essere difficile distinguere tra gli impatti dei cambiamenti climatici e le influenze umane dirette su questi ecosistemi. Ad esempio, alcune foreste della regione dell'Hindu Kush Himalaya sono state sottoposte a diverse fasi di disboscamento, conservazione e ripristino (ICIMOD, 2023). La forte diminuzione delle terre coltivate in alcune aree di tale regione è attribuita ai progetti di protezione delle praterie e all'urbanizzazione degli ultimi due decenni (Luan e Li, 2021).

Durante la stagione di scioglimento delle nevi, nei mesi primaverili ed estivi, sono stati riscontrati in tutto il mondo nevai rossi, noti come *glacier blood* o "neve cocomero", causati da fioriture di alghe rosse. Queste aree riducono l'albedo superficiale e aumentano l'assorbimento dell'energia solare, accelerando il processo di fusione dei ghiacci e della neve (Lutz et al., 2015). Le alghe della neve possono essere indicate come i principali riduttori di albedo sui manti nevosi umidi, divenendo il fattore dominante (Halbach et al., 2022). In America settentrionale, ad esempio, il 65% della superficie di singoli ghiacciai è stato interessato da fioriture durante la stagione di scioglimento; si stima che questo fenomeno abbia determinato in media fino a tre centimetri di acqua di fusione equivalente su tutta la superficie del ghiacciaio (Engstrom e Quarmby, 2023). Si presume che ciò influisca sulla qualità delle acque di deflusso, sebbene non siano stati condotti molti studi dettagliati in merito.

Le osservazioni e la modellazione indicano l'influenza del trasporto a lungo raggio dell'inquinamento atmosferico. Ad esempio, le carote di ghiaccio e i sedimenti lacustri

hanno mostrato un forte aumento del *black carbon* (vedere riquadro 2.1) e di metalli pesanti, come il mercurio, nella regione dell'Hindu Kush Himalaya a partire dagli anni '50, il che riflette l'incremento delle emissioni di inquinanti atmosferici che ha avuto luogo nell'Asia meridionale (UNEP, 2022a). Una volta depositato sulle superfici di neve e ghiaccio, il *black carbon* ne abbassa l'albedo, rendendole meno riflettenti e facendo sì che assorbano più luce, accelerando così il processo di fusione dei ghiacciai e l'aumento del tasso del loro ritiro (Kang et al., 2020). Ciò ridurrà i tempi di rilascio di inquinanti organici persistenti e metalli pesanti depositati nella criosfera.

In generale, i dati sulla qualità dell'acqua sono particolarmente scarsi per quanto riguarda i corpi idrici montani (Machate et al., 2023), nonostante nelle aree di montagna l'inquinamento sia diffuso, soprattutto a causa di attività agricole, urbane, minerarie e industriali (Elsen et al., 2020). Esistono dati affidabili solo per gli inquinanti organici persistenti: è sempre più evidente che anche i laghi montani più remoti sono esposti a un'ampia gamma di contaminanti, il che determina un alto rischio di tossicità cronica per la biodiversità acquatica di alta quota (UNEP, 2022a). Ad esempio, sulle montagne del Caucaso, i fiumi georgiani situati nell'area di drenaggio del bacino del Mar Caspio sono risultati inquinati da metalli pesanti, petrolio e pesticidi derivanti dall'attività di drenaggio di grandi imprese agricole e minerarie. L'inquinamento da metalli pesanti è segnalato anche nel fiume Baksan, che nasce nella regione del Monte Elbrus nel territorio della Federazione russa. Nel Caucaso settentrionale è stata inoltre individuata una maggiore concentrazione di pesticidi nelle acque sotterranee, che costituiscono una fonte di acque minerali (UNEP, 2024).

La biodiversità in alta montagna mostra tendenze contrastanti. A livello globale, è messa a dura prova con un tasso di estinzione di circa il 20%. Tuttavia, nella regione dell'Hindu Kush Himalaya, la percentuale è di circa il 9% per i vertebrati e del 5% per le piante (UNEP, 2022a). L'area è stata oggetto di diversi sforzi di conservazione, che hanno registrato l'aumento delle popolazioni di alcune specie (ad esempio, la gazzella di Przewalski e l'asino selvatico tibetano) e un'espansione delle aree protette (Fu et al., 2021). Tuttavia, negli ultimi decenni è cresciuta la preoccupazione per i principali fattori di vulnerabilità, come i cambiamenti climatici, la mancanza di approcci di conservazione a livello transfrontaliero e i grandi progetti infrastrutturali, nonché l'arrivo e la diffusione di specie esotiche invasive (ICIMOD, 2023).

6.3 Risposte

A livello ecosistemico, la maggior parte delle opzioni utili ad affrontare gli impatti dei cambiamenti che interessano la criosfera e le zone di alta montagna prevede la conservazione o il ripristino della funzionalità degli ecosistemi. Si potranno così mantenere o migliorare i servizi ecosistemici, su scala locale e regionale, attraverso soluzioni basate sulla natura o strategie di adattamento basate sugli ecosistemi. Le soluzioni basate sulla natura per l'acqua sono state il tema dell'edizione 2018 del *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche* (WWAP/UN-Water, 2018). Il ripristino degli ecosistemi si sta affermando come un'opzione sempre più diffusa nelle aree montane (FAO/UNEP, 2023).

Questi approcci vengono comunemente considerati come una componente di adattamento nel quadro dei contributi determinati a livello nazionale di molti paesi montani in tutto il mondo. Secondo una revisione sistematica di 928 progetti valutati a livello globale che prevedevano il ricorso a soluzioni basate sulla natura, il 37% è stato progettato per affrontare le inondazioni e il 28% la siccità (UNEP, 2021a). Una revisione globale di 93 progetti di questo tipo messi in atto in zone di montagna, come quelli che promuovono un'agricoltura intelligente dal punto di vista climatico, la protezione delle foreste esistenti, l'afforestazione e l'agroforestazione, ha confermato il potenziale delle soluzioni basate sulla natura nel favorire percorsi sostenibili (Palomo et al., 2021).

Laddove le componenti importanti dell'ecosistema siano ancora in condizioni relativamente buone, la risposta prioritaria è la loro conservazione

Laddove le componenti importanti dell'ecosistema siano ancora in condizioni relativamente buone, la risposta prioritaria è la loro conservazione. Molteplici benefici possono essere forniti alle popolazioni vulnerabili: il ripristino delle praterie mediante l'utilizzo di specie autoctone può aumentare la resilienza dei pendii, le opportunità di pascolo e il foraggio durante i periodi di siccità; la conservazione e la gestione delle risorse idriche attraverso approcci "grigio-verdi", tra cui il ripristino delle zone ripariali, possono ridurre le inondazioni e contribuire a mantenere la qualità dell'acqua; l'utilizzo di pratiche agroecologiche diversificate può migliorare la sicurezza alimentare e i mezzi di sussistenza (Swiderska et al., 2018).

Si è lavorato molto sulle funzioni protettive delle foreste di montagna. La ricerca di Teich et al. (2022) ha osservato che gli effetti di tale protezione differiscono notevolmente tra i vari paesi, così come la necessità di definizioni standardizzate e di una migliore comprensione e valutazione delle suddette funzioni. La sicurezza alimentare, l'aumento della resilienza e la mitigazione dei cambiamenti climatici sono ampiamente citati come risultati dell'agroforestazione (Gidey et al., 2020). Le strategie di adattamento basate sugli ecosistemi si sono dimostrate efficaci nelle regioni montane per ridurre i rischi di inondazioni e frane, migliorare la qualità dell'acqua e promuovere la conservazione della biodiversità (Lavorel et al., 2019). Tuttavia, fattori di disturbo ricorrenti possono aumentare i tempi di recupero e ridurre l'efficacia sia delle soluzioni basate sulla natura che delle strategie di adattamento basate sugli ecosistemi (Scheidl et al., 2020).

Per la criosfera e le aree montane, una strategia di risposta chiave è quella di mantenere o migliorare la salute e la stabilità dei suoli e i servizi ecosistemici che essi supportano, tutelandoli di fronte alle minacce del degrado causato dall'essere umano o dal riscaldamento globale. Conseguire la neutralità in termini di degrado del suolo è un obiettivo concordato a livello globale, particolarmente rilevante per le aree montane in considerazione della loro vulnerabilità (riquadro 6.2). Le strategie che mettono in atto soluzioni basate sulla natura spesso prevedono la conservazione, il ripristino o l'espansione di praterie a quote più elevate o di foreste al di sotto della linea degli alberi, che di solito producono molteplici benefici a livello locale e regionale (riquadro 6.3).

A livello regionale, gli approcci si concentrano spesso sulla gestione del territorio o del suolo. Ad esempio, il *Protocollo "difesa del suolo"* della Convenzione delle Alpi enfatizza il ruolo della salvaguardia e del ripristino del suolo, in particolare per quanto riguarda le azioni di recupero delle aree sciistiche (Repe et al., 2020). Tuttavia, l'utilizzo di specie arboree non autoctone, che di solito assorbono grandi quantità di acqua, può avere un impatto negativo sulle riserve idriche (Xiao et al., 2020). Ad esempio, l'imboschimento della regione montuosa di Chongqing e dell'altopiano di Yunnan-Guizhou, nella Cina sudoccidentale, ha comportato l'assorbimento di circa il 10% della fornitura idrica annuale, dando luogo nel 2015 ad episodi di scarsità idrica. Sebbene i cambiamenti nell'uso del suolo, tra cui l'imboschimento e il rimboschimento, abbiano comportato piccoli effetti inibitori sulla resa idrica in alcuni siti di pianura nella Cina nordorientale, essi hanno anche determinato considerevoli impatti positivi per quanto riguarda l'arresto dell'erosione del suolo (Wang et al., 2022). È necessario considerare anche le pratiche di gestione coinvolte. Ad esempio, la gestione delle foreste può influenzare in modo significativo «il trasporto di sedimenti, la perdita di nutrienti, il trasporto di carbonio, il rilascio di metalli e di cationi basici», oltre a «cambiamenti nell'acidità e nella temperatura» (Shah et al., 2022, pag. 1).

Riquadro 6.2 Approcci alla neutralità in termini di degrado del territorio in montagna

Un quadro di resilienza per la neutralità in termini di degrado del territorio applicato a livello nazionale aiuta a raggiungere l'Obiettivo di sviluppo sostenibile 15.3, ossia un mondo senza degrado del suolo entro il 2030. Applicabile a terreni di tutti i tipi, compresi quelli di montagna, il quadro utilizza un approccio olistico, inclusivo e basato sul paesaggio, regolato da garanzie sociali e ambientali per proteggere le persone e la natura. Incoraggia il perseguimento di strategie a lungo termine, integrate e positive per la natura, che si concentrino contemporaneamente sul miglioramento della produttività dei terreni e sulla riabilitazione, conservazione e gestione sostenibile della terra e delle risorse idriche, garantendo ecosistemi più sani e migliori mezzi di sussistenza per le comunità locali.

Per conseguire la neutralità in termini di degrado del territorio sono fondamentali una pianificazione integrata dell'uso del suolo e una gestione integrata del paesaggio per affrontare quei compromessi che inevitabilmente si vengono a creare quando un territorio deve soddisfare esigenze contrastanti, nonché per ottimizzare la combinazione degli interventi nello spazio.

Gli impatti positivi che si sono potuti osservare negli ecosistemi montani includono la riduzione della perdita di suolo, il miglioramento della produzione e del reddito a livello locale, una maggiore affidabilità dei flussi a valle in periodi di siccità e il controllo delle inondazioni in seguito a forti precipitazioni. A partire dal novembre 2024, 131 paesi firmatari della Convenzione delle Nazioni Unite per la lotta alla desertificazione hanno fissato obiettivi relativi alla neutralità in termini di degrado del territorio per prevenire la perdita di capitale naturale terrestre in futuro, attraverso l'aumento delle pratiche di gestione intelligente e ripristino del territorio. Il quadro di resilienza per la neutralità in termini di degrado del territorio offre anche un percorso appropriato e positivo per la natura alle nazioni che si impegnano a preservare regioni montane incontaminate.

Fonti: Critchley et al. (2021) e Orr et al. (2017; 2024).

Riquadro 6.3 Acción Andina: il ripristino del paesaggio forestale nelle Ande

Le montagne delle Ande ospitano ricchi ecosistemi forestali che assicurano il sostentamento della fauna selvatica e di centinaia di milioni di persone in tutta l'America meridionale. Forniscono acqua dolce che alimenta le sorgenti del Rio delle Amazzoni e i villaggi e le città vicine in modo diretto. Secoli di deforestazione hanno ridotto le foreste primarie delle Ande ad appena il 3-10% della loro estensione originaria, mentre i cambiamenti climatici hanno accelerato lo scioglimento dei ghiacciai. Coloro che sono più vulnerabili, ossia le popolazioni delle Ande e la loro cultura indigena unica, sono maggiormente colpiti.

Global Forest Generation e la Asociación Ecosistemas Andinos hanno lanciato Acción Andina nel 2018. L'iniziativa mira a proteggere e ripristinare un milione di ettari di ecosistemi essenziali di foresta primaria di Polylepis andina nei prossimi due decenni nei sette paesi andini (Argentina, Stato Plurinazionale della Bolivia, Cile, Colombia, Ecuador, Perù e Repubblica Bolivariana del Venezuela). Le conoscenze tradizionali e la tecnologia moderna sono entrambe usate per ripristinare le foreste, garantire l'approvvigionamento di acqua, proteggere i paesaggi e gli ecosistemi, la biodiversità e la cultura.

Sono stati piantati più di 6,5 milioni di alberi autoctoni su 3.359 ettari di foreste nelle Ande, mentre sono 11.253 gli ettari di foreste primarie in aree protette nuove o riqualificate. La maggiore resilienza al clima e la sicurezza idrica hanno migliorato gli habitat di specie autoctone come il condor andino e l'orso dagli occhiali.

Fonte: FAO/UNEP (2023).

Riquadro 6.4 Costruire la resilienza in montagna: ripristino di un bacino idrografico nelle montagne del Pamir in Afghanistan

Nella vulnerabile area di un bacino idrografico sulle montagne del Pamir in Afghanistan, è stata utilizzata una combinazione di interventi fisici su piccola scala e di ripristino agroforestale o forestale per proteggere le comunità locali da frane, valanghe e altri pericoli. Ciò ha anche aumentato la sicurezza idrica e migliorato i mezzi di sussistenza nell'area. Le comunità locali erano a capo degli interventi e della loro attuazione. Tra le specie arboree locali che sono state piantate vi sono alberi da frutto e da frutta secca che sono curati dalle donne del posto, che ne traggono beneficio per il loro sostentamento (UNEP, 2021b).

Terrazzamenti costruiti per stabilizzare i pendii e limitare l'erosione del suolo

Foto: © UNEP; fonte: UNEP (2021b, pag. 18).

Dighe di contenimento, argini e piantagioni di alberi per stabilizzare i pendii

Foto: © UNEP; fonte: UNEP (2021b, pag. 22).

Un'area boschiva ricavata da talee di alberi per proteggere i terreni in pendenza

Foto: © UNEP; fonte: UNEP (2021b, pag. 35).

È sempre più riconosciuta l'importanza del ruolo svolto dalle comunità locali e dalle loro conoscenze nell'identificazione dei bisogni e nell'attuazione delle soluzioni. Ad esempio, nei parami dell'Ecuador centrale gli sforzi della comunità si sono dimostrati molto più efficaci rispetto a un approccio alle aree protette guidato dal governo per migliorare l'approvvigionamento idrico delle popolazioni dei bacini più a valle (Torres et al., 2023).

Le soluzioni basate sulla natura, comprese le strategie di adattamento basate sugli ecosistemi, sono spesso combinate con interventi fisici su piccola scala volti a realizzare strutture "grigio-verdi" nelle aree montane. Ad esempio, il modellamento fisico dei terrazzamenti sui pendii delle colline (vedere sezione 3.1.2), perché possa ridurre l'erosione e gli smottamenti, viene comunemente combinato con la piantumazione di alberi per migliorare i benefici complessivi (riquadro 6.4). Queste soluzioni sono spesso accolte con entusiasmo dalle comunità locali. In alcuni casi, gli incentivi (finanziari o di altro tipo) sono determinanti per aumentare il coinvolgimento delle stesse comunità, fintanto che i risultati del processo di ripristino divengono tangibili e la sostenibilità finanziaria dei mezzi di sussistenza locali, attraverso la creazione di fonti di reddito aggiuntive, aumenta l'efficacia delle soluzioni basate sulla natura (FAO/UNEP, 2023).

Restano da affrontare le sfide più importanti; il Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna nella regione dell'Hindu Kush Himalaya ha individuato quelle che seguono (ICIMOD, 2023):

- le grandi variazioni che interessano gli ecosistemi e le colture, così come le comunità locali che dipendono fortemente dalle risorse naturali, richiedono strategie di risoluzione specifiche per le aree coinvolte; tali strategie dovrebbero prevedere il ricorso a soluzioni basate sulla natura che promuovano interventi mirati, incentrati sulla comprensione dell'ecosistema;
- è necessario rafforzare le conoscenze scientifiche sugli ecosistemi montani per favorire una migliore comprensione delle complesse interconnessioni che sussistono tra cambiamenti climatici, criosfera, ecosistemi e società; la conservazione del patrimonio comune richiede una cooperazione su scala regionale;
- mancanza di finanziamenti e lacune nelle politiche;
- scarsa attività di condivisione e di sviluppo di migliori pratiche;
- monitoraggio e dati insufficienti.

È sempre più riconosciuta l'importanza del ruolo svolto dalle comunità locali e dalle loro conoscenze nell'identificazione dei bisogni e nell'attuazione delle soluzioni

Nello specifico, le lacune di conoscenza che richiedono una particolare attenzione includono: la limitata comprensione delle intereconnessioni a livello genetico, di specie e di ecosistema, nonché dell'impatto dei cambiamenti climatici su tale aspetto; le interazioni tra permafrost, pascoli, zone umide e torbiere; i rischi determinati dal clima e i loro impatti a cascata sull'estinzione delle specie e sulla riduzione della sua distribuzione (ICIMOD, 2023).

Per evitare futuri rischi ambientali derivanti da tali fattori, sono necessarie strategie affidabili di pianificazione a lungo termine per i siti industriali e contaminati che tengano conto degli impatti dei cambiamenti climatici (Langer et al., 2023). La necessità di mettere maggiormente in evidenza l'importanza della pesca d'alta quota e di incorporarla nelle politiche, nella gestione e negli investimenti è riconosciuta da decenni (FAO, 2003).

Le opzioni di risposta sono vincolate al contesto e al sito, spesso sono accomunate da fattori chiave come il sostegno della comunità e la capacità di offrire co-benefici, mentre in certi casi non vengono messe in pratica in relazione ai cambiamenti climatici o al ripristino degli ecosistemi, e non sono molto in linea con le politiche nazionali o regionali da attuare (UNEP/GRID-Arendal, 2022).

I seguenti fattori chiave sono stati identificati come importanti per il ripristino degli ecosistemi montani: il coinvolgimento e la responsabilizzazione delle popolazioni locali; l'adozione di approcci che rispondano alle esigenze di genere e siano socialmente inclusivi; l'esplorazione della fattibilità delle strategie e la mobilitazione degli *stakeholder*; la comprensione del contesto dell'ecosistema e dei mezzi di sussistenza; l'analisi dei rischi climatici e dei fattori di vulnerabilità; la comprensione del ruolo dei servizi ecosistemici nel contesto dell'adattamento; lo sviluppo di soluzioni basate sulla natura o di strategie di adattamento basate sugli ecosistemi e, di conseguenza, la progettazione di interventi in questo senso; il monitoraggio e la valutazione per l'apprendimento; l'integrazione delle suddette soluzioni e strategie e la promozione delle sinergie (Swiderska et al., 2018).

«Il forte sostegno dei governi, della società civile e del settore privato è essenziale per garantire e aumentare investimenti adeguati a favore della natura, per armonizzare le agende politiche e gli interventi per le montagne, per rafforzare il coordinamento a livello regionale e per attuare il *Global framework for the Five Years of Action for the Development of Mountain Regions*» (FAO/UNEP, 2023, pag. 47).

Riferimenti bibliografici

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. e Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Alfthan, B., Gjerdi, H. L., Puikkonen, L., Andresen, M., Semernya, L., Schoolmeester, T. e Jurek, M. 2018. *Mountain Adaptation Outlook Series: Synthesis Report*. Nairobi/Vienna/Arendal, Norvegia, Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP)/GRID-Arendal. https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/412/original/SynthesisReport_screen.pdf?1544437610.

Baruffol, M. 2020. Andean 'Water Sponges': The Role of Plants in Water Supply. Sito web del Royal Botanic Gardens Kew. www.kew.org/read-and-watch/paramos-andean-water-sponges.

Chaudhary, S., Chettri, N., Adhikari, B., Dan, Z., Gaire, N. P., Shrestha, F. e Wang, L. 2023. Effects of a changing cryosphere on biodiversity and ecosystem services, and response options in the Hindu Kush Himalaya. P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal e J. F. Steiner (a cura di), *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook*. Kathmandu, Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna (ICIMOD), pagg. 123-163. doi.org/10.53055/ICIMOD.1032.

Critchley, W., Harari, N. e Mekdaschi-Studer, R. 2021. *Restoring Life to the Land: The Role of Sustainable Land Management in Ecosystem Restoration*. Convenzione delle Nazioni Unite per la lotta alla desertificazione (UNCCD)/World Overview of Conservation Approaches and Technologies (WOCAT). www.unccd.int/sites/default/files/documents/2021-10/211018_RestoringLifetotheLand_Report%20%282%29.pdf.

Dangles, O., Rabatel, A., Kraemer, M., Zeballos, G., Soruco, A., Jacobsen, D. e Anthelme, F. 2017. Ecosystem sentinels for climate change? Evidence of wetland cover changes over the last 30 years in the Tropical Andes. *PLoS ONE*, vol. 12, N. 5, articolo e0175814. doi.org/10.1371/journal.pone.0175814.

Elsen, P. R., Monahan, W. B. e Merenlender, A. M. 2020. Topography and human pressure in mountain ranges alter expected species responses to climate change. *Nature Communications*, vol. 11, articolo 1974. doi.org/10.1038/s41467-020-15881-x.

Engstrom, C. B. e Quarmby, L. M. 2023. Satellite mapping of red snow on North American glaciers. *Science Advances*, vol. 9, N. 47. doi.org/10.1126/sciadv.adi3268.

FAO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura). 2003. *Mountain Fisheries in Developing Countries*. Roma, FAO. www.fao.org/3/y4633e/y4633e.pdf.

——. 2019. *Mountain Agriculture: Opportunities for Harnessing Zero Hunger in Asia*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/ca5561en/CA5561en.pdf.

——. 2022. *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021: Systems at Breaking Point*. Rapporto principale. Roma, FAO. doi.org/10.4060/cb9910en.

FAO/UNEP (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura/Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente). 2023. *Restoring Mountain Ecosystems: Challenges, Case Studies and Recommendations for Implementing the UN Decade Principles for Mountain Ecosystem Restoration*. Roma/Nairobi, FAO/UNEP. doi.org/10.4060/cc9044en.

Fu, B., Ouyang, Z., Shi, P., Fan, J., Wang, X., Zheng, H., Zhao, W. e Wu, F. 2021. Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau ecological security barrier. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese version)*, vol. 36, N. 11, pagg. 1298-1306. https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol36/iss11/5/.

Gidey, T., Oliveira, T. S., Crous-Duran, J. e Palma, J. H. N. 2020. Using the yield-SAFE model to assess the impacts of climate change on yield of coffee (*Coffea arabica* L.) under agroforestry and monoculture systems. *Agroforestry Systems*, vol. 94, N. 1, pagg. 57-70. doi.org/10.1007/s10457-019-00369-5.

Halbach, L., Chevrollier, L.-A., Doting, E. L., Cook, J. M., Jensen, M. B., Benning, L. G., Bradley, J. A., Hansen, M., Lund-Hansen, L. C., Markager, S., Sorrell, B. K., Tranter, M., Trivedi, C. B., Winkel, M. e Anesio, A. M. 2022. Pigment signatures of algal communities and their implications for glacier surface darkening. *Scientific Reports*, vol. 12, articolo 17643. doi.org/10.1038/s41598-022-22271-4.

ICIMOD (Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna). 2023. *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook* [P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal e J. F. Steiner (a cura di)]. Kathmandu, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1028.

Jiang, C., Yang, Z., Wen, M., Huang, L., Liu, H., Wang, J., Chen, W. e Zhuang, C. 2021. Identifying the spatial disparities and determinants of ecosystem service balance and their implications on land use optimization. *Science of the Total Environment*, vol. 793, articolo 148472. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148472.

Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y. e Wang, H. 2020. A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere. *Earth-Science Reviews*, vol. 210, articolo 103346. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346.

Kargel, J. S., Upadhyay, K., Maxwell, A., Ramos, A. G. M., Harrison, S., Shugar, D. H. e Haritashya, U. K. 2021. Part I: Climate Change, Land Use Change, and Mountain Disasters. Sito web del Georgetown Journal of International Affairs. https://gjia.georgetown.edu/2021/08/23/part-i-climate-change-land-use-change-and-mountain-disasters/.

Langer, M., Schneider von Deimling, T., Westermann, S., Rolph, R., Rutte, R., Antonova, S., Rachold, V., Schultz, M., Oehme, A. e Grosse, G. 2023. Thawing permafrost poses environmental threat to thousands of sites with legacy industrial contamination. *Nature Communications*, vol. 14, articolo 1721. doi.org/10.1038/s41467-023-37276-4.

Lavorel, S., Colloff, M. J., Locatelli, B., Gorddard, R., Prober, S. M., Gabillet, M., Devaux, C., Laforgue, D. e Peyrache-Gadeau, V. 2019. Mustering the power of ecosystems for adaptation to climate change. *Environmental Science & Policy*, vol. 92, pagg. 87-97. doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.010.

Luan, W. e Li, X. 2021. Rapid urbanization and its driving mechanism in the Pan-Third Pole region. *Science of the Total Environment*, vol. 750, articolo 141270. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141270.

Lutz, S., Anesio, A. M., Field, K. e Benning, L. G. 2015. Integrated 'omics', targeted metabolite and single-cell analyses of Arctic snow algae functionality and adaptability. *Frontiers in Microbiology*, vol. 6, articolo 1323. doi.org/10.3389/fmicb.2015.01323.

Machate, O., Schmeller, D. S., Schulze, T. e Brack, W. 2023. Review: Mountain lakes as freshwater resources at risk from chemical pollution. *Environmental Sciences Europe*, vol. 35, articolo 3. doi.org/10.1186/s12302-022-00710-3.

Meredith, M., Sommerkorn, M., Cassotta, S., Derksen, C., Ekaykin, A., Hollowed, A., Kofinas, G., Mackintosh, A., Melbourne-Thomas, J., Muelbert, M. M. C., Ottersen, G., Pritchard, H. e Schuur, E. A. G. 2019. Polar regions. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M.

Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama e N. M. Weyer (a cura di), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 203-320. doi.org/10.1017/9781009157964.005.

Mikuś, P., Wyżga, B., Bylak, A., Kukuła, K., Liro, M., Oględcki, P. e Radecki-Pawlik, A. 2021. Impact of the restoration of an incised mountain stream on habitats, aquatic fauna and ecological stream quality. *Ecological Engineering*, vol. 170, articolo 106365. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106365.

Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo Sánchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S. e Welton, S. 2017. *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface*. Bonn, Germania, Convenzione delle Nazioni Unite per la lotta alla desertificazione (UNCCD). www.unccd.int/resources/reports/scientific-conceptual-framework-land-degradation-neutrality-report-science-policy.

Orr, B. J., Dosdogru, F. e Sánchez Santiváñez, M. 2024. Land degradation and drought in mountains. S. Schneiderbauer, P. Fontanella Pisa, J. F. Shroder e J. Szarzynski (a cura di), *Safeguarding Mountain Social-Ecological Systems*. Elsevier, pagg. 17-22. doi.org/10.1016/B978-0-12-822095-5.00003-6.

Palomo, I., Locatelli, B., Otero, I., Colloff, M., Crouzat, E., Cuni-Sánchez, A., Gómez-Baggethun, E., González-García, A., Grêt-Regamey, A., Jiménez-Aceituno, A., Martín-López, B., Pascual, U., Zafra-Calvo, N., Bruley, E., Fischborn, M., Metz, R. e Lavorel, S. 2021. Assessing nature-based solutions for transformative change. *One Earth*, vol. 4, N. 5, pagg. 730-741. doi.org/10.1016/j.oneear.2021.04.013.

Pintaldi, E., Hudek, C., Stanchi, S., Spiegelberger, T., Rivella, E. e Freppaz, M. 2017. Sustainable soil management in ski areas: Threats and challenges. *Sustainability*, vol. 9, N. 11, articolo 2150. doi.org/10.3390/su9112150.

Repe, A. N., Poljanec, A. e Vrščaj, B. (a cura di). 2020. *Soil Management Practices in the Alps: A Selection of Good Practices for the Sustainable Soil Management in the Alps*. Lubiana, EU Interreg Alpine Space. www.alpine-space.eu/wp-content/uploads/2022/06/46-1-links4soils-Soil%20Management%20Practices%20in%20the%20Alps%20-%20a%20collection-output.pdf.

Scheidl, C., Heiser, M., Kamper, S., Thaler, T., Klebinder, K., Nagl, F., Lechner, V., Markart, G., Rammer, W. e Seidl, R. 2020. The influence of climate change and canopy disturbances on landslide susceptibility in headwater catchments. *Science of the Total Environment*, vol. 742, articolo 140588. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140588.

Shah, N. W., Baillie, B. R., Bishop, K., Ferraz, S., Högbom, L. e Nettles, J. 2022. The effects of forest management on water quality. *Forest Ecology and Management*, vol. 522, articolo 120397. doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120397.

Swiderska, K., King-Okumu, C. e Monirul Islam, M. 2018. *Ecosystem-based Adaptation: A Handbook for EbA in Mountain, Dryland and Coastal Ecosystems*. Londra, Istituto internazionale per l'ambiente e lo sviluppo (IIED). www.iied.org/17460iied.

Teich, M., Accastello, C., Perzl, F. e Berger, F. 2022. Protective forests for ecosystem-based disaster risk reduction (Eco-DRR) in the alpine space. M. Teich, C. Accastello, F. Perzl e K. Kleemayr (a cura di), *Protective Forests as Ecosystem-based Solution for Disaster Risk Reduction (Eco-DRR)*. IntechOpen. doi.org/10.5772/intechopen.99505.

Tingley III, R. W., Paukert, C., Sass, G. G., Jacobson, P. C., Hansen, G. J. A., Lynch, A. J. e Shannon, P. D. 2019. Adapting to climate change: Guidance for the management of inland glacial lake fisheries. *Lake and Reservoir Management*, vol. 35, N. 4, pagg. 435-452. doi.org/10.1080/10402381.2019.1678535.

Torres, M. C., Naranjo, E., Fierro, V. e Carchipulla-Morales, D. 2023. Social technology for the protection of the *Páramo* in the Central Andes of Ecuador. *Mountain Research and Development*, vol. 43, N. 4, pagg. D1-D11. doi.org/10.1659/mrd.2022.00022.

UNEP (Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente). 2021a. *Adaptation Gap Report 2020*. Nairobi, UNEP. www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2020.

——. 2021b. *Mountain Resilience: Torrent Catchment Restoration in the Pamir Mountains of Afghanistan*. UNEP. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/39982.

——. 2022a. *A Scientific Assessment of the Third Pole Environment*. Nairobi, UNEP. www.unep.org/resources/report/scientific-assessment-third-pole-environment.

——. 2022b. *Global Peatlands Assessment – The State of the World's Peatlands: Evidence for Action toward the Conservation, Restoration, and Sustainable Management of Peatlands*. Rapporto principale. Global Peatlands Initiative. Nairobi, UNEP. www.unep.org/resources/global-peatlands-assessment-2022.

——. 2024. *Caucasus Environment Outlook*. Seconda edizione. Arendal, Norvegia/Tbilisi/Vienna, UNEP. www.unep.org/resources/report/caucasus-environment-outlook-second-edition.

UNEP/GRID-Arendal (Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente/GRID-Arendal). 2022. *Mountains ADAPT: Solutions from the South Caucasus*. Nairobi, UNEP. https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/39788#:~:text=This%20booklet%20showcases%20adaptation.

Wang, H., Wang, W. J., Liu, Z., Wang, L., Zhang, W., Zou, Y. e Jiang, M. 2022. Combined effects of multi-land use decisions and climate change on water-related ecosystem services in Northeast China. *Journal of Environmental Management*, vol. 315, articolo 115131. doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115131.

WWAP/UN-Water (Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO/UN-Water). 2018. *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*. Parigi, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO). https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424.

Xiao, Y., Xiao, Q. e Sun, X. 2020. Ecological risks arising from the impact of large-scale afforestation on the regional water supply balance in Southwest China. *Scientific Reports*, vol. 10, articolo 4150. doi.org/10.1038/s41598-020-61108-w.

Capitolo 7

Prospettive regionali

7.1 Africa subsahariana

UNESCO WWAP e **Ufficio dell'UNESCO di Nairobi**
Matthew England, Richard Connor, Alexandros Makarigakis e Mary Nyasimi

7.2 Europa e Asia centrale

UNECE
Jos Timmerman[1] e Hanna Plotnykova[2]

Con il contributo di Nataliia Kruta (Autorità di gestione del bacino dei fiumi Bug occidentale e Sian) e Dinara Ziganshina (SIC ICWC)

7.3 America Latina e Caraibi

UNECLAC
Silvia Saravia Matus, Alba Llavona, Lisbeth Naranjo, Natalia Sarmanto, Josefa Asmussen e Romeo Moers

7.4 Asia e Pacifico

ESCAP
Hitomi Rankine e Anshuman Varma

Con il contributo di Marisha Wojciechowska, Yi-Ann Chen, Sanjay Srivastava e Nadezhda Dimitrova (ESCAP)

7.5 Regione araba

ESCWA
Ziad Khayat, Marlene Ann Tomaszkiewicz, Sara Hess, Tracy Zaarour e Dima Kharbotli

[1] Waterframes ; [2] Segretariato della Convenzione sull'acqua

7.1 Africa subsahariana

L'Africa possiede l'11% della superficie montuosa del mondo, che copre un'area pari a circa 1,5 milioni di chilometri quadrati (Alweny et al., 2014). Il 20% della superficie dell'Africa continentale è caratterizzato da montagne con un'altitudine superiore a 1.000 metri sul livello del mare (s.l.m.) e il 5% supera i 1.500 metri s.l.m. (FAO, 2015). L'Africa orientale è la regione più montuosa del continente. Le montagne sono caratterizzate da alti livelli di biodiversità e forniscono servizi ecosistemici, comprese le risorse idriche, a milioni di persone (Capitani et al., 2019; Trisos et al., 2022). Nell'Africa subsahariana tropicale e subtropicale, le montagne presentano condizioni ambientali e risorse favorevoli rispetto alle pianure circostanti, generalmente più aride. Rappresentano importanti aree di produzione agricola per sostenere la sicurezza alimentare (Romeo et al., 2020).

Questa sezione dedicata all'Africa subsahariana comprende quattro parti. Nella prima parte vengono presentate le torri d'acqua della regione e l'importanza idrologica che hanno per le comunità montane e gli utenti a valle. Nella seconda parte vengono discusse le sfide legate alla sostenibilità delle torri d'acqua in termini di immagazzinamento e approvvigionamento idrico, comprese quelle relative agli impatti delle attività umane e ai cambiamenti climatici. Viene quindi fornita una panoramica degli approcci e delle risposte gestionali, evidenziando l'importanza degli ecosistemi forestali montani per la sostenibilità delle torri idriche. Seguono conclusioni specifiche per la regione.

7.1.1 Torri d'acqua dell'Africa subsahariana

Le montagne dell'Africa subsahariana sono una fonte d'acqua fondamentale per le comunità montane e per gli utenti a valle

Le montagne dell'Africa subsahariana (figura 7.1) sono una fonte d'acqua fondamentale per le comunità montane e per gli utenti a valle. In un continente dominato da aree aride e semi-aride, le montagne agiscono come torri d'acqua, generando, immagazzinando e fornendo acqua per l'agricoltura, per le esigenze domestiche e industriali, compresa l'energia idroelettrica (Viviroli et al., 2007; 2020; UNEP, 2010; Nsengiyumva, 2019). Rivestono un ruolo fondamentale per la sicurezza idrica, alimentare ed energetica del continente.

Le precipitazioni orografiche forniscono alle montagne dell'Africa una notevole quantità di acqua. Ciò si traduce in deflusso superficiale, infiltrazione, flusso e stoccaggio delle acque sotterranee, e in acqua immagazzinata stagionalmente o per molti anni sotto forma di neve e ghiaccio (WMO, 2024a). Nelle montagne dell'Africa orientale, l'acqua viene immagazzinata sotto forma di ghiacciai, così come nella Repubblica Democratica del Congo, in Kenya, Uganda e nella Repubblica Unita di Tanzania. Prima del 2019, questi ghiacciai coprivano un'area stimata di 4,4 chilometri quadrati (Veettil e Kamp, 2019), fornendo deflusso stagionale ai bacini idrografici a valle. Nell'Africa meridionale, le nevicate stagionali si verificano sulle cime dei monti Drakensburg, al confine tra Lesotho e Sudafrica (Taylor et al., 2016). Attraverso il deflusso superficiale, l'infiltrazione e il flusso delle acque sotterranee, l'acqua viene trasportata dalle montagne alle pianure a valle.

Le torri d'acqua dell'Africa sono una fonte di fondamentale importanza per i bacini idrografici transfrontalieri dei fiumi Congo, Niger, Nilo, Orange, Senegal, Tana e Zambesi. In Africa orientale, gli altipiani etiopici forniscono acqua al Nilo Azzurro, che contribuisce in modo significativo al flusso annuale del fiume Nilo (Awange, 2022). In Africa occidentale, l'altopiano di Fouta Djallon è un'importante fonte per i fiumi Gambia, Niger e Senegal (Descroix et al., 2020). L'altopiano di Jos alimenta numerosi fiumi, tra cui Benue, Gongola, Niger e altri fiumi che sfociano nel lago Ciad. Nell'Africa meridionale, gli altipiani del Lesotho, compresi i monti Drakensberg, sono una fonte fondamentale d'acqua (UNEP, 2012). L'altopiano angolano è la fonte primaria del Delta dell'Okavango (Lourenco e Woodborne, 2023). Le torri d'acqua dell'Africa sono importanti anche per le risorse idriche delle pianure e sono necessarie a una serie di utenti. Ad esempio, la produzione agricola e la sicurezza alimentare nelle regioni montane e nelle pianure a valle dipendono in modo significativo dalle acque e dagli ecosistemi di montagna (riquadro 7.1).

Figura 7.1
Torri d'acqua in Africa

Nota: in questa mappa, la codifica dei colori è correlata all'altezza topografica: il marrone e il giallo identificano le aree meno elevate, il verde e il bianco le aree più elevate. Le aree blu rappresentano l'acqua all'interno delle tessere mappate, ognuna delle quali comprende coste o isole.

Fonte: JPL (2004).

7.1.2 Sfide

La capacità delle torri d'acqua dell'Africa subsahariana di accumulare e immagazzinare acqua e rifornire gli utenti a valle e le comunità montane deve affrontare numerose sfide, in particolare a causa dell'intensificarsi delle attività umane e degli impatti dei cambiamenti climatici.

Nelle montagne della regione si registrano alti tassi di crescita e densità demografica, con povertà diffusa e mancanza di mezzi di sussistenza alternativi e resilienti. Nel 2017, le montagne africane ospitavano circa 252 milioni di persone (il 18% della popolazione del continente[15]) pari al 23% della popolazione montana a livello mondiale. L'Africa rimane il secondo continente montano più popoloso dopo l'Asia: in molte aree, le montagne sono più densamente popolate delle pianure.

Si stima, inoltre, che 132 milioni di persone delle zone rurali di montagna, nel 2017, fossero vulnerabili all'insicurezza alimentare, pari a due persone su tre. Si tratta della percentuale più alta di tutte le regioni continentali di montagna a livello globale (Romeo et al., 2020).

[15] Dei 18 milioni di persone che vivevano al di sopra dei 2.500 metri in Africa, nel 2017, 17 milioni si trovavano negli altipiani dell'Africa orientale (Romeo et al., 2020).

Riquadro 7.1 L'importanza delle torri d'acqua per l'agricoltura in Madagascar

Sebbene l'agricoltura generi solo circa il 20% del prodotto interno lordo del Madagascar (Banca mondiale, s.d.), viene praticata da circa l'80% della popolazione (Banca mondiale, 2023) per scopi di reddito e/o sussistenza. Circa 2,5 milioni di aziende agricole, per lo più costituite da piccoli agricoltori, dipendono dall'irrigazione continua del riso e di altre colture (IFAD, s.d.).

Nella parte orientale e settentrionale dell'isola, diverse cime montuose superano i 2.000 metri sul livello del mare (s.l.m; Chaperon et al., 1993). Le cime boschive di queste montagne assorbono le precipitazioni stagionali e le rilasciano lentamente nel bacino, sostenendo gli agricoltori in pianura e gli insediamenti urbani.

Situato nella riserva di Tsaratanana, il monte Maromokotro (2.876 metri s.l.m.) è la sorgente di diversi fiumi importanti. Il fiume Sambirano irriga le aree occidentali per la produzione di cacao, riso e frutta, tra cui alcune delle più importanti esportazioni agricole di questo Stato insulare. Il fiume Sofia forma un ampio bacino idrografico ed è fondamentale per gli agricoltori. Il massiccio isolato di Montagne d'Ambre, un'area protetta all'estremo nord, è la principale fonte di acqua potabile per circa 200.000 persone che vivono ad Antsiranana (Goodman et al., 2021) e per l'agricoltura dell'area circostante.

Le zone forestali protette forniscono un cuscinetto contro gli impatti distruttivi dei cicloni e di altri pericoli naturali. Tuttavia, dal 2001 al 2023, la copertura arborea del Madagascar è diminuita del 29% (Global Forest Watch, s.d.). I cambiamenti nel clima e nell'uso del suolo, inaspriti dalla crescita demografica, minacciano il futuro delle risorse forestali del paese e della loro biodiversità, che richiedono ulteriori iniziative di protezione e conservazione.

Il degrado degli ecosistemi montani riduce la loro capacità di immagazzinare e fornire acqua a valle. È questo il caso, in particolare, dei fenomeni di deforestazione che hanno colpito aree montane di fondamentale importanza. Anche il degrado dei suoli, causato da pratiche agricole e da usi inappropriati dei terreni, compreso l'impatto del sovrasfruttamento dei pascoli, è altrettanto dannoso (Ariza et al., 2013; Romeo et al., 2020). L'estrazione mineraria su larga scala, e non sostenibile, ha accelerato il degrado del territorio e la perdita di ecosistema. Nel 2017, in Africa, tra le persone vulnerabili all'insicurezza alimentare residenti in contesti rurali di montagna, 86 milioni vivevano in aree caratterizzate da suoli degradati; un fattore che influisce negativamente sulle attività agricole da cui dipendono i mezzi di sussistenza (Romeo et al., 2020). L'assenza di un monitoraggio idrometeorologico completo e di dati ostacola in modo significativo la comprensione e l'urgenza di riportare le aree forestali al loro stato primario.

Gli impatti dei cambiamenti climatici rendono la gestione della variabilità stagionale delle precipitazioni nell'Africa subsahariana un'impresa sempre più difficile (Trisos et al., 2022; WMO, 2022). Le proiezioni per il continente, comprese le regioni montuose, indicano una crescente variabilità delle precipitazioni su scala annuale e intra-annuale, l'aumento della temperatura e lo scioglimento dei ghiacciai. Secondo gli scenari relativi ai cambiamenti climatici, è previsto un progressivo aumento della variabilità idrologica estrema (Trisos et al., 2022). Entro il 2050, fino a 921 milioni di persone nell'Africa subsahariana potrebbero essere esposte allo stress idrico legato ai cambiamenti climatici (Dickerson et al., 2021). Si prevede un aumento delle inondazioni, della siccità e di altri pericoli naturali, sia nelle zone di montagna che di quelle a valle. Inoltre, è stata evidenziata un aumento della frequenza delle frane nelle regioni montane dell'Africa (Adler et al., 2022). È dimostrato che i disastri naturali dovuti a siccità, parassiti e cambiamenti nei regimi delle precipitazioni hanno un impatto negativo sui mezzi di sussistenza dei piccoli agricoltori (Shikuku et al., 2017).

La fusione dei ghiacciai è stata osservata nelle montagne dell'Africa orientale (Trisos et al., 2022), con una perdita di massa stimata all'80% tra il 1990 e il 2015 (EAC/UNEP/GRID-Arendal, 2016). L'area glaciale totale del Monte Kenya, ad esempio, è diminuita del 44% nel periodo 2004-2016 (Prinz et al., 2016), quella del Monte Kilimangiaro è passata da 4,8 chilometri quadrati nel 1984 a 1,7 chilometri quadrati nel 2011 (Cullen et al., 2013) e quella dei Monti Rwenzori è passata da circa 2 chilometri quadrati nel 1987 a circa 1 chilometro quadrato nel 2003 (Taylor et al., 2016). La diminuzione dell'area glaciale è legata all'aumento della temperatura dell'aria e, nel caso del Monte Kenya e del Monte Kilimangiaro, alla diminuzione delle precipitazioni piovose e dell'umidità atmosferica (Veettil e Kamp, 2019). Le previsioni indicano che i ghiacciai scompariranno prima del 2030 sul Monte Kenya e sui Monti Rwenzori, ed entro il 2040 sul Monte Kilimangiaro (Trisos et al., 2022).

Si prevede inoltre che l'impatto della scomparsa dei ghiacciai sulle risorse idriche dell'Africa orientale sarà minimo (Taylor et al., 2009; Adhikari et al., 2015; Veettil e Kamp, 2019) su scala (macro) regionale, poiché l'acqua dei ghiacciai contribuisce in misura limitata ai flussi fluviali totali. È questo il caso delle montagne del Rwenzori, tra la Repubblica Democratica del Congo e l'Uganda, dove i ghiacciai hanno contribuito per meno del 2% al deflusso totale dei principali fiumi durante le stagioni secche e umide (Taylor et al., 2009). Tuttavia, sono stati osservati impatti stagionali sulle risorse idriche a livello locale. Ad esempio, intorno al Monte Kilimangiaro, molti canali nelle zone pedemontane si sono prosciugati e i livelli d'acqua dei torrenti sono diminuiti, portando a conflitti locali per l'accesso alle risorse idriche (Gagné et al., 2014).

La frequenza e la quantità delle piogge che interessano le montagne sono di importanza cruciale per la sostenibilità delle torri d'acqua dell'Africa subsahariana

La frequenza e la quantità delle piogge che interessano le montagne sono di importanza cruciale per la sostenibilità delle torri d'acqua dell'Africa subsahariana. Le precipitazioni che vengono immagazzinate e rilasciate dalle stesse montagne, attraverso il deflusso superficiale, i fiumi e le acque sotterranee, raggiungono le pianure a valle. Nel contesto regionale, in Africa orientale le piogge rivestono un'importanza maggiore rispetto allo scioglimento dei ghiacciai in termini di volumi d'acqua destinati ad alimentare il flusso dei fiumi a valle. Dai pochi studi che hanno esaminato le proiezioni relative alle precipitazioni delle aree montane, si evince che l'Africa orientale riceverà il 5-20% di precipitazioni annuali in più nel XXI secolo, sebbene queste siano moderatamente affidabili (Adler et al., 2022). Nel resto del continente, invece, le proiezioni delle precipitazioni, sulla base degli scenari relativi ai cambiamenti climatici, indicano una crescente variabilità annuale e intra-annuale, che varia a seconda delle sottoregioni (Trisos et al., 2022).

Uno studio ha esaminato come i cambiamenti climatici (attraverso la variabilità delle precipitazioni) e l'uso del suolo generino il deflusso in nove torri d'acqua dell'Africa orientale. I risultati indicano che il deflusso dell'acqua è più sensibile ai cambiamenti climatici, se si considerano le precipitazioni, piuttosto che alla variazione di uso del suolo. Tuttavia, è stato osservato che per le pianure a valle, gli effetti derivati dalla variazione di uso del suolo hanno avuto un impatto maggiore sul deflusso dell'acqua rispetto ai cambiamenti climatici. Le torri d'acqua dell'Africa orientale hanno registrato un forte spostamento verso condizioni più umide, soprattutto nel periodo 2011-2019, sebbene l'evapotraspirazione potenziale sia aumentata gradualmente. Considerando che la maggior parte delle torri d'acqua è stata riconosciuta come non resiliente a tali cambiamenti, è probabile che anche il deflusso idrico subisca variazioni più estreme in futuro (Wamucii et al., 2021).

7.1.3 Risposte

Sono state invocate molte risposte per promuovere una gestione sostenibile dell'acqua in montagna, a fronte dei cambiamenti climatici e dell'intensificarsi delle attività umane (Adler et al., 2022; Trisos et al., 2022).

Considerando che l'agricoltura è il principale mezzo di sostentamento nelle aree montane dell'Africa subsahariana, il miglioramento delle pratiche agricole per ridurre il degrado del terreno, vale a dire la conservazione del suolo, è di importanza fondamentale (Romeo et al., 2020). Promuovere l'adattamento basato sugli ecosistemi, come ad esempio il rimboschimento e la conservazione delle foreste montane che riducono l'erosione del suolo, può migliorare la ritenzione idrica e la ricarica degli acquiferi, oltre a diminuire l'incidenza di rischi naturali (Alweny et al., 2014; Nsengiyumva, 2019).

Si prevede che i cambiamenti climatici aumenteranno la variabilità stagionale delle precipitazioni, storicamente elevata, nell'Africa subsahariana

Considerando l'alta percentuale di fiumi transfrontalieri alimentati da torri d'acqua in Africa, promuovere la cooperazione tra i paesi in materia di gestione delle acque superficiali e sotterranee è una strategia efficace per garantire un'equa condivisione dei benefici in tutto il continente (Nazioni Unite, 2024).

Importanza degli ecosistemi forestali per le torri d'acqua dell'Africa subsahariana

A livello globale, l'interesse per le torri d'acqua si è concentrato sulle catene montuose che ospitano ghiacciai, dove la temperatura è un fattore chiave nel determinare il deflusso dell'acqua (Immerzeel et al., 2020). Le montagne che ospitano foreste e altra vegetazione, come prati, forniscono servizi simili (Viviroli e Weingartner, 2004). Più specificatamente, le foreste di montagna possono catturare, immagazzinare, purificare e rilasciare l'acqua nelle aree di pianura (UNEP, 2014).

Le torri d'acqua dell'Africa orientale presentano estesi ecosistemi di foresta montana, come l'Albertine Rift, gli altipiani etiopici e kenioti (Wamucii et al., 2021). Le foreste sono caratterizzate da una notevole elevazione e da un alto tasso di umidità: accumulano, immagazzinano e forniscono acqua alle aree di pianura (UNEP, 2010). Le foreste montane mitigano inondazioni e siccità, prevengono l'erosione del suolo, mantengono la qualità dell'acqua, contribuiscono all'aumento dell'infiltrazione delle acque sotterranee e influenzano il microclima all'interno delle foreste stesse e nelle aree circostanti (Mwangi et al., 2020).

Le torri d'acqua del Kenya sono caratterizzate da foreste montane nei bacini superiori dell'Aberdare Range, delle Cherangani Hills, del Mau Forest Complex, del Monte Elgon e del Monte Kenya. Sono risorse naturali inestimabili che sostengono l'approvvigionamento idrico del paese, la produzione di energia, l'economia agraria e la conservazione della biodiversità (Kiplagat et al., 2011; Nyingi et al., 2013; Kanui et al., 2016; Ontumbi e Sanga, 2018; Schmitz, 2020; Takase et al., 2021).

Le montagne coperte di boschi sono le sorgenti di molti fiumi del Kenya e forniscono circa il 75% delle risorse idriche del paese utilizzate per l'irrigazione, le esigenze industriali e l'energia idroelettrica (che genera il 60% dell'elettricità del paese). Tuttavia, le foreste sono soggette a degrado a causa degli insediamenti umani non pianificati, del sovrasfruttamento dei pascoli, della deforestazione e della conversione dei terreni forestali ad uso agricolo. Si stima, ad esempio, che la foresta Mau, in uno dei maggiori bacini idrografici del Kenya, abbia perso un quarto della sua copertura forestale tra il 2000 e il 2020. La deforestazione minaccia la biodiversità all'interno delle foreste e compromette i servizi ecosistemici che esse forniscono. Anche le colline Cherangani e il Monte Elgon stanno subendo un degrado simile, aggravando ulteriormente la situazione (Mwangi et al., 2020).

Gli sforzi per conservare e ripristinare queste torri d'acqua fondamentali includono pratiche di gestione forestale sostenibile, progetti di riforestazione e politiche che affrontano le cause alla base della deforestazione, come la povertà e i problemi legati

alla proprietà fondiaria. Una maggiore partecipazione, il trasferimento di conoscenze, lo sviluppo delle competenze delle parti interessate e l'individuazione di catene di valore specifiche (come, ad esempio, mais, tè e bestiame) sono attività raccomandate per promuovere la resilienza dei mezzi di sussistenza (Mwangi et al., 2020). Anche il coinvolgimento delle comunità locali, tra cui donne, giovani e popolazioni indigene, negli sforzi di conservazione, e per la promozione di mezzi di sussistenza alternativi, possono contribuire a ridurre la pressione sulle foreste (Kennedy et al., 2023).

7.1.4 Conclusioni

In questa sezione è stata illustrata l'importanza delle torri d'acqua dell'Africa subsahariana per le comunità montane e gli utenti a valle. La conservazione e il ripristino delle foreste, dei suoli e di altri servizi ecosistemici correlati sono strategie di fondamentale importanza per la sostenibilità delle torri d'acqua della regione. Si prevede che i cambiamenti climatici aumenteranno la variabilità stagionale delle precipitazioni, storicamente elevata, nell'Africa subsahariana. Pertanto, diventa ancora più importante mettere in atto misure di adattamento che portino a vantaggi reciproci, comprese quelle a basso rischio, autonome oppure rispondenti al paradigma *low-regrets* (ossia senza compromessi vincolanti), con l'obiettivo di adattarsi alla stagionalità e mitigare gli impatti ambientali delle attività umane sulle montagne, salvaguardando così l'approvvigionamento idrico dalle torri d'acqua.

7.2 Europa e Asia centrale

Le catene montuose sono la fonte d'acqua di molti fiumi della regione. La neve alpina e la fusione dei ghiacciai assicurano un lento rilascio di acqua alle aree a valle. Tuttavia, i cambiamenti climatici stanno determinando uno scioglimento anticipato delle nevi stagionali e la riduzione dei ghiacciai, minacciando così la disponibilità di acqua nella stagione estiva con gravi conseguenze per le popolazioni dei bacini a valle.

Ad esempio, il fiume Colorado in America settentrionale, che serve circa 40 milioni di persone, riceve la maggior parte dell'acqua dalle nevicate delle Montagne Rocciose. Questo bacino idrografico, già sottoposto a stress a causa dell'eccessiva estrazione, si trova in una condizione di siccità dal 2000. La situazione potrebbe aggravarsi a causa delle temperature ancora più alte che stanno causando maggiori precipitazioni sotto forma di pioggia, il cui scorrimento è più veloce rispetto alla neve di montagna (Robbins, 2019).

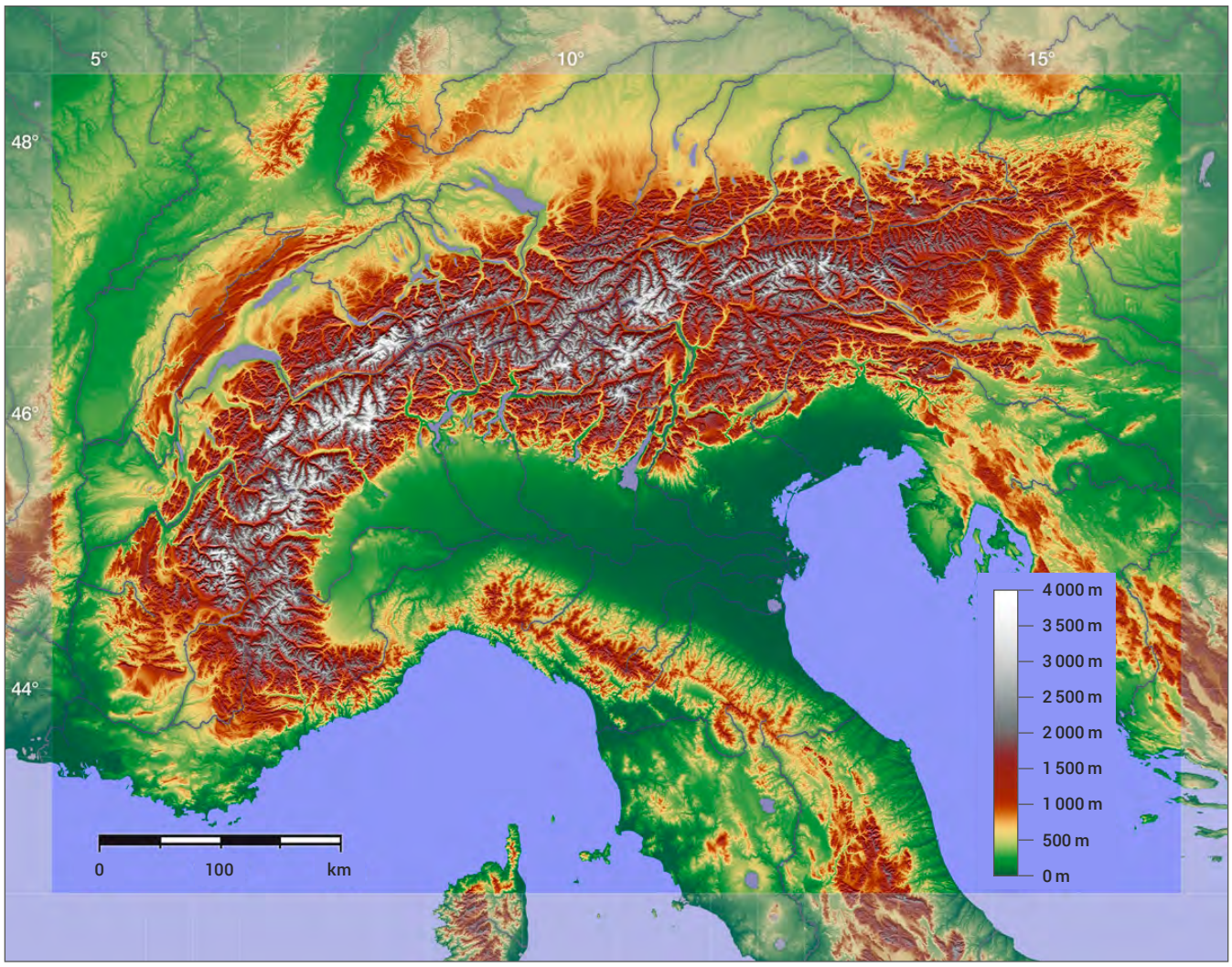
Le montagne sono aree importanti dal punto di vista sociale ed ecologico. Sono soggette a molte influenze antropiche che interessano anche l'idrologia dell'area e, di conseguenza, la disponibilità di acqua nelle regioni a valle. È quindi necessario intervenire per prevenire un ulteriore degrado delle montagne, per preservare il loro valore sociale, ecologico e la loro funzione di torri d'acqua. Poiché le catene montuose coprono più paesi, è necessaria la cooperazione transfrontaliera per garantire una gestione adeguata. Nelle sezioni seguenti, viene illustrato il complesso di questioni relative a catene montuose che si trovano all'interno della regione in cui opera la Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite[16].

[16] La Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite comprende 56 Stati membri in Europa, America settentrionale e Asia (https://unece.org/member-states).

7.2.1 Le Alpi

Le Alpi si estendono su otto paesi (Austria, Francia, Germania, Italia, Liechtenstein, Monaco, Slovenia e Svizzera), e alimentano quattro grandi fiumi (Danubio, Po, Reno e Rodano; figura 7.2). L'acqua delle Alpi è di vitale importanza per gran parte dell'Europa (Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi, 2009a).

Figura 7.2 Mappa topografica delle Alpi



Fonte: Ghosh (2021).

Gli ecosistemi alpini e la biodiversità sono importanti per la salute delle risorse idriche. Le variazioni nell'uso del suolo stanno determinando una riduzione degli habitat naturali e la loro frammentazione, mentre i cambiamenti climatici stanno esercitando una pressione sui paesaggi naturali: la diretta conseguenza è il degrado degli habitat e la perdita di specie, mettendo così sotto pressione le risorse idriche (Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi, 2009a). Entro il 2100, gli effetti dei cambiamenti climatici sulla criosfera e sull'idrosfera delle Alpi dovrebbero causare una diminuzione della portata annuale dei fiumi; più nel dettaglio, si prevede una riduzione del 45% del deflusso dall'area coperta dai ghiacci e del 35% del deflusso totale rispetto al 2006. Ciò avrà impatti significativi sulla quantità e sulla qualità dell'acqua a valle, con ripercussioni sulla produzione di energia idroelettrica, sull'agricoltura, sulla silvicoltura, sul turismo e sugli ecosistemi acquatici (Laurent et al., 2020).

La produzione di energia idroelettrica è la ragione principale del prelievo di acqua nelle Alpi. Tra gli altri usi sono da citare quelli industriali, per l'irrigazione agricola e la produzione di neve artificiale. Queste attività comportano alterazioni morfologiche e, di conseguenza, 16 corpi idrici su 50 rischiano di non avere un buono stato ecologico nel 2027 (Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi, 2009b).

L'acqua delle Alpi è di vitale importanza per gran parte dell'Europa

È necessario sostenere e promuovere la gestione integrata del rischio e l'individuazione precoce dei potenziali pericoli legati ai cambiamenti climatici, come valanghe, inondazioni, colate di fango e frane. La produzione di neve artificiale può essere un'importante strategia di adattamento per migliorare il turismo invernale e ridurre lo scioglimento dei ghiacciai, ma può portare a conflitti tra i gestori degli impianti, chi abita nell'area e altri utenti. La produzione di neve artificiale dovrebbe essere evitata, soprattutto negli habitat ecologicamente sensibili e a rischio. A livello locale, sono state utilizzate delle coperte isolanti per ridurre lo scioglimento dei ghiacciai (riquadro 7.2; Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi, 2009a; Jorio e Reusser, 2019).

Riquadro 7.2 Protezione dei ghiacciai con coperte isolanti

Da oltre dieci anni, il ghiacciaio del Rodano nel Canton Vallese, in Svizzera, è coperto da teli bianchi destinati a proteggerlo dai raggi del sole. L'obiettivo è preservare la grotta di ghiaccio, una delle grandi attrazioni turistiche delle Alpi. Questo approccio è utile su piccola scala, quando l'obiettivo è rallentare lo scioglimento a livello locale per motivi economici. Non è praticabile, tuttavia, per salvare l'intero ghiacciaio, poiché i costi supererebbero presto i benefici economici: si stima che, per l'installazione di coperture, occorrerebbero tra i 10 e i 100 milioni di euro all'anno (Jorio e Reusser, 2019).

Teli protettivi sul ghiacciaio del Rodano

Foto: © Zoltan Major/Shutterstock.*

La Convenzione delle Alpi, tra gli otto paesi attraversati da questa catena montuosa, è stata adottata nel 1991 con l'obiettivo di conseguire lo sviluppo sostenibile e proteggere l'intera catena. Le relazioni sullo stato delle Alpi vengono pubblicate periodicamente, per contribuire attivamente alla discussione sullo sviluppo ecologico, economico e sociale della catena montuosa. Per la settima relazione, la Piattaforma pericoli naturali della Convenzione delle Alpi ha elaborato un'analisi dello *status quo* e delle raccomandazioni per il miglioramento della governance del rischio, allo scopo di esaminare i cambiamenti nel modo in cui la società affronta le calamità. Le previsioni indicano un aumento della frequenza di pericoli naturali quali la caduta di massi, la destabilizzazione delle lingue dei ghiacciai, le inondazioni da collasso di laghi glaciali (GLOF nell'acronimo inglese) e le valanghe di ghiaccio associate al ritiro dei ghiacciai e del permafrost (vedere sezione 2.2.3; Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi, 2019). La Convenzione delle Alpi ha inoltre sviluppato il Piano d'azione per il clima 2.0 per ottenere Alpi neutrali e resilienti dal punto di vista climatico entro il 2050: un criterio importante per proteggere l'ambiente montano e ridurre lo scioglimento dei ghiacciai (Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi, 2022).

La Commissione internazionale per la protezione del Reno, attraverso la Commissione internazionale per l'idrologia del bacino del Reno, sta monitorando i ghiacciai che alimentano il fiume. Nell'aggiornamento della strategia di adattamento ai cambiamenti climatici, la Commissione internazionale per la protezione del Reno ha osservato che la percentuale di neve e acqua da fusione dei ghiacciai, che stabilizza il flusso del fiume durante i periodi di secca, è destinata a diminuire a causa degli stessi effetti avversi dei cambiamenti climatici. Ne deriva che è necessario ripristinare i sistemi idrici naturali come le foreste, le zone umide e le pianure alluvionali sul Reno e nel suo bacino idrografico (CHR, 2022; ICPR, 2022).

7.2.2 I Carpazi

La regione dei Carpazi è condivisa da Repubblica Ceca, Ungheria, Polonia, Romania, Serbia, Slovacchia e Ucraina. I Carpazi ospitano circa il 30% della flora europea e le più numerose popolazioni europee di orso bruno, lupo, lince, bisonte europeo e specie rare di uccelli. Gli habitat seminaturali, come i pascoli di montagna e i prati da fieno, sono di grande importanza ecologica e culturale. La regione fornisce importanti beni e servizi ecosistemici come cibo, acqua dolce, prodotti forestali e turismo. Alimenta inoltre tre grandi bacini idrografici: il Danubio e il Dnestr, che sfociano nel Mar Nero, e la Vistola, che sfocia nel Mar Baltico (UNEP, 2023a; Climate-ADAPT, 2024).

I Carpazi ospitano circa il 30% della flora europea

L'abbandono delle terre, la conversione e la frammentazione degli habitat, la deforestazione, le pratiche agricole e forestali non sostenibili provocano un aumento del ruscellamento e dell'erosione, minacciando la biodiversità delle montagne. L'agricoltura è la principale fonte di inquinamento delle acque superficiali e sotterranee (Climate-ADAPT, 2024). Oltre a ciò, i cambiamenti climatici stanno comportando temperature più elevate e l'aumento della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore estive. Si prevede che i regimi di precipitazione subiranno alterazioni: da un alto, la diminuzione delle piogge estive implicherà la riduzione dei flussi fluviali e una maggiore scarsità d'acqua; dall'altro, precipitazioni più intense e di breve durata procureranno un aumento del rischio di inondazioni, erosione e frane che influenzeranno i mezzi di sussistenza e gli insediamenti. Le stagioni della neve si accorceranno, minacciando il turismo invernale locale, ma prolungando la stagione di crescita per l'agricoltura. Lo scioglimento anticipato delle nevi ridurrà i flussi fluviali, le riserve estive di acqua potabile, la ricarica degli acquiferi e aumenterà il rischio di incendi boschivi (Alberton et al., 2017).

L'invasione su larga scala dell'Ucraina da parte della Federazione russa ha colpito in modo drammatico la regione dei Carpazi, esercitando una pressione significativa sulle risorse naturali. Gravi sono i rischi ambientali connessi all'inquinamento provocato dalla distruzione

delle infrastrutture. Tra questi, lo scarico di prodotti petroliferi nei bacini del Dnestr e della Vistola a seguito degli attacchi militari ai depositi di petrolio e alle centrali elettriche (Shumilova et al., 2023; Autorità di gestione del bacino del Dnestr, 2024; Autorità di gestione del bacino dei fiumi Bug occidentale e Sian, inedito). Le foreste risentono anche della crescita del consumo di legna da ardere indotto dalle interruzioni nella fornitura di combustibili liquidi e di elettricità, un fenomeno che può aumentare il rischio di inondazioni. La guerra pone anche grandi sfide alla gestione delle aree protette: ad esempio, con una notevole riduzione dei finanziamenti per la conservazione e una riduzione del personale a causa della mobilitazione militare (Ministero del clima e dell'ambiente della Polonia, 2022; UNEP, 2022a).

Per garantire la sostenibilità delle risorse naturali è necessario aumentare l'integrazione tra uso del suolo e gestione delle acque. Ciò include la protezione degli ecosistemi, una maggiore attenzione alla ritenzione idrica dei suoli e all'immagazzinamento dell'acqua, la raccolta dell'acqua piovana, la prevenzione dell'erosione superficiale, soprattutto sui terreni agricoli, la salvaguardia delle foreste dal degrado e l'adattamento della gestione delle infrastrutture idrauliche esistenti. È necessaria, inoltre, la prevenzione e la preparazione a inondazioni e frane, compreso lo sviluppo di mappe delle inondazioni e di mappe integrate delle zone a rischio. I paesi dei Carpazi hanno incluso molte di queste misure nelle loro strategie ambientali nazionali (Alberton et al., 2017).

La Convenzione quadro sulla protezione e lo sviluppo sostenibile dei Carpazi (Convenzione dei Carpazi), un accordo ambientale multinazionale sottoscritto tra i sette paesi dei Carpazi ed entrato in vigore nel 2003, mira a proteggere il patrimonio naturale e culturale della regione, promuovendo al contempo lo sviluppo sostenibile. Gli *stakeholder* locali e i rappresentanti delle comunità possono partecipare alle riunioni della Convenzione in qualità di osservatori. Vengono inoltre coinvolti attraverso la cosiddetta Giornata dei Carpazi, organizzata in concomitanza con la Conferenza delle Parti della Convenzione dei Carpazi. Tra le iniziative, la Convenzione ha portato all'istituzione di un sito Ramsar transfrontaliero nel Parco nazionale di Đerdap (con la suggestiva gola della Porta di ferro) e a una migliore protezione delle foreste di montagna. Le strategie di adattamento al clima vengono integrate anche in altre aree di intervento delle politiche come la gestione del territorio, l'agricoltura e il turismo (UNEP, 2023a; Climate-ADAPT, 2024).

La Convenzione dei Carpazi lavora anche in stretta collaborazione con la Commissione internazionale per la protezione del fiume Danubio (ICPDR, 2014). Si possono citare il Danube Climate Adaptation Study (Ludwig-Maximilians-Universität di Monaco di Baviera, 2018), che include gli impatti dei cambiamenti climatici nei Carpazi, e il Danube Flood Risk Management Plan (ICPDR, 2021), che annovera le misure di gestione del rischio di alluvione nella ragione, tradotte in pratiche per l'attuazione da parte dei paesi a livello nazionale.

La dimensione dei Carpazi si riflette bene anche nelle attività della Commissione per l'uso sostenibile e la protezione del bacino del fiume Dnestr (Commissione per il Dnestr). In particolare, il gruppo di lavoro sugli ecosistemi e la biodiversità dedica una notevole attenzione alla regione dei Carpazi, adottando misure per la conservazione e l'aumento delle risorse forestali e dei piccoli fiumi per migliorare l'immagazzinamento dell'acqua (Commissione per il Dnestr, 2024a). Inoltre, il gruppo di lavoro sulle emergenze ha identificato alcune aree prioritarie nella regione, eseguendo la modellazione e la mappatura del rischio di alluvione. Ne è seguito lo sviluppo di piani di gestione del rischio, secondo il quadro di riferimento della Direttiva alluvioni adottata dall'Unione europea (2007/60/CE; Commissione per il Dnestr, 2024b).

7.2.3 Asia centrale

Le montagne dell'Asia centrale comprendono le catene del Pamir e del Tian Shan, che coprono parti dell'Afghanistan, della Cina, del Kazakhstan, del Kirghizistan, del Tagikistan e dell'Uzbekistan (figura 7.3); e la catena del Karakoram che si estende su Cina, India e Pakistan. Queste montagne contengono ghiacciai, sono ecosistemi fragili e sono importanti per l'identità sociale e culturale dei loro abitanti. La catena del Tian Shan è nota come la torre d'acqua dell'Asia centrale. Le montagne dell'Asia centrale sono un'importante fonte di acqua dolce per la produzione di energia idroelettrica, l'irrigazione, l'acqua potabile e la produzione industriale. Il bacino del Lago d'Aral, che copre gran parte dell'area, ospita oltre 60 milioni di persone. In questo bacino, fino al 90% del prelievo totale di acqua viene destinato all'agricoltura (Alford et al., 2015).

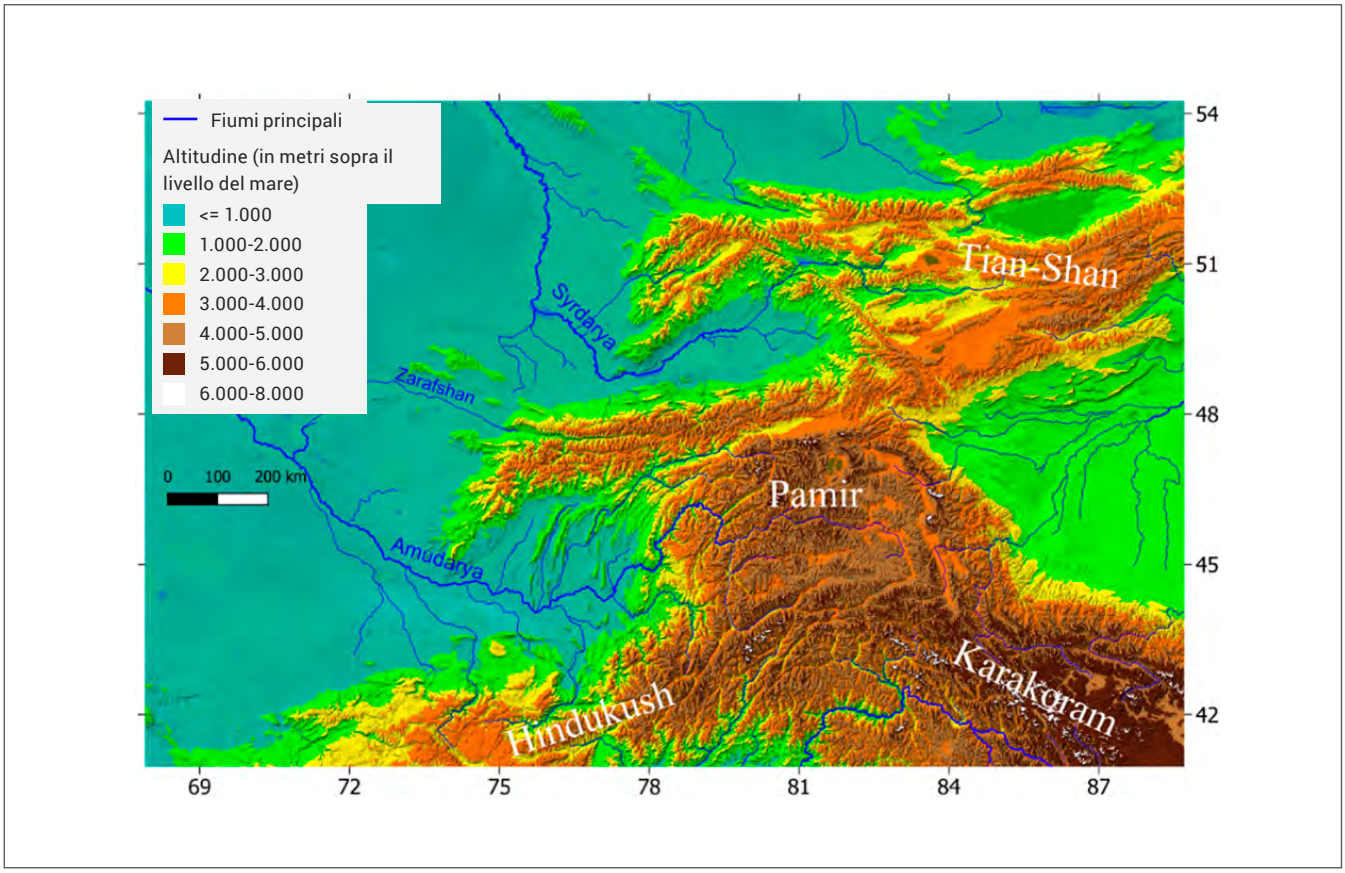
Il Kirghizistan e il Tagikistan dipendono fortemente dall'energia idroelettrica: circa il 90% dell'elettricità proviene da questa fonte energetica. I paesi a monte soffrono di carenze energetiche in inverno e vorrebbero espandere la loro produzione idroelettrica (Zandi, 2023). Viceversa, i paesi a valle, come Kazakhstan, Turkmenistan e Uzbekistan, dipendono in larga misura dall'acqua delle montagne per la produzione agricola estiva. Ad esempio, l'80% del flusso dell'Amu Darya e il 74% del flusso del Syr Darya, che insieme forniscono il 90% dell'acqua fluviale dell'Asia centrale, si formano sulle montagne del Kirghizistan e del Tagikistan (Russell, 2018). Tali contrastanti richieste stagionali portano a tensioni politiche tra i paesi rivieraschi (Pohl et al., 2017; CAWater-info, s.d.). I progressi nella cooperazione sono stati resi possibili da un accordo stipulato nel 2021 tra Kirghizistan e Uzbekistan, in cui i paesi hanno concordato la fornitura di acqua in cambio di elettricità (Climate Diplomacy, 2022).

Le montagne dell'Asia centrale sono un'importante fonte di acqua dolce per la produzione di energia idroelettrica, l'irrigazione, l'acqua potabile e la produzione industriale

Gli ecosistemi montani svolgono un ruolo centrale nella regolazione del flusso e dell'approvvigionamento idrico. Ad esempio, le aree con vegetazione come le foreste trattengono l'acqua e la rilasciano lentamente sotto forma di acque superficiali e sotterranee. Il disboscamento può causare una grave erosione del suolo, la foresta perde la funzione di regolazione idrica e, di conseguenza, il rischio di inondazioni può aumentare (Stecher et al., 2023). Gli ecosistemi delle montagne dell'Asia centrale sono colpiti dall'inquinamento, dalla frammentazione e dal degrado degli habitat, oltre che dai cambiamenti climatici. La conservazione degli habitat prevede delle sfide sovranazionali e multidimensionali che rendono difficile per i singoli paesi regolamentare e attuare efficacemente le politiche (Van der Graaf e Siarova, 2021; Zoï Environment Network, 2022). Per preservare i fragili ecosistemi delle aree montane della regione, nel 1994 è stata istituita la Commissione interstatale per lo sviluppo sostenibile dei paesi dell'Asia centrale. Tale Commissione si pone l'obiettivo di espandere la cooperazione regionale sulla conservazione e l'uso sostenibile delle aree montane, in particolare rafforzando il quadro istituzionale per il sostegno agli ecosistemi montani (Mosello et al., 2023).

In Asia centrale, i cambiamenti climatici stanno causando un aumento delle temperature medie, con conseguente scioglimento generale dei ghiacciai. Le precipitazioni medie annue sono in aumento, così come è in aumento la loro variabilità interannuale e il relativo deflusso, che può portare a inondazioni in inverno e a siccità idrologiche in estate. La crescente variabilità ha messo sotto pressione il funzionamento delle centrali idroelettriche, le forniture di acqua potabile e la produzione agricola (UNDP/ENVSEC, 2011; Sorg et al., 2012). L'inadeguatezza delle conoscenze e dei dati sulle risorse naturali, la scarsa cooperazione istituzionale, la frammentazione delle responsabilità e la mancanza di risorse ritardano l'efficacia dell'azione (GIZ, 2023).

Figura 7.3 Catene montuose del Tian Shan e del Pamir in Asia centrale



Fonte: Umirbekov et al. (2022, fig. 1, pag. 4).

Per preservare i ghiacciai sono state proposte soluzioni tecniche: tra queste la copertura del ghiaccio con coperte isolanti (vedere riquadro 7.2), come sperimentato sulle Alpi, oppure la produzione di neve artificiale per proteggere il ghiacciaio e tamponare il deflusso (Travers, 2023). Tuttavia, anche se possono offrire un ristoro temporaneo a livello locale, si tratta di soluzioni generalmente considerate troppo costose per essere applicate su larga scala (Ruggeri, 2023). Nel frattempo, è necessario migliorare e condividere le conoscenze e le informazioni; rafforzare la cooperazione regionale; potenziare le capacità di azione sulla criosfera e sulla gestione delle acque di montagna da parte dei paesi; nonché sensibilizzare e coinvolgere i principali *stakeholder* nello sviluppo e nell'attuazione dei piani d'azione (GIZ, 2021; UNESCO, 2022).

Il Centro glaciologico regionale dell'Asia centrale è stato istituito nel 2017 per esaminare gli impatti dei cambiamenti climatici su ghiacciai, neve, risorse idriche e per rafforzare il coordinamento delle attività di ricerca e lo scambio di informazioni nelle aree montuose della regione (UNESCO, s.d.). La Commissione della Repubblica del Kazakhstan e della Repubblica del Kirghizistan per l'uso intergovernativo degli impianti per la gestione dell'acqua sui fiumi Chu e Talas discute dei ghiacciai all'interno del gruppo di lavoro sull'adattamento ai cambiamenti climatici e sui programmi d'azione a lungo termine. Anche il Fondo internazionale per la salvaguardia del Lago d'Aral considera i ghiacciai come parte delle risorse idriche dello stesso bacino (EC IFAS, 2024).

7.2.4 Conclusioni

Le catene montuose di questa regione ospitano importanti ecosistemi. Hanno un valore culturale e sono importanti fonti di acqua per le aree circostanti. Tuttavia, sono minacciate dalle tendenze demografiche, dalle richieste energetiche e agricole, dal turismo e dai cambiamenti climatici, che influiscono sulle risorse idriche montane e sulla disponibilità di acqua. A livello nazionale si stanno sviluppando strategie e piani per mitigare queste criticità, ma sono necessari sia un approccio ancora più integrato, che colleghi la gestione del territorio a quella delle acque, che la creazione di incentivi per la protezione degli ecosistemi montani. I paesi con aree montuose riconoscono che molte di queste urgenze possono essere affrontate efficacemente solo lavorando insieme ai loro vicini.

Le Convenzioni dei Carpazi e delle Alpi e la Commissione intergovernativa per l'Asia centrale riflettono questa necessità di cooperazione. Inoltre, organizzazioni di bacino transfrontaliere come le Commissioni del Dnestr e del Chu-Talas, la Commissione internazionale per la protezione del Danubio, la Commissione internazionale per la protezione del Reno e il Fondo internazionale per la salvaguardia del Lago d'Aral dedicano una notevole attenzione alle montagne e ai ghiacciai nel processo generale di gestione dei bacini idrografici, nonché in specifiche aree tematiche di cooperazione come quelle relativa all'adattamento, alla conservazione, alla gestione delle inondazioni e al monitoraggio. Le discussioni in seno a queste organizzazioni transfrontaliere, in cui si scambiano anche conoscenze ed esperienze, contribuiscono a stimolare le attività a livello nazionale.

7.3 America Latina e Caraibi

Le torri d'acqua in America Latina e nei Caraibi occupano circa un terzo del territorio della regione (FAO, 2000) e producono un flusso di acqua per unità di superficie maggiore di qualsiasi altro continente (Bretas et al., 2020). Le montagne della regione comprendono la Sierra madre in Messico, la Cordigliera centroamericana, le Sierre e gli altipiani dei Caraibi, gli altipiani brasiliani e le Ande (figura 7.4; FAO, 2000). La Cordigliera delle Ande, la catena montuosa più lunga del mondo che si estende per oltre 7.000 chilometri, alimenta la maggior parte dei corsi d'acqua della regione (FAO, 2000) e contribuisce al 50% del flusso del Rio delle Amazzoni (Bretas et al., 2020).

In base ai dati relativi al 2017, circa il 25% della popolazione dell'America Latina e dei Caraibi (167 milioni di persone) viveva nelle aree montane, di cui 112 milioni in contesti urbani. Circa 17 milioni di persone risiedevano in aree montane spesso vulnerabili all'intensa variabilità climatica e al degrado del suolo (Romeo et al., 2020).

I ghiacciai di tutta la regione stanno vedendo il loro volume complessivo ridursi considerevolmente (WMO, 2023). Molti sono scomparsi del tutto, tra cui il ghiacciaio Ventorrillo in Messico, il ghiacciaio Chacaltaya nello Stato Plurinazionale della Bolivia (WGMS, 2024) e il ghiacciaio Humboldt nella Repubblica Bolivariana del Venezuela (Reyes Haczek, 2022). Secondo il Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico, il riscaldamento globale ha causato la perdita di ghiacciai nelle Ande, che va dal 30% al 50% dell'area rispetto agli anni '80, segnando uno dei declini più significativi a livello globale (IPCC, 2022). All'estremità meridionale delle Ande, la perdita di massa glaciale è stata stimata in circa 22,9 miliardi di tonnellate all'anno (Dussaillant et al., 2019)

Dalla metà del XIX secolo, la Colombia ha perso il 90% dei suoi ghiacciai. Esempio di questa tendenza preoccupante è la rapida scomparsa del ghiacciaio della Sierra Nevada de Santa Marta, uno dei pochi ghiacciai situati vicino al Mar dei Caraibi (a meno di 50 chilometri di distanza). Questo ghiacciaio è una sorgente per oltre 30 fiumi, un sito insostituibile per la biodiversità e sacro per le quattro comunità indigene che vivono nella zona, composte da oltre 30.000 persone (IDEAM, 2021). Con la diminuzione dei volumi del ghiacciaio, i flussi

Figura 7.4
Principali catene montuose e fiumi in America Latina e Caraibi

Nota: le tonalità di colore verde più scuro rappresentano altitudini superiori a 1.000 metri s.l.m.

Fonte: autori.

I ghiacciai di tutta la regione stanno vedendo il loro volume complessivo ridursi considerevolmente

che forniscono acqua potabile e cibo alle popolazioni ne risentono, costringendo gli individui a spostarsi e ad abbandonare il loro ambiente, le loro credenze e l'eredità trasmessa dai loro antenati. La situazione è stata inoltre aggravata dai conflitti sociali per l'uso del territorio, dove i gruppi armati controllano illegalmente le terre, spingendo le comunità indigene alla fuga (Cajar, 2024).

I cambiamenti climatici e le attività umane hanno causato un'accelerazione della deforestazione nelle Ande, che racchiudono ecosistemi fondamentali per la cattura di acqua dolce. Ad esempio, le foreste primarie delle Ande si sono ridotte ad appena il 3-10% della loro estensione originaria, mettendo le comunità indigene a rischio di grave insicurezza idrica (FAO/UNEP, 2023). Simili processi di degrado sono in atto in altre aree montane della regione.

7.3.1 Sfide e interventi per la gestione delle acque

Alimentazione e agricoltura

L'acqua proveniente dalle montagne svolge un ruolo essenziale per la produzione di colture agricole di alto valore come il caffè e il cacao in paesi come Brasile, Colombia, Ecuador, Guatemala, Messico, Perù e Repubblica Bolivariana del Venezuela.

Nella regione andina, l'acqua è fondamentale anche per la coltivazione di alimenti di base come patate, mais e quinoa (Wymann von Dach et al., 2014). L'agricoltura genera dal 3% al 13% del prodotto interno lordo nazionale e impiega dal 7% al 34% della popolazione nella regione (UNECLAC, 2024). Si stima che le esportazioni di prodotti alimentari rappresentino tra il 18% e il 54% delle esportazioni totali (Olmos, 2017). Tra il 15% e il 17% del totale delle terre coltivate nei paesi andini si trova all'interno della Cordigliera delle Ande, con la maggior parte delle terre coltivate in montagna concentrate nelle aree settentrionali, in Colombia, Ecuador e Perù (Devenish e Gianella, 2012; Schoolmeester et al., 2018). Il cambiamento delle condizioni idrologiche nelle Ande boliviane ha ridotto l'area di pascolo dei lama, costringendo alcuni agricoltori a convertire la propria attività nell'acquacoltura (UNEP, 2023b). Le influenze negative sulla produzione di colture invernali, alberi da frutto, vigneti e alcune specie forestali in Cile e nella regione centro-occidentale dell'Argentina sono alcuni degli impatti associati alla riduzione dei ghiacciai andini, insieme all'aumento della temperatura, alla riduzione delle ore fredde e alla diminuzione della disponibilità di acqua (Magrin et al., 2014).

L'acqua proveniente dalle montagne svolge un ruolo essenziale per la produzione di colture agricole di alto valore come il caffè e il cacao

La comunità di Cebollullo a La Paz, nello Stato Plurinazionale della Bolivia, dipende dall'acqua del ghiacciaio Illimani per l'irrigazione, sebbene i cambiamenti climatici ne abbiano accelerato lo scioglimento, riducendo la disponibilità di acqua e interrompendo le pratiche agricole. Per far fronte a questo problema, gli agricoltori hanno reintrodotto un antico sistema di irrigazione che utilizza solchi a zig-zag, che rallentano il flusso dell'acqua e riducono l'erosione del suolo (BIS, 2020).

In Perù, la comunità di Phinaya dipende dalla lana e dalla carne di alpaca e vigogna per il proprio sostentamento, ma a causa dell'aumento delle temperature al di sopra dei 4.000 metri di altitudine – una condizione che provoca il prosciugamento delle zone umide, scarsità idrica e malattie – si trova ad affrontare delle difficoltà. Un progetto pilota ha previsto la costruzione di dighe in piccole lagune periglaciali, migliorando la disponibilità di acqua per i camelidi e ripristinando zone umide e pascoli. Tali benefici hanno potenziato i sistemi di allevamento e migliorato la quantità e la qualità della lana di alpaca (Canales Sierra, 2018). Lo scioglimento dei ghiacciai nella Cordillera Blanca del Perù ha fatto sì che sette dei nove bacini superassero la soglia critica, a causa della riduzione del flusso idrico superficiale e della portata dei fiumi durante la stagione secca, andando oltre le capacità di adattamento[17] (Samaniego et al., 2017).

Nel corridoio arido del Guatemala, che attraversa la Cordigliera centroamericana, gli agricoltori lottano contro la variabilità del clima, i periodi di siccità e i sempre più frequenti eventi meteorologici estremi che sconvolgono i tradizionali programmi di semina. Per affrontare queste sfide, è stato attuato un programma

[17] Soglie in cui gli obiettivi di un individuo o di un sistema non possono più essere protetti attraverso adeguate misure di prevenzione perché la capacità di adattamento degli organismi e delle comunità è stata superata (Klein et al., 2014). L'adattamento trasformativo offre opzioni e strategie che possono essere utilizzate per riorganizzare i sistemi quando raggiungono i loro limiti, come il trasferimento della produzione in aree più fresche o la diversificazione in altre colture (Samaniego et al., 2017).

nei dipartimenti di Chiquimula, El Progreso e Zacapa, che ha coinvolto 6.000 famiglie di agricoltori in 60 comunità. Queste aree sono particolarmente colpite da condizioni climatiche avverse, difficoltà socioeconomiche e accesso limitato alle risorse. Il programma di servizi climatici integrati e partecipativi per l'agricoltura migliora l'accesso a informazioni affidabili sul clima, consentendo alle comunità di prendere decisioni informate riguardo all'attività agricola. Più di 5.000 leader comunitari hanno ricevuto un'adeguata preparazione per applicare queste conoscenze attraverso corsi di formazione (Valdivia Araica et al., 2023).

Insediamenti umani

Le città che dipendono dall'acqua di fusione dei ghiacciai, per l'approvvigionamento idrico domestico, hanno subito riduzioni sostanziali della disponibilità di acqua da questa fonte (IPCC, 2022). Tra il 1970 e il 2010, l'area dei ghiacciai che fornisce acqua a Lima è diminuita del 43% a causa dell'aumento delle temperature. Di conseguenza, nel 2010, la potenziale disponibilità idrica della città si è ridotta a 125 metri cubi per abitante all'anno, una delle più basse della regione[18] (González Molina e Vacher, 2014). Se la tendenza all'aumento delle temperature dovesse continuare, potrebbe verificarsi un'accelerazione della fusione e un aumento del deflusso nei sottobacini (vedere riquadro 2.2). In una fase successiva, quando il bacino glaciale si ridurrà, gli apporti di acqua di fusione saranno minori (González Molina e Vacher, 2014).

Allo stesso modo, Santiago, che dipende in parte dall'acqua proveniente dalla fusione dei ghiacci, ha affrontato un rischio significativo a causa di una siccità senza precedenti. Con un calo delle precipitazioni tra il 20% e il 40%, si è verificata una notevole riduzione dell'accumulo di neve, nonché una diminuzione dei volumi delle riserve e dei livelli delle acque sotterranee (Garreaud et al., 2019). Questo mette a rischio l'approvvigionamento idrico del centro urbano, soprattutto durante l'estate, quando fino al 70% dell'acqua della città proviene dai ghiacciai (Aguas Andinas, 2024).

A Bogotá, circa l'80% dell'acqua potabile della città proviene dal paramo Chingaza, mentre il paramo Sumapaz e il complesso di paramo Guerrero contribuiscono rispettivamente con il 5% e il 15% (Canal Capital, 2023). In particolare, il sistema di Chingaza ha subito una significativa riduzione dei livelli d'acqua, scesi dell'85% a causa del fenomeno El Niño, di una prolungata stagione secca e delle alte temperature, causando nell'aprile 2024 il razionamento dell'acqua nella città che conta otto milioni di abitanti (Ownby, 2024).

Per affrontare problemi simili in Ecuador, le comunità degli altipiani centrali hanno partecipato a un programma di ristori per i servizi ecosistemici, ricevendo incentivi economici diretti (30 dollari per ettaro all'anno) sostenuti dal governo centrale attraverso il programma Socio Páramo (Torres et al., 2023). Guidate dalle giovani generazioni, queste comunità hanno attuato strategie basate sulla tecnologia sociale, promuovendo la partecipazione comunitaria e le conoscenze locali per proteggere e ripristinare il paramo. Le strategie comprendevano la designazione di aree protette per la ricarica dell'acqua, la riduzione del pascolo e il ripristino della vegetazione autoctona, insieme ad incentivi economici e opportunità di sviluppo. I risultati, sulla base di immagini satellitari, hanno mostrato un rallentamento del tasso di perdita del paramo al 3,3% dal secondo periodo (2000-2008) al terzo periodo (2013-2021). Sebbene il coinvolgimento del governo sia stato significativo, l'efficacia della protezione del paramo è stata maggiore nelle aree in cui le decisioni sono state prese a livello locale, evidenziando l'importanza della partecipazione della comunità nella gestione sostenibile delle risorse idriche e nella resilienza ai cambiamenti climatici (Torres et al., 2023).

[18] In media, nel 2021, il totale delle risorse idriche annuali rinnovabili pro capite nei paesi andini era pari a 41.090 metri cubi (FAO, s.d.).

A Intag, in Ecuador, un progetto di conservazione delle acque e delle foreste ha apportato benefici a ben 38 comunità, raggiungendo circa 7.000 persone. L'iniziativa ha creato riserve nel bacino idrografico controllate dalla comunità, acquisite da un'organizzazione non governativa e gestite in modo sostenibile da gruppi locali. Questo approccio ha migliorato la qualità dell'acqua, prevenuto inondazioni e frane, promosso l'ecoturismo e ridotto l'emigrazione. Coinvolgendo le comunità nella gestione di queste riserve, il progetto ha dato loro l'opportunità di diventare più consapevoli degli sforzi di conservazione necessari e ha favorito l'*empowerment* locale (UNDP, 2019; FAO/UNEP, 2023).

Industria ed energia

Oltre a essere una fonte vitale di acqua, le montagne generano anche energia sostenibile per le città e le comunità più piccole a valle, nonché per i villaggi remoti delle aree montane. In America Latina, nel 2013 l'85% dell'energia idroelettrica proveniva da fonti situate in quota (Mountain Partnership, 2013).

La maggior parte dei paesi delle Ande tropicali dipende dall'acqua di fusione dei ghiacci e delle nevi per soddisfare la domanda di produzione di energia elettrica

La maggior parte dei paesi delle Ande tropicali dipende dall'acqua di fusione dei ghiacci e delle nevi per soddisfare la domanda di produzione di energia elettrica. Ad esempio, circa il 92% della produzione di energia in Ecuador proviene da centrali idroelettriche (Ministero dell'energia e delle miniere dell'Ecuador, s.d.). Una stima relativa a Canon del Pato, tra le più grandi centrali idroelettriche del Perù, prevede che la completa scomparsa dei ghiacciai potrebbe comportare una riduzione del 15% della produzione di energia elettrica della centrale (UNESCO/IUCN, 2022).

Anche la produzione di energia idroelettrica è influenzata dalla riduzione dei livelli delle precipitazioni. Nella maggior parte degli scenari tracciati, si prevede che Argentina e Cile subiranno notevoli riduzioni nella produzione di energia idroelettrica tra il 2020 e il 2100 (AIE, 2021). Ciò è dovuto principalmente ai livelli più bassi delle precipitazioni medie, a causa dei cambiamenti climatici, nelle Ande centrali e in Patagonia, nonché dalla conseguente riduzione del flusso che alimenta i principali bacini idrografici.

Nelle zone di alta quota dei paesi andini si sono verificati conflitti sociali legati all'acqua, molti dei quali possono essere attribuiti in parte alle attività minerarie. Oltre all'estrazione dell'acqua, l'attività mineraria altera in una certa misura i bacini, sia in superficie (ad esempio, con l'asportazione del suolo o della copertura vegetale, l'alterazione o lo sbarramento dei fiumi, la rimozione dei ghiacciai e la modifica della topografia) che al di sotto di essi, con effetti negativi sulla disponibilità di acqua per gli utenti a valle (Altomonte e Sánchez, 2016). In Cile, nella catena montuosa tra Copiapó e Rancagua, nel 2010 i progetti minerari avevano interessato 4,5 chilometri quadrati di ghiacciai rocciosi, con una perdita stimata di circa 24.106 metri cubi di acqua dolce (Bodin, 2019). Per fare un confronto, il ghiacciaio Juncal Norte (7,6 chilometri quadrati), situato vicino a Santiago, ha perso 1,5 chilometri quadrati della sua superficie tra il 1955 e il 2006 (Bown et al., 2008).

Protezione dell'ambiente

L'Argentina ha ratificato una legge specifica dedicata alla protezione dei ghiacciai. Emanata nell'ottobre 2010, la legge 26.639, intitolata *Regime di bilancio minimo per la conservazione dei ghiacciai e dell'ambiente periglaciale*, si pone l'obiettivo principale di salvaguardare i ghiacciai come riserve idriche strategiche e zone d'interesse della biodiversità, riconoscendone il valore come "depositi scientifici" e attrazioni turistiche. Questa norma ha imposto severi divieti, tra cui quelli relativi al rilascio di inquinanti tossici, alle attività di costruzione, all'estrazione mineraria, alla ricerca di idrocarburi e agli impianti industriali (Governo dell'Argentina, 2010). Anche il Cile sta sviluppando iniziative volte a promulgare una legislazione sulla salvaguardia dei ghiacciai. Nel 2022 è stato presentato un disegno di legge, approvato dalla Commissione ambiente del Senato, con disposizioni esplicite per la protezione del permafrost (Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales, 2022).

Alcuni ghiacciai e aree montane innevate ricevono una protezione indiretta in virtù della loro inclusione tra i luoghi designati come parchi nazionali o altre aree protette. Ad esempio, nel territorio colombiano, dal 1959 sei ghiacciai sono stati protetti grazie al riconoscimento dello status di Parchi naturali nazionali ed in conformità con i mandati della Costituzione politica del 1991, che li ha definiti beni di uso pubblico in base alla loro natura di beni inalienabili, imprescrittibili e non espropriabili; ciò significa che non possono essere trasferiti, non sono soggetti a scadenza e non possono essere sottratti o confiscati (García Pachón, 2018). Allo stesso modo, in Ecuador, le alture con nevi perenni sono comprese in diverse aree protette. Una parte consistente del territorio cileno fa parte del Sistema nazionale delle aree naturali protette, che annovera numerosi ghiacciai tra le aree designate (Ministero dei beni nazionali del Cile, 2023).

Le aree montane dell'America Latina e dei Caraibi sono sempre più colpite dai cambiamenti climatici e dalle attività umane

Di fronte ai cambiamenti relativi alla massa d'acqua nelle aree montane, numerosi paesi della regione stanno portando avanti iniziative di ricerca e monitoraggio per affrontare questo problema urgente (vedere capitolo 8). Ad esempio, dall'ottobre 2023, lo Stato Plurinazionale della Bolivia sta monitorando attivamente i ghiacciai nei bacini delle città di El Alto e La Paz (Ministero degli affari esteri dello Stato Plurinazionale della Bolivia, 2023). Mentre il Cile vanta una rete di stazioni glaciologiche che comprende almeno 80 punti di monitoraggio, che facilitano una valutazione completa della dinamica dei ghiacciai (Ministero dei lavori pubblici del Cile, 2023).

7.3.2 Conclusioni

Le aree montane dell'America Latina e dei Caraibi sono sempre più colpite dai cambiamenti climatici e dalle attività umane. Questi sconvolgimenti influenzano il ciclo idrologico, minacciando il sostentamento delle comunità proveniente dall'agricoltura. Implicano, inoltre, conseguenze di vasta portata nelle aree di pianura e nei centri urbani che dipendono dalle fonti idriche montane per l'acqua potabile e l'approvvigionamento energetico.

In risposta, diversi paesi della regione hanno emanato politiche e leggi per proteggere questi ecosistemi vulnerabili. Alcuni sistemi hanno già superato le soglie critiche, rendendo fondamentale la promozione di misure di adattamento quali: l'attuazione di soluzioni basate sulla natura, tra cui la riforestazione; l'adozione di pratiche tradizionali, come la raccolta dell'acqua e le tecniche di semina ampiamente utilizzate dalle comunità indigene della regione; il perseguimento di strategie di adattamento trasformative per soddisfare la domanda di acqua destinata alle colture e a garantire i mezzi di sussistenza; l'espansione delle infrastrutture di raccolta dell'acqua.

Per attuare queste misure in modo efficace, sono necessari finanziamenti ben mirati, un solido monitoraggio, lo sviluppo di competenze e quadri di governance inclusivi, che promuovano il dialogo e la partecipazione delle comunità autoctone al fine di applicare le migliori pratiche disponibili in funzione dei contesti locali nelle regioni montane.

7.4 Asia e Pacifico

La regione dell'Asia e del Pacifico ospita alcune delle montagne più alte del mondo e i sistemi glaciali di maggiori dimensioni. L'altopiano tibetano e le circostanti catene montuose del Pamir e dell'Hindu Kush Himalaya e i monti Hengduan, Tien Shan e Qilian coprono una superficie di alta montagna di cinque milioni di chilometri quadrati e presentano 100.000 chilometri quadrati di ghiacciai. Questo cosiddetto Terzo Polo, talvolta definito anche come la torre d'acqua dell'Asia, conserva più ghiaccio e neve di qualsiasi altra regione al di fuori dell'Antartide e dell'Artide (UNEP, 2022b). Il Terzo Polo è all'origine di più di dieci sistemi fluviali che sono vitali per il sostentamento di circa due miliardi di persone nei bacini dell'Asia centrale, nordorientale, meridionale e sudorientale (ICIMOD, 2023). Inoltre, quest'area è anche una di quelle più ricche e diversificate dal punto di vista biologico e più fragili dal punto di vista ecologico a livello mondiale; per di più, ospita una grande varietà di culture; tuttavia, secondo le previsioni si riscalderà più rapidamente rispetto alla media globale (UNEP, 2022b).

7.4.1 Tendenze e impatti

La regione dell'Asia e del Pacifico ospita alcune delle montagne più alte del mondo e i sistemi glaciali di maggiori dimensioni

Le montagne e i ghiacciai della regione dell'Asia e del Pacifico sono tra i più vulnerabili ai cambiamenti climatici, sociali e ambientali in corso (Immerzeel et al., 2020). I ghiacciai della regione dell'Hindu Kush Himalaya stanno scomparendo a una velocità allarmante, del 65% superiore nel periodo 2011-2020 rispetto al decennio precedente (ICIMOD, 2023). Questi ghiacciai registrano inoltre un tasso di fusione più elevato rispetto alla media globale (Mani, 2021), con le perdite più significative che si concentrano nella parte orientale della regione dell'Hindu Kush Himalaya (figura 7.5).

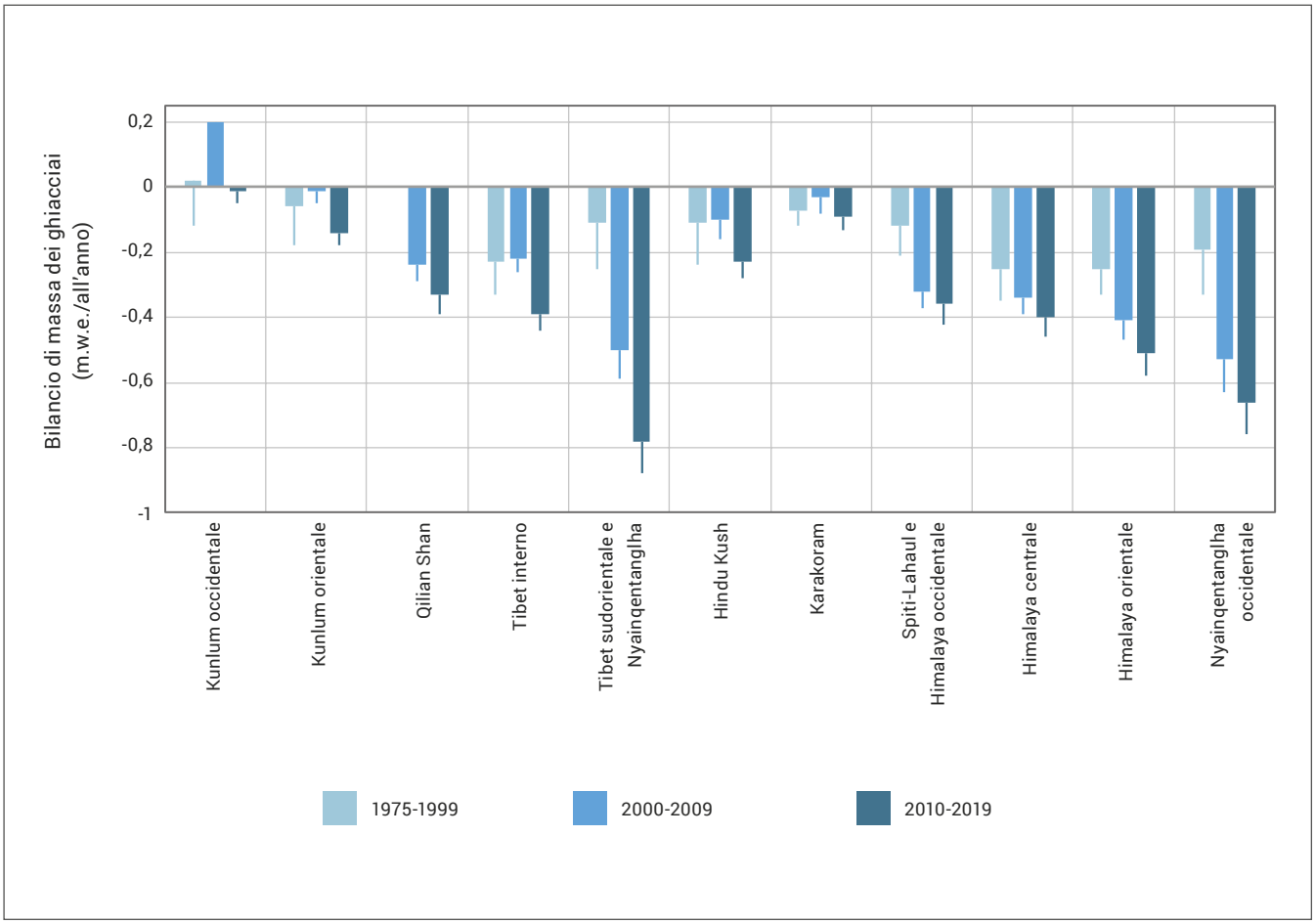
Secondo le previsioni, in uno scenario in cui il riscaldamento globale determinerà un incremento delle temperature compreso tra 1,5 e 2°C, il volume dei ghiacciai nella regione dell'Hindu Kush Himalaya potrebbe ridursi tra il 30% e il 50% entro il 2100. Qualora il riscaldamento dell'atmosfera dovesse superare i 2°C, questi ghiacciai potrebbero perdere tra il 20% e il 45% del volume che avevano nel 2020 (ICIMOD, 2023).

Queste tendenze relative al riscaldamento e allo scioglimento determineranno cambiamenti rilevanti. Sono stati previsti aumenti del deflusso totale nella regione del Terzo Polo, con gli impatti maggiori nei bacini idrografici delle aree monsoniche. Per fiumi come l'Indo, alimentati in misura elevata dall'acqua di fusione dei ghiacciai e delle nevi, le previsioni indicano che l'aumento del flusso fluviale raggiungerà un picco (vedere riquadro 2.2), per poi diminuire (Wester et al., 2019; UNEP 2022b).

Sebbene gli impatti siano diversi a seconda del bacino idrografico, la ricerca ribadisce il ruolo della fusione dei ghiacciai come fattore che contribuisce a provocare eventi GLOF (vedere sezione 2.2.3), inondazioni improvvise e frane (Adler et al., 2022), causando ingenti danni agli insediamenti umani, alla produzione agricola e ai pascoli, alle reti di trasporto e agli impianti idroelettrici. Si stima che negli ultimi 190 anni eventi GLOF sempre più frequenti, dovuti alla rapida formazione ed espansione dei laghi glaciali (figura 7.6), abbiano causato oltre 7.000 vittime (Shrestha, 2023). Si prevede che il rischio di GLOF nella regione dell'Hindu Kush Himalaya triplicherà entro la fine del secolo, con un numero significativo di eventi che interesseranno altri paesi a valle, principalmente nell'Himalaya orientale (Zheng et al., 2021). Molte delle conseguenze non potranno essere mitigate dalle misure di adattamento.

Nel lungo periodo, in base alle previsioni, la riduzione dei flussi d'acqua e l'aumento della siccità metteranno a repentaglio la sicurezza alimentare, idrica, energetica e i mezzi di sussistenza nella regione dell'Hindu Kush Himalaya (Mani, 2021), oltre a incrinare il funzionamento degli ecosistemi e ad aumentare il rischio di conflitti e migrazioni (Caretta et al., 2022). Le popolazioni più vulnerabili e marginalizzate sono spesso le più a rischio, compresi gli agricoltori di montagna e le comunità indigene.

Figura 7.5 Bilancio di massa dei ghiacciai a livello regionale, espressi in metri d'acqua equivalente (m w.e.) all'anno, relativi a diverse aree della regione dell'Hindu Kush Himalaya nei periodi 1975-1999, 2000-2009 e 2010-2019

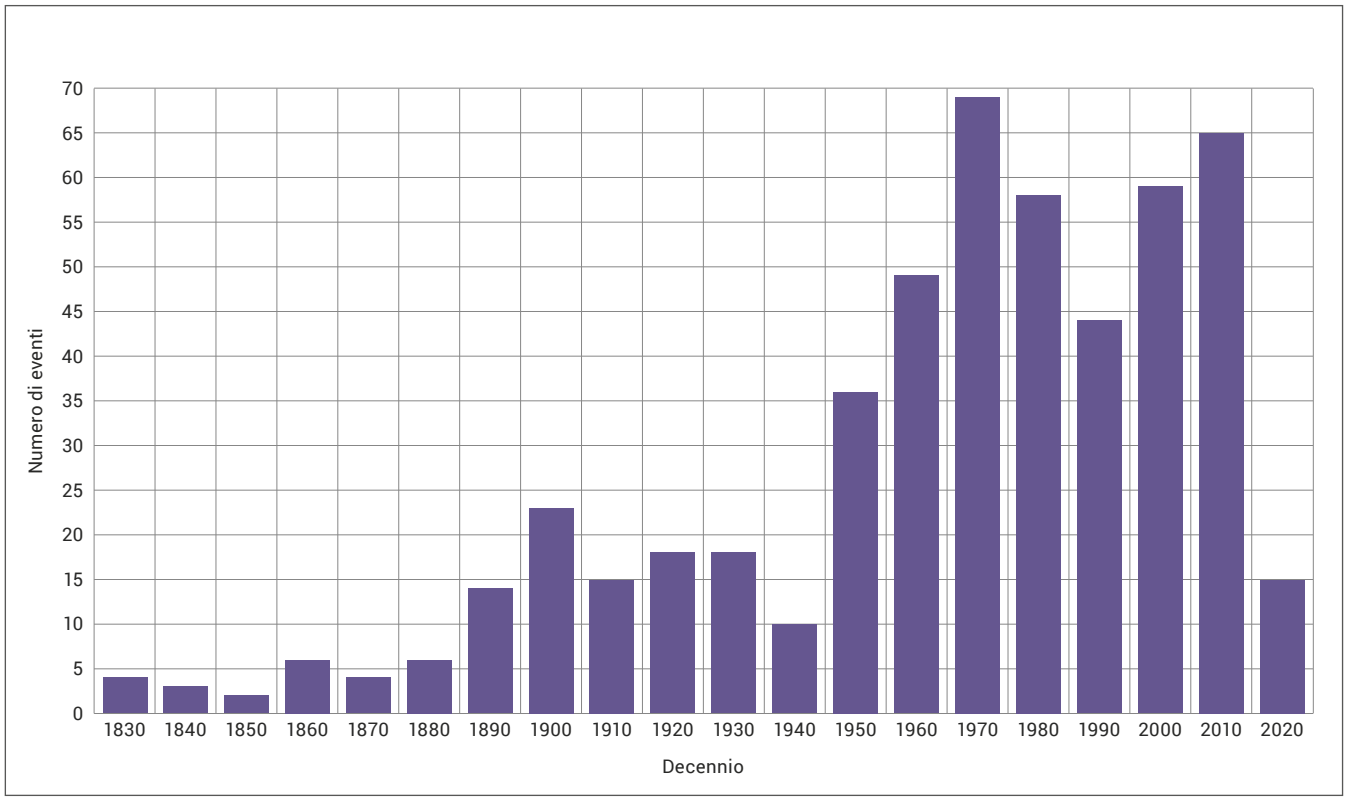


Nota: il valore di –1,0 m w.e. all'anno rappresenta una perdita di massa di 1.000 kg/m² di copertura ghiacciata o una perdita annuale di spessore del ghiacciaio di circa 1,1 metri all'anno, poiché la densità del ghiaccio è solo 0,9 volte quella dell'acqua.

Fonte: ESCAP/UNEP/OIL/UNFCCC RCC Asia-Pacifico/UNIDO (2023, fig. 20, pag. 74), sulla base dei dati di Jackson et al. (2023).

Il consumo di energia, il degrado ambientale e le attività umane contribuiscono a creare rischi di altro tipo: nel Terzo Polo si sta registrando una presenza sempre più frequente di *black carbon* (vedere riquadro 2.1), metalli pesanti e inquinanti organici persistenti (UNEP, 2022b). Si è riscontrato che il *black carbon* (derivante dai processi di combustione dei combustibili fossili e di biomassa, compresi gli incendi boschivi) aumenta la velocità di fusione dei ghiacciai in misura diversa a seconda che si depositi sulla neve fresca o sul ghiaccio; in ogni caso, si tratta di un fenomeno che può essere influenzato anche da altri fattori (Kang et al., 2020). Nel contesto di uno studio si è stimato che, nell'arco di 40 anni, la perdita di massa del ghiacciaio dell'altopiano tibetano è stata di circa 450 chilometri cubi: di questi, tra i 20 e gli 80 chilometri cubi sono attribuibili agli effetti del *black carbon* e del deposito di altri elementi che assorbono la luce (Zhang et al., 2018). Con il prosciugamento del Lago d'Aral e dell'area circostante, il deserto di Aralkum è ora considerato tra le fonti di polvere più dannose a livello mondiale.

Figura 7.6 Numero di inondazioni da collasso di laghi glaciali registrate per decennio nelle regioni di alta montagna dell'Asia, 1830-2020



Fonte: adattato da Shrestha (2023).

Si è riscontrato che il black carbon *aumenta la velocità di fusione dei ghiacciai*

Questo deserto, il cui equilibrio è stato incrinato dall'azione umana, è anche una fonte di inquinanti come metalli pesanti e pesticidi che viaggiano su lunghe distanze, accelerando il processo di fusione dei ghiacciai e contaminando i sistemi di acqua dolce (Zhang et al., 2020; Banks et al., 2022; Chen et al., 2022).

Oltre che nella regione del Terzo Polo, la fusione dei ghiacciai e le minacce agli ecosistemi montani sono una preoccupazione fondamentale anche nell'area del Pacifico. Fenomeni di scioglimento dei ghiacciai sono stati osservati nelle Alpi meridionali della Nuova Zelanda e si prevede che entro il 2100 il paese perderà l'88% del volume di ghiaccio che aveva nel 2011. L'invasione di specie non autoctone, i cambiamenti climatici e le attività umane pongono sfide importanti agli ecosistemi montani dei piccoli Stati insulari in via di sviluppo del Pacifico, causando alterazioni nella resa idrica, rischio di incendi e minacce alla biodiversità (Frazier e Brewington, 2020).

Le tendenze e gli impatti sopra descritti sottolineano l'importanza della collaborazione sulle strategie di adattamento e sulle misure per mitigare le conseguenze di certi fenomeni, soprattutto nelle regioni più vulnerabili.

7.4.2 Cooperazione regionale e transfrontaliera

La cooperazione regionale sul monitoraggio dei ghiacciai ha svolto un ruolo fondamentale nell'individuare le tendenze critiche. Sono stati compiuti diversi passi importanti, come si vedrà di seguito, per rafforzare gli accordi istituzionali a favore della cooperazione nel contesto di bacini idrografici condivisi, incentrandosi in particolare sulla cooperazione scientifica e sui sistemi di allerta precoce. Questi strumenti forniscono modelli per le regioni montane con bacini idrografici condivisi in modo che possano affrontare gli impatti dei cambiamenti climatici e il fenomeno della fusione dei ghiacciai, all'interno della regione dell'Asia e del Pacifico e non solo.

La cooperazione regionale sul monitoraggio dei ghiacciai ha svolto un ruolo fondamentale nell'individuare le tendenze critiche

La cooperazione scientifica internazionale sul Terzo Polo per rafforzare i sistemi di allerta precoce e l'analisi d'impatto

L'istituzione del Third Pole Regional Climate Centre Network (TPRCC-Network) dell'Organizzazione meteorologica mondiale è stata un passo fondamentale per soddisfare le esigenze specifiche della regione in materia di servizi relativi al clima e alla criosfera. I tre nodi del TPRCC-Network comprendono: un nodo settentrionale (guidato dalla Cina), un nodo meridionale (guidato dall'India) e un nodo occidentale (guidato dal Pakistan); in questo contesto, la Cina ha il ruolo di coordinatrice generale (WMO, 2024b). La Commissione economica e sociale per l'Asia e il Pacifico e il Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna, con il programma Third Pole Environment, il Global Cryosphere Watch e le reti Global Energy and Water Exchanges e Mountain Research Initiative, sono partner che contribuiscono al funzionamento del TPRCC-Network. La fase dimostrativa è stata lanciata nel giugno 2024 a Lijiang, in Cina. La rete, che dovrebbe supportare i sistemi di allerta precoce e l'analisi d'impatto, emette periodicamente dichiarazioni elaborate di comune accordo che integrano dati osservativi, tendenze storiche e previsioni. Tali dati forniscono una panoramica sulla temperatura dell'aria, le precipitazioni, la copertura nevosa, gli eventi estremi e i rischi naturali rilevati durante una certa stagione, proponendo su questa base una previsione per quella seguente.

Ricerca congiunta e allerta precoce attraverso una rete di osservatori di montagna dell'Asia centrale

Il Centro glaciologico regionale dell'Asia centrale è stato istituito in Kazakhstan come centro di categoria 2 sotto l'egida dell'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura, dopo la ratifica di un accordo da parte del paese nel 2017. Fornisce una piattaforma per la cooperazione scientifica e tecnica transfrontaliera sul monitoraggio dei ghiacciai in Asia centrale (UNESCO, 2024; s.d.). Nel 2023, il centro ha firmato un *memorandum* d'intesa con i rappresentanti delle istituzioni nazionali e di altre istituzioni di monitoraggio idrometeorologico dell'Asia centrale, al fine di avviare una cooperazione multilaterale e stabilire una base per far progredire la ricerca in campo glaciologico nel contesto della rete di osservatori di montagna. La rete è stata creata perché potesse fornire i primi set di dati aperti relativi alle precedenti attività di rilevamento e rafforzerà le competenze in materia di monitoraggio nella regione (Mountain Research Initiative/ GEO Mountains, 2023). Le attività di collaborazione hanno finora incluso studi congiunti, spedizioni sul campo e l'installazione di un sistema di allerta precoce per ridurre il rischio di inondazioni da collasso dei laghi morenici.

Cooperazione transfrontaliera nella regione dell'Hindu Kush Himalaya

Il Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna ha lanciato la Call to Action per la regione dell'Hindu Kush Himalaya, approvata nel 2020 attraverso una dichiarazione ministeriale. L'appello, che ha coinvolto diversi *stakeholder* attraverso *workshop* consultivi nella sua fase di stesura, ha fortemente sollecitato quanto segue: la cooperazione a tutti i livelli nella regione dell'Hindu Kush Himalaya; il riconoscimento dell'unicità delle popolazioni di montagna; l'azione concertata per il clima; il potenziamento delle iniziative

su nove priorità relative alle zone di montagna; il rafforzamento della resilienza degli ecosistemi e l'arresto della perdita di biodiversità; la condivisione dei dati regionali, la cooperazione scientifica e lo scambio di conoscenze (ICIMOD, 2020). La Call to Action ha rafforzato i partenariati per lo sviluppo sostenibile della montagna stipulati tra i paesi della regione dell'Hindu Kush Himalaya e ha sostenuto l'agenda d'azione per le montagne nei *forum* globali (ICIMOD, s.d.). Ha ricevuto nuovo slancio grazie al secondo vertice ministeriale (HKH Ministerial Mountain Summit), che si è tenuto nel 2024.

Accesso a dati e previsioni quasi in tempo reale nel bacino del fiume Mekong

Il bacino del fiume Mekong è vulnerabile agli impatti dei cambiamenti climatici e del fenomeno della fusione dei ghiacciai. Dal 2008, 49 stazioni idrometeorologiche automatiche, istituite nell'ambito del Mekong Hydrological Cycle Observing System Project in Cambogia, Cina meridionale, Repubblica Democratica Popolare del Laos, Thailandia e Vietnam, raccolgono dati, tra cui quelli relativi al livello dell'acqua e alle precipitazioni. Ad intervalli di 15 minuti, queste stazioni trasmettono dati quasi in tempo reale al Segretariato della Commissione del fiume Mekong e alle agenzie nazionali responsabili della riduzione del rischio di disastri e della gestione delle risorse idriche. Lo stato giornaliero dei livelli dell'acqua, le previsioni settimanali, le medie nel lungo periodo, gli allarmi per le inondazioni improvvise e le previsioni sulla siccità sono tra i dati e tra le informazioni prontamente disponibili sul sito web del Segretariato della Commissione del fiume Mekong (MRC, s.d.).

È essenziale una collaborazione che consenta di coinvolgere le diverse parti interessate e i vari settori colpiti da queste tendenze

7.4.3 Percorsi futuri

È essenziale una collaborazione che consenta di coinvolgere le diverse parti interessate e i vari settori colpiti da queste tendenze. Lo scioglimento dei ghiacciai e le crisi legate all'acqua devono essere affrontati attraverso il rafforzamento delle misure di adattamento, la gestione integrata delle risorse idriche e soluzioni sinergiche in materia di clima, natura e inquinamento, sostenute dalla collaborazione transfrontaliera, dal dialogo regionale e da attività di promozione e sensibilizzazione.

Affrontare le pressioni del clima, della natura e dell'inquinamento atmosferico sui ghiacciai

L'attuazione di misure economicamente e tecnicamente realizzabili, come il miglioramento dell'efficienza dei forni per mattoni e l'incentivazione delle famiglie a passare a combustibili più puliti, come il gas di petrolio liquefatto e l'energia solare, possono dare un importante contributo al contenimento della fusione dei ghiacciai e ridurre le emissioni di *black carbon* (Mani, 2021). Sono altresì importanti le misure per mitigare le tendenze al prosciugamento nel bacino del Lago d'Aral e, di conseguenza, ridurre le tempeste di polvere, comprese le soluzioni basate sulla natura, che dovrebbero ricevere attenzione nel contesto della pianificazione delle strategie di adattamento. Contrastare le emissioni di polvere e *black carbon* può ridurre la pressione sui ghiacciai, preservando le loro proprietà dell'albedo e migliorando le condizioni ambientali.

Pianificazione congiunta delle strategie di adattamento

Poiché le crisi legate all'acqua rappresentano il principale obiettivo per l'adattamento al clima nelle aree di alta montagna dell'Asia e del Pacifico, sono essenziali strategie congiunte sviluppate al di là dei confini nazionali e amministrativi. Sono necessari investimenti in infrastrutture resilienti, soluzioni basate sulla natura, sistemi di allerta precoce efficaci e affidabili, analisi d'impatto e strumenti di valutazione dei rischi potenziati e accessibili, anche a livello settoriale, per identificare i rischi più critici, le aree in cui condurre ulteriori ricerche e le opportunità in materia di sensibilizzazione e impegno relative ai settori interessati. Allo stesso tempo, sono indispensabili reti di monitoraggio ambientale che tengano traccia dell'evoluzione della quantità e della qualità dell'acqua.

In un contesto in cui le iniziative istituzionali sono sempre più numerose, un quadro d'azione può aiutare a garantire il coordinamento tra i partner di sviluppo, ad attuare progetti e mobilitare investimenti che rispondano alle minacce a livello locale e transfrontaliero. Sono fondamentali anche approcci di pianificazione a lungo termine, come il metodo dei percorsi di adattamento e le strategie basate sugli ecosistemi, nonché la diversificazione economica e dei mezzi di sussistenza.

Diverse iniziative di cooperazione sottolineano l'importanza della responsabilizzazione e del coinvolgimento delle comunità locali, comprese le popolazioni indigene, le giovani generazioni e i gruppi vulnerabili

*Strategia a doppio binario per la gestione dei rischi, la costruzione della resilienza e dell'*empowerment *della comunità*

La gestione dei rischi legati ai ghiacciai come gli eventi GLOF richiede un duplice approccio integrato.

Percorso 1: rafforzare i sistemi di allerta precoce. Per attivare un'azione tempestiva o anticipata, i sistemi di allerta precoce devono essere incentrati sulle persone, basati sugli impatti e tener conto dei rischi. Dovrebbero prendere in considerazione rischi complessi e a cascata, come i nubifragi legati agli eventi GLOF, e adattarsi alle esigenze di settori essenziali come quelli dell'energia, dell'acqua, dei trasporti, delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione, attraverso la valutazione del rischio e la previsione dell'impatto.

Percorso 2: migliorare la resilienza delle infrastrutture. È necessario sviluppare infrastrutture resilienti in grado di resistere e adattarsi alle calamità, oltre che di promuovere una maggiore resilienza sociale ed economica. Questo approccio assume una grande importanza negli *hotspot* a rischio multiplo; inoltre, deve essere supportato da una mappatura completa delle vulnerabilità e da una valutazione integrata. I settori delle infrastrutture essenziali devono essere progettati per gestire rischi interconnessi, garantendo una resilienza sistemica contro le emergenze e il manifestarsi di avversità a livello locale.

Diverse iniziative di cooperazione sottolineano l'importanza della responsabilizzazione e del coinvolgimento delle comunità locali, comprese le popolazioni indigene, le giovani generazioni e i gruppi vulnerabili, nei processi relativi ai sistemi di allerta precoce e all'adattamento su scala più ampia. La regione dell'Asia e del Pacifico può trarre beneficio dallo sviluppo di sistemi di allerta precoce per le inondazioni, basati sulle comunità locali, e da innovazioni simili per rafforzare la cooperazione transfrontaliera nei bacini idrografici condivisi (riquadro 7.3).

Riquadro 7.3 Un sistema transfrontaliero di allerta precoce per le alluvioni basato sulla comunità (CBFEWS)

Nel 2017, i sistemi di allerta precoce basati sulla telemetria del distretto di Sitamarhi in India e di quello di Mahottari in Nepal, con il coinvolgimento delle comunità locali, le organizzazioni partner, le agenzie governative e il sostegno del Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna, hanno fornito informazioni tempestive sulle inondazioni a oltre 19.000 famiglie (circa 100.000 individui; ICIMOD, 2017). I canali di informazione formali di solito richiedono tempo per diffondere gli avvisi alle aree remote, che spesso sono le più vulnerabili. Tuttavia, i sistemi CBFEWS si affidano a metodi più diretti, come la comunicazione via cellulare, che garantiscono un celere scambio di informazioni.

Per il Ratu, fiume condiviso da India e Nepal, è stato implementato un sistema CBFEWS per le comunità che risiedono lungo le sue sponde. Durante l'alluvione del 12 agosto 2017, tale sistema ha contribuito a una migliore risposta alla calamità nel villaggio di Shrikhandi, situato nel distretto di Sitamarhi, nello Stato federato del Bihar. Lo strumento di allerta precoce in questione, istituito dal Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna e dall'organizzazione non governativa locale Yuganter, ha permesso di diffondere informazioni con sette-otto ore di anticipo, consentendo alle comunità locali di adottare misure proattive, tra cui il trasferimento in luoghi più sicuri.

Fonti: ICIMOD (2017) e Singh Shrestha e Sherchan (2018).

Accordi operativi per i corsi d'acqua transfrontalieri e la gestione integrata delle risorse idriche

Le gravi implicazioni dello scioglimento dei ghiacciai sulla gestione delle risorse idriche nelle aree a valle e sulla condivisione dei corsi d'acqua transfrontalieri della regione dell'Asia e del Pacifico richiedono grande attenzione. Nonostante i significativi progressi ottenuti in relazione al monitoraggio, ai sistemi di condivisione dei dati e alle previsioni a livello regionale, l'attuazione delle misure di base in materia di gestione integrata delle risorse idriche nei bacini idrografici, siano essi transfrontalieri o interni, è in ritardo rispetto ad altre regioni del mondo.

Nel 2023, solo due paesi asiatici che condividono acque transfrontaliere (Cambogia e Mongolia) avevano il 90% o più delle loro acque coperte da accordi operativi, sempre più importanti per gestire gli impatti di regimi idrologici in evoluzione, mentre in Europa e America settentrionale erano 23 (Nazioni Unite, s.d.). Questo requisito fondamentale per una gestione efficace delle risorse idriche richiede ulteriori investimenti e attenzione nella regione dell'Asia e del Pacifico, in particolare dove i cambiamenti climatici e le tendenze dell'inquinamento ambientale continueranno a influenzare la disponibilità e la qualità dell'acqua.

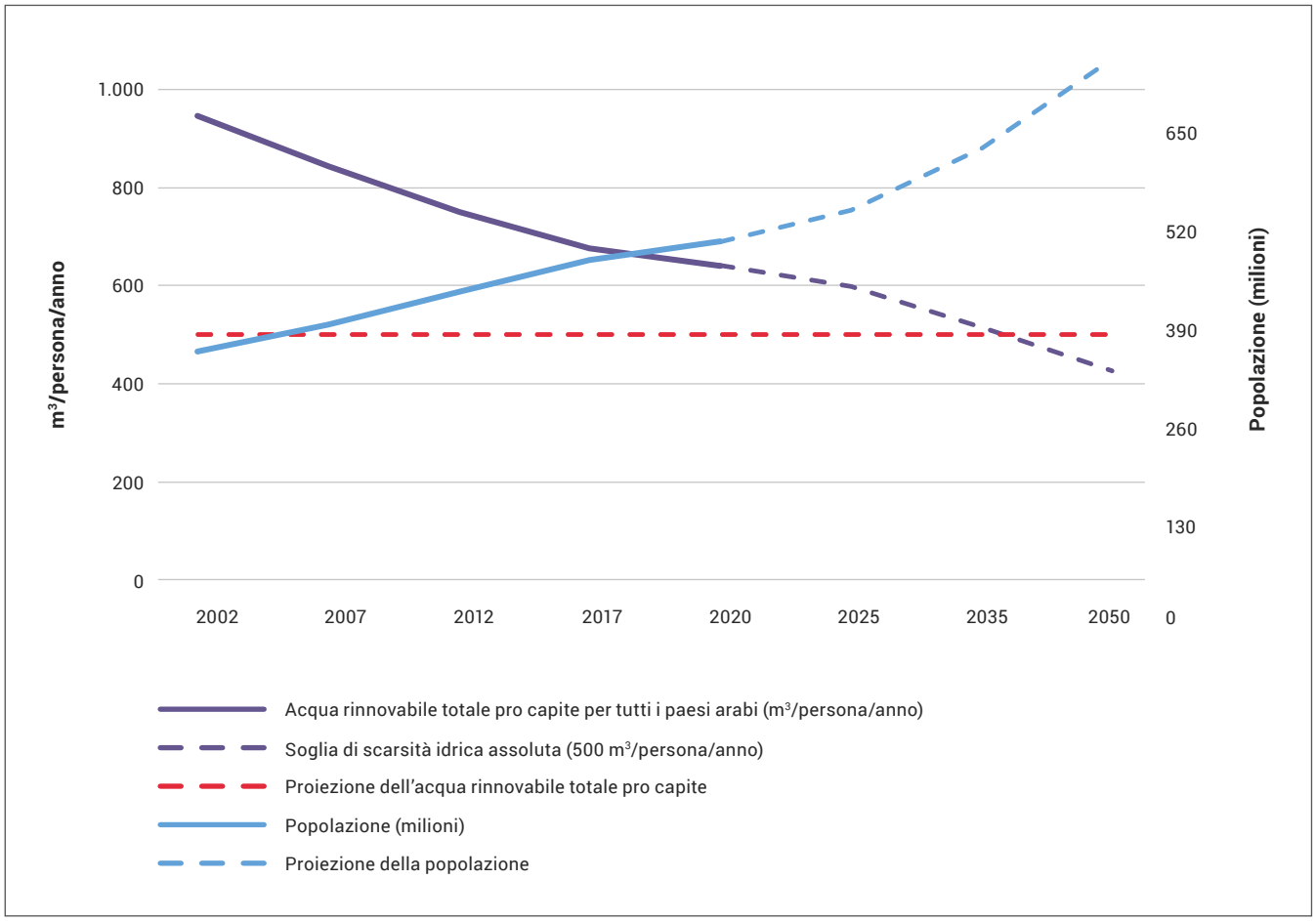
7.4.4 Conclusioni

Le attività umane e gli effetti dei cambiamenti climatici rappresentano una notevole minaccia per le montagne e i ghiacciai della regione dell'Asia e del Pacifico, intensificando le complesse sfide legate all'acqua che tale regione deve affrontare. Risultano dunque fondamentali soluzioni integrate capaci di aumentare la capacità di adattamento e la resilienza della regione, riducendo al contempo la pressione sui ghiacciai e sugli ecosistemi acquatici. Le iniziative di adattamento a livello transfrontaliero, basate sui principi di cooperazione e responsabilizzazione delle parti interessate, hanno dimostrato i benefici della collaborazione regionale. Sulla base di questi progressi, nella regione è necessario rafforzare gli approcci transfrontalieri che armonizzino le politiche del settore idrico con obiettivi climatici e socio-ambientali più ampi.

7.5 La regione araba

Le aree montane della regione araba vengono spesso trascurate, nonostante il ruolo importante che svolgono nel fornire risorse idriche e altri servizi ecosistemici. Ospitano anche fiorenti comunità e centri di attività economiche per il turismo, l'agricoltura e l'industria, che spesso dipendono da risorse di acqua dolce in costante diminuzione, il che determina una riduzione dei quantitativi di acqua rinnovabile pro capite. Alla luce delle attuali previsioni relative alla crescita demografica, l'intera regione araba si troverà al di sotto della soglia di scarsità idrica assoluta entro il 2050 (figura 7.7).

Figura 7.7 Diminuzione dell'acqua rinnovabile pro capite relativa al passato e a previsioni future in base alla crescita demografica stimata nella regione araba, 2002-2050

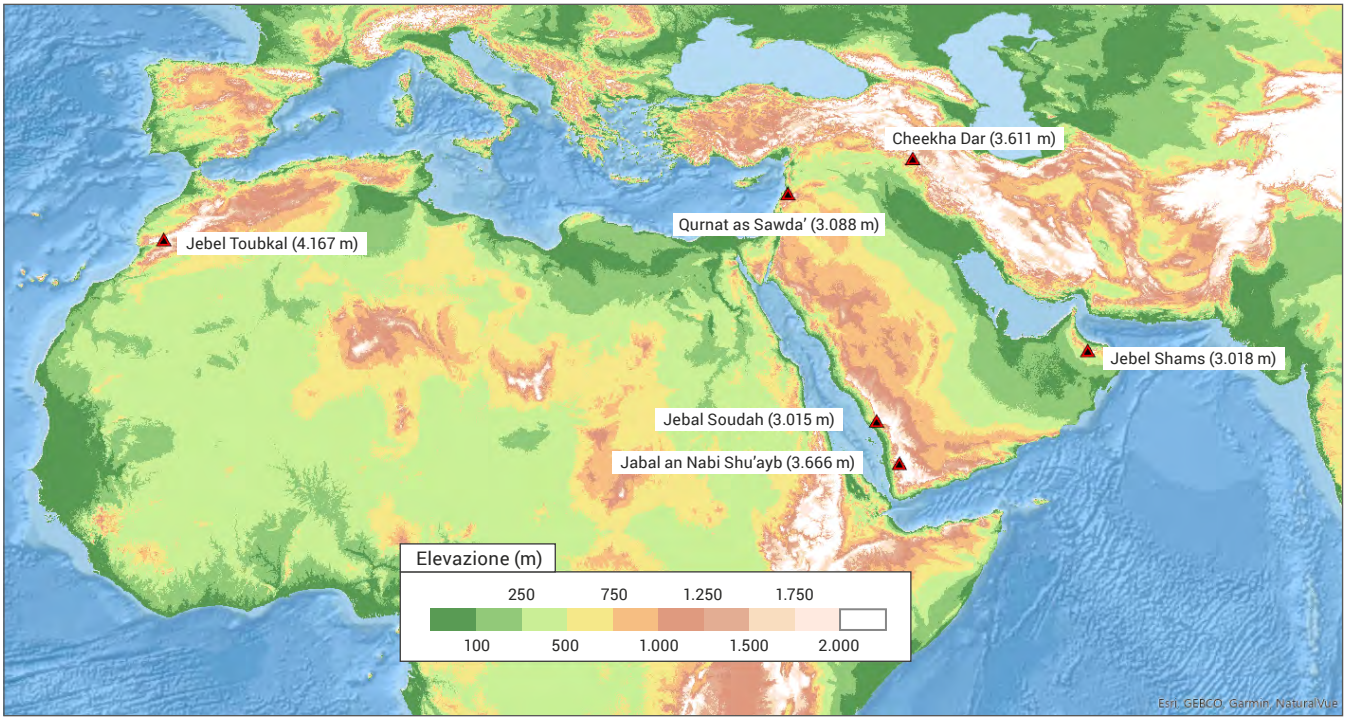


Fonte: adattato da ESCWA (2022, fig. 9, pag. 28).

Circa un terzo della popolazione che vive nella regione araba risiede ad un'altitudine superiore ai 600 metri[19]. Le nevicate si accumulano su diverse montagne durante l'inverno, tra cui il Monte Libano, i Monti dell'Atlante, i Monti Zagros e i Monti Asir (figura 7.8). Con l'aumento delle temperature in primavera, lo scioglimento del manto nevoso alimenta torrenti, bacini artificiali e acquiferi situati a quote più basse. L'acqua di fusione svolge un ruolo cruciale per il settore agricolo, in particolare alimentando le colture durante l'estate, quando le precipitazioni sono limitate. Due delle aree montuose interessate da questi fenomeni sono la catena del Monte Libano, che si estende per quasi tutta la lunghezza del Libano, e la catena dell'Atlante in Nordafrica, che si snoda attraverso Algeria, Marocco e Tunisia, raggiungendo la sua vetta più alta in Marocco.

[19] Calcoli degli autori, basati sui dati del sistema informativo geografico.

Figura 7.8 Cime e catene montuose nella regione araba



Fonte: autori.

Le aree montane della regione araba vengono spesso trascurate, nonostante il ruolo importante che svolgono nel fornire risorse idriche e altri servizi ecosistemici

7.5.1 Impatti dei cambiamenti climatici sulla copertura nevosa

L'acqua di fusione rilasciata dal manto nevoso è un'importante risorsa idrica per le regioni pianeggianti costiere e interne della regione araba, dove si concentrano popolazione e attività economiche. Il volume dell'equivalente in acqua del manto nevoso (SWE nell'acronimo inglese), ossia la massa idrica disponibile immagazzinata nel manto nevoso, può fornire informazioni chiave per attuare misure di gestione idrica appropriate (vedere sezione 2.1.1). Una diminuzione del parametro dello SWE comporta, a sua volta, una riduzione delle risorse idriche disponibili che dipendono dalla neve, come l'acqua per la ricarica degli acquiferi, il flusso delle sorgenti e l'umidità del suolo.

Alcune sorgenti alimentate da acquiferi nella regione araba, come la sorgente di Assal in Libano, vengono ricaricate principalmente dalla fusione della neve (Doummar et al., 2018). Secondo le stime, la neve contribuisce ad una percentuale compresa tra il 50% e il 60% del volume d'acqua dei fiumi e delle sorgenti libanesi, i quali alimentano gli acquiferi (Shaban, 2020). Tuttavia, calcolare lo SWE basandosi su un'approssimazione dello spessore e della densità della neve richiede molto tempo (Fayad, 2019). In ogni caso, sebbene i dati per condurre questo tipo di valutazione siano raramente disponibili nella regione araba, la durata e lo spessore del manto nevoso possono costituire buoni indicatori per determinare lo SWE (Sturm et al., 2010).

Secondo le stime, le temperature aumenteranno a causa degli effetti dei cambiamenti climatici (fino a 3,5°C e 4,5°C entro il 2100, rispettivamente sul Monte Libano e sulle montagne dell'Atlante, in base al periodo di riferimento 1986-2005; ESCWA et al., 2017), si prevede che le nevicate stagionali e le precipitazioni totali diminuiranno, incidendo sulla durata e sullo spessore della copertura nevosa e sulla disponibilità complessiva di risorse di acqua dolce. Secondo le stime storiche, ottenute dal telerilevamento condotto sul Monte Libano, circa due terzi

delle precipitazioni derivavano dalle nevicate, per un valore pari a 40-43 centrimetri di SWE in media all'anno (Shaban et al., 2004). Successive misurazioni *in situ* hanno rivelato che la durata della copertura nevosa era di circa 160 giorni e lo spessore della neve tra i 50 e gli 80 centimetri ad altitudini superiori a 2.700 metri s.l.m., il che si traduce in un valore di SWE compreso tra i 36 e i 158 centimetri (Fayad et al., 2017). Analogamente, la durata della copertura nevosa ad altezze elevate solitamente supera i 90 giorni sulle montagne dell'Atlante, determinando un valore di 20 centimetri di SWE, che supera gli 80 centimetri durante gli anni più umidi (Hanich et al., 2022).

La riduzione della durata e dello spessore della copertura nevosa influirà profondamente sulla disponibilità idrica complessiva

I risultati dei modelli climatici calcolati su domini regionali nel quadro EURO-CORDEX (Jacob et al., 2013), sono stati utilizzati per valutare gli impatti dei cambiamenti climatici sulla durata della copertura nevosa e sullo spessore della neve sul Monte Libano e nelle aree montane dell'Atlante. Il dominio geografico si estendeva al Nordafrica e al Mediterraneo orientale, con una risoluzione spaziale di 12,5 chilometri. I modelli sono stati selezionati in base alla loro idoneità ad analizzare la durata della copertura nevosa e l'altezza della neve (Frei et al., 2018), e hanno considerato due scenari climatici basati sulle previsioni di future concentrazioni di gas serra (RCP4.5 e RCP8.5 negli acronimi inglesi).

Con riferimento al Monte Libano e alle montagne dell'Atlante, le previsioni relative al manto nevoso mostrano una tendenza generale alla diminuzione, che dovrebbe approssimarsi alla scomparsa entro la fine di questo secolo. Le riduzioni previste della durata della copertura nevosa variano dal 7% al 10% per decennio per il Monte Libano (figura 7.9) e dal 6% al 10% per le montagne dell'Atlante (7.10). Analogamente, si prevede che lo spessore della neve diminuirà fino al 9% per decennio in entrambe le zone (figure 7.11 e 7.12).

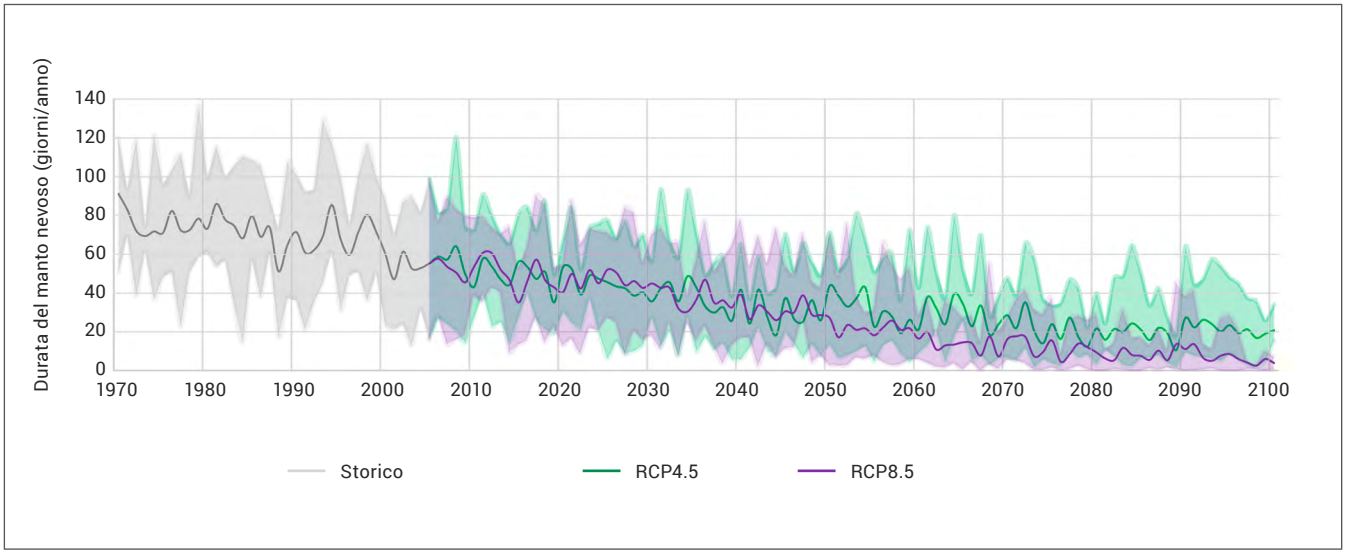
Secondo uno studio condotto sul Monte Libano, le previsioni indicano che il limite della neve, che raggiunge i 1.500 metri s.l.m., si sposterà a 1.700 metri s.l.m. entro il 2050, e a 1.900 metri s.l.m. entro il 2090. Inoltre, in primavera la neve si scioglierà in anticipo, influenzando la ricarica degli acquiferi e il flusso delle sorgenti e riducendo così la fornitura di acqua per l'irrigazione (MoE/UNDP/GEF, 2015). Tali previsioni in merito alla riduzione della copertura nevosa segnalano una diminuzione complessiva dell'approvvigionamento idrico, in particolare durante la stagione secca, quando è più necessario per l'irrigazione. Anche i servizi idrici e igienico-sanitari potrebbero risentire della minore disponibilità di risorse idriche complessive nel lungo periodo.

7.5.2 Misure di adattamento

La riduzione della durata e dello spessore della copertura nevosa influirà profondamente sull'idrologia della neve, sui valori dello SWE e sulla disponibilità idrica complessiva: ciò richiede valide misure di adattamento. Il Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico ha identificato diverse condizioni favorevoli che potrebbero essere utilizzate per promuovere l'adattamento ai cambiamenti climatici nella regione araba. Tra queste, lo sviluppo delle competenze per ampliare le conoscenze sugli impatti dei cambiamenti climatici, la responsabilizzazione dei gruppi vulnerabili (tra cui donne e comunità rurali) quali soggetti chiave, nonché l'utilizzo di piattaforme per effettuare previsioni e stime (IPCC, 2022).

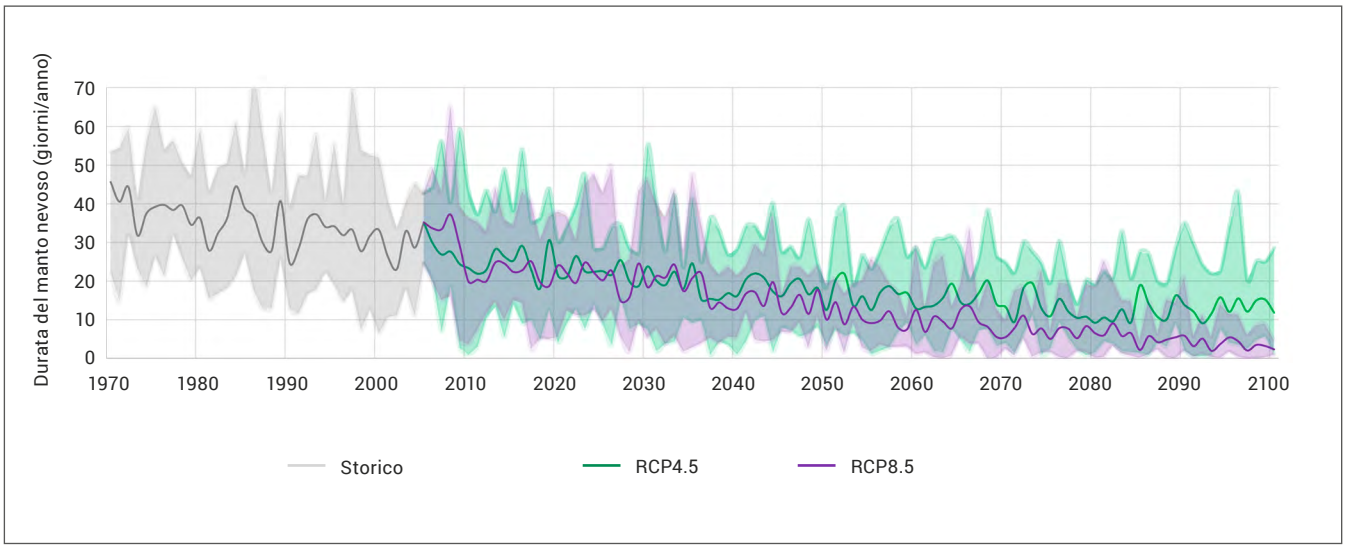
L'industria dei servizi, compreso il settore del turismo invernale, impiega il 63% delle donne lavoratrici in Libano. Pertanto, è fondamentale sostenere l'occupazione femminile attraverso lo sviluppo delle competenze e il finanziamento di nuove attività economiche, stimolando il potenziale di adattamento al calo delle nevicate previsto e al conseguente impatto sulle attività turistiche invernali (ESCWA/UNFPA/NCLW, 2022). Sempre in Libano, le donne rappresentano inoltre il 43% della forza lavoro nel settore agricolo: necessitano quindi di programmi e finanziamenti utili a contrastare gli eventuali impatti della riduzione dello scioglimento delle nevi sulle risorse idriche per l'irrigazione e sul loro reddito (UN Women, 2023).

Figura 7.9 Serie temporale della durata della copertura nevosa annuale sul Monte Libano (oltre i 2.000 metri sul livello del mare), 1970-2100



Fonte: autori, sulla base di sei output selezionati dalla modellazione climatica regionale EURO-CORDEX.

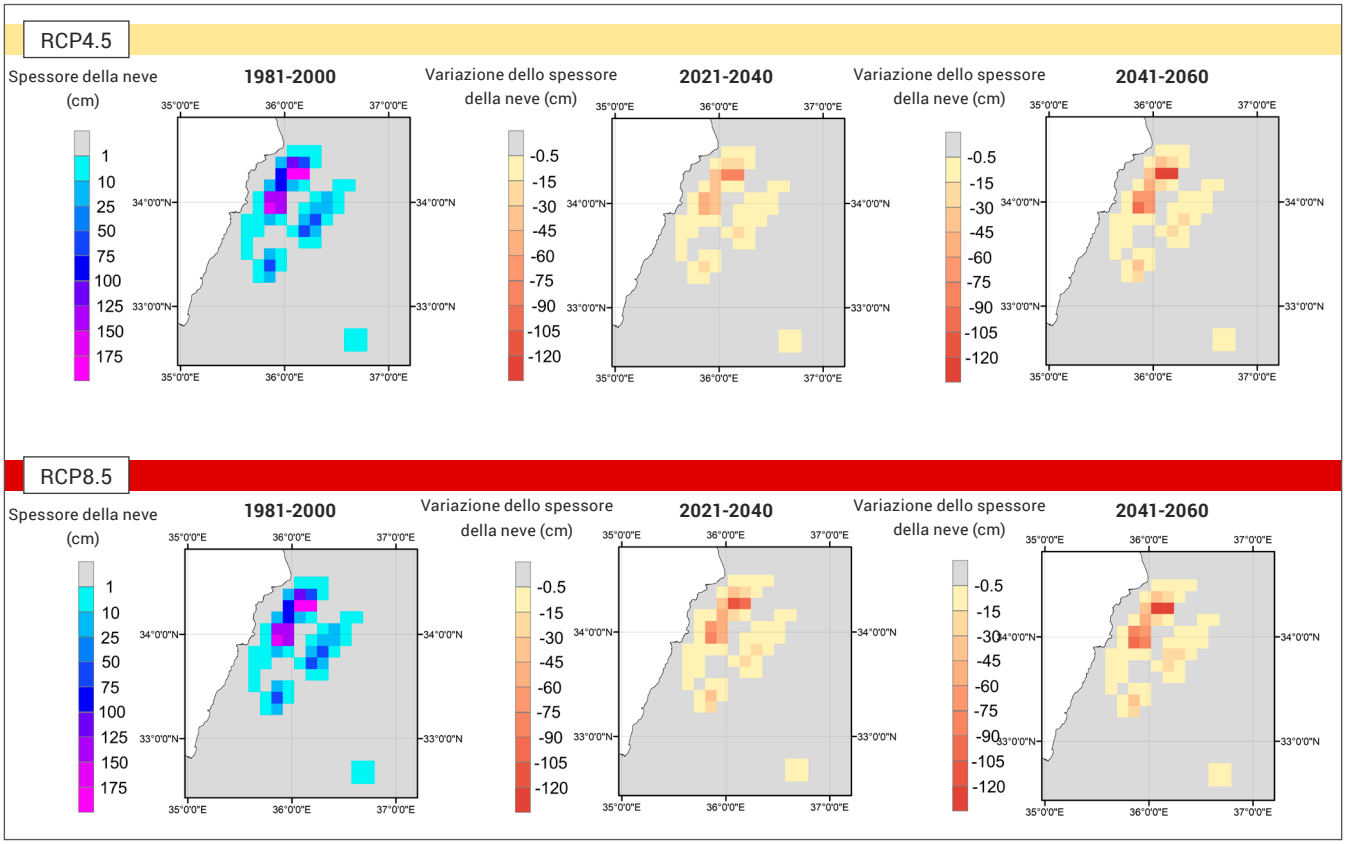
Figura 7.10 Serie temporale della durata della copertura nevosa annuale sulle montagne dell'Atlante (oltre i 2.000 metri sul livello del mare), 1970-2100



Fonte: autori, sulla base di sei output selezionati dalla modellazione climatica regionale EURO-CORDEX.

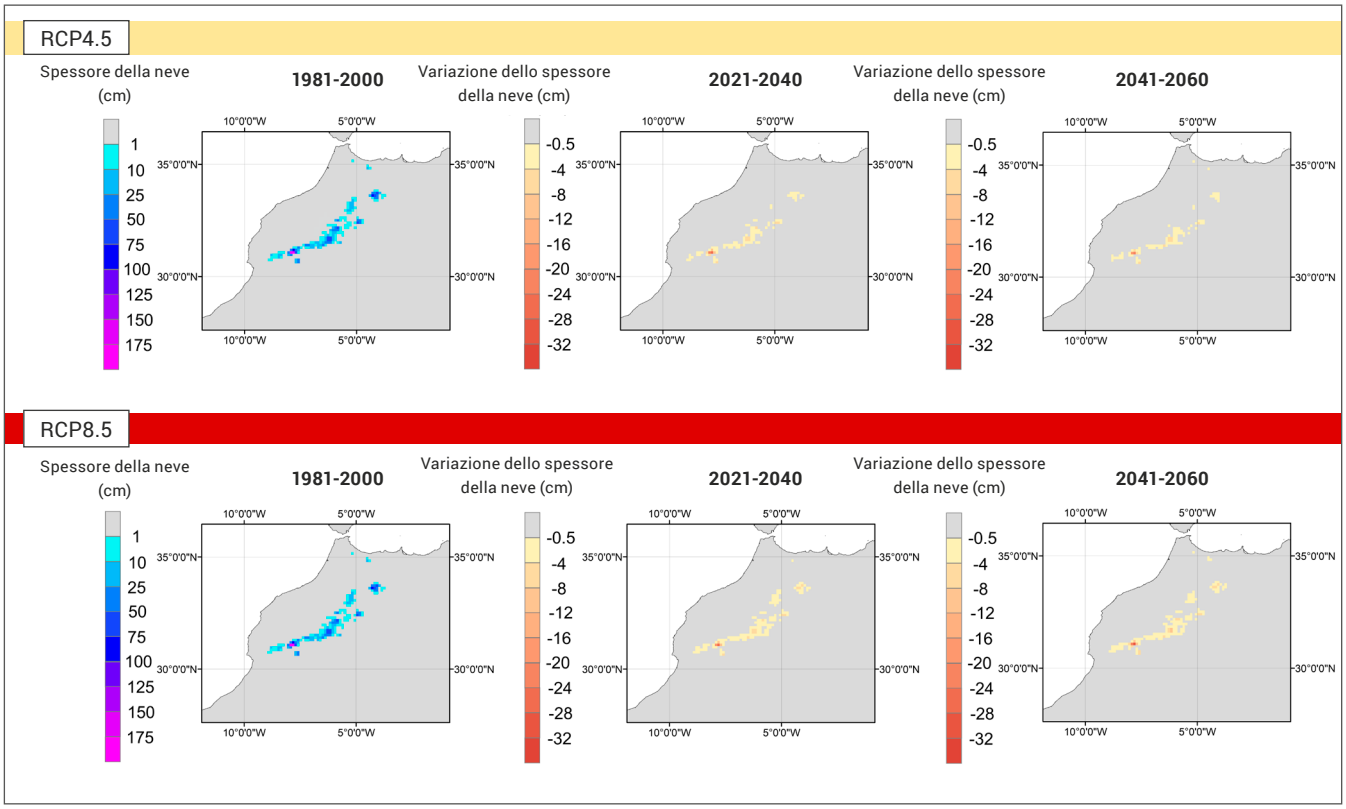
Per il bacino del Nahr al Kalb, in Libano, che comprende parte del Monte Libano, è stato sviluppato un pacchetto in materia di progettazione e resilienza per la gestione dei bacini idrografici a prova di clima. È basato sui modelli di previsione climatica elaborati dall'Iniziativa regionale per la valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche e la vulnerabilità socioeconomica nella regione araba (RICCAR). Il bacino comprende il comune di Kfardebian, riconosciuto nel 2024 come capitale araba del turismo invernale. I cambiamenti climatici avranno effetti negativi sulle comunità che dal punto di vista economico dipendono fortemente dal turismo invernale. Questi impatti includeranno la riduzione dei redditi familiari per coloro che traggono sostentamento dalle entrate del turismo invernale, a causa di stagioni sciistiche più brevi e di un numero inferiore di turisti.

Figura 7.11 Variazione dello spessore medio stagionale della neve (ottobre-marzo) sul Monte Libano nei periodi 1981-2000, 2021-2040 e 2041-2060



Fonte: autori, sulla base di sei output selezionati dalla modellazione climatica regionale EURO-CORDEX.

Figura 7.12 Variazione dello spessore medio stagionale della neve (ottobre-marzo) sulle montagne dell'Atlante nei periodi 1981-2000, 2021-2040 e 2041-2060



Fonte: autori, sulla base di sei output selezionati dalla modellazione climatica regionale EURO-CORDEX.

La ricarica controllata degli acquiferi è un'altra misura di adattamento per i bacini idrografici che potrebbe essere impiegata

Più nel dettaglio, il pacchetto di progettazione e resilienza ha suggerito diversi interventi, tra cui la diversificazione dei mezzi di sussistenza attraverso un turismo sostenibile capace di guardare oltre le attività invernali. Ciò comprende la promozione di un agriturismo e un ecoturismo incentrati sulla natura durante tutto l'anno. A chi è responsabile delle politiche è stato consigliato di identificare e mappare le attrazioni locali, fornire attività di sostegno e sviluppo delle competenze alle imprese locali, realizzare le infrastrutture necessarie (come ripristinare i sentieri escursionistici) e fornire materiali di comunicazione adeguati per attrarre visitatori. Il bacino comprende anche terreni agricoli, in particolare destinati alla coltivazione del melo e altri alberi da frutto. In questo contesto, la costruzione di laghi collinari (ossia di serbatoi) è raccomandata come opzione economicamente fattibile per aumentare lo stoccaggio dell'acqua e contribuire ad alimentare l'irrigazione durante la lunga stagione secca (ESCWA/ACSAD/Ministero dell'energia e dell'acqua del Libano/FAO, 2022). Questo è un esempio del lavoro in atto per sostenere le popolazioni e le comunità di montagna nell'affrontare gli impatti irreversibili dei cambiamenti climatici e la diminuzione di importanti risorse idriche. Le stesse attività suggerite possono contribuire a mitigare gli impatti ambientali negativi causati dalla pressione del turismo invernale, che ha determinato un aumento di inquinamento, deforestazione e riduzione della qualità della neve in aree del Libano come Tannourine (Delly, 2024).

La ricarica controllata degli acquiferi è un'altra misura di adattamento per i bacini idrografici che potrebbe essere impiegata in contesti simili. L'acqua raccolta durante l'inverno potrebbe essere utilizzata in estate per mitigare la ridotta disponibilità di acqua dovuta agli impatti dei cambiamenti climatici sulle aree montane della regione araba, compresa la perdita del manto nevoso.

In Marocco, le strategie di sviluppo rurale devono essere meglio adattate ai cambiamenti climatici, in modo da migliorare la resilienza del territorio e dei mezzi di sussistenza, dato che gli effetti di tali cambiamenti influiscono sulla copertura nevosa e sulla disponibilità di acqua presso le comunità montane. A tal fine, è necessario aumentare la disponibilità di dati che colgano le diverse visioni e priorità degli attori in gioco rispetto allo sviluppo rurale. Il Green Morocco Plan, avviato nel 2008, sta portando all'inaugurazione di una nuova politica di gestione delle risorse naturali e di promozione delle conoscenze indigene in materia di salvaguardia degli ecosistemi. Il piano, che incoraggia l'adozione di misure di adattamento ai cambiamenti climatici, punta a migliorare l'agricoltura su piccola scala nelle aree marginali, sovvenzionando la piantumazione di alberi sui terreni in pendenza e applicando tecniche di efficienza idrica come l'irrigazione a goccia, il che costituisce una misura adattativa alla diminuzione delle risorse idriche disponibili prevista (Agence Pour Le Développement Agricole, s.d.). Questi interventi dipendono dalla gestione integrata delle risorse ambientali (acqua, foreste, suolo, ecc.) su scala di grandi bacini idrografici, per superare la diversa disponibilità di acqua e le varie richieste di tale risorsa nelle aree montane e di pianura.

7.5.3 Conclusioni

Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle precipitazioni e sulle nevicate stagionali, e quindi sulla disponibilità complessiva di acqua nella regione araba, sono già evidenti e probabilmente si aggraveranno in futuro. Il manto nevoso svolge un ruolo cruciale nell'immagazzinare l'acqua da rilasciare durante la stagione secca. Tuttavia, l'accumulo di acqua sta diminuendo a causa dei cambiamenti climatici: nel contesto delle comunità montane della regione araba in generale, e più nello specifico in Libano e Marocco, ciò avrà ripercussioni su attività economiche come turismo e agricoltura. Per affrontare le sfide future, sono necessarie misure di adattamento al clima intersettoriali, tra cui soluzioni basate sulla natura, tecniche di irrigazione e di selezione delle colture più efficienti e strategie di diversificazione economica intelligenti.

Riferimenti bibliografici

Adhikari, U., Nejadhashemi, A. P. e Herman, M. R. 2015. A review of climate change impacts on water resources in East Africa. *Transactions of the ASABE*, vol. 58, N. 6, pagg. 1493-1507. doi.org/10.13031/trans.58.10907.

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. e Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Agence Pour Le Développement Agricole. s.d. Approaches to Implementation of the Two Pillars of the Green Morocco Plan. Sito web dell'Agence Pour Le Développement Agricole. www.ada.gov.ma/en/approaches-implementation-two-pillars-green-morocco-plan.

Aguas Andinas. 2024. *Resumen de Información ESG*. www.aguasandinasinversionistas.cl/~/media/Files/A/Aguas-IR-v2/sustainability-reports/es/2023/ESG%20INFORMATION%20SUMMARY%202023%20sv%20-%20Espaol.pdf. (In spagnolo.)

AIE (Agenzia internazionale per l'energia). 2021. *Climate Impacts on Latin American Hydropower*. Parigi, AIE. www.iea.org/reports/climate-impacts-on-latin-american-hydropower.

Alberton, M., Andresen, M., Citadino, F., Egerer, H., Fritsch, U., Götsch, H., Hoffmann, C., Klemm, J., Mitrofanenko, A., Musco, E., Noellenburg, N., Pettita, M., Renner, K. e Zebisch, M. 2017. *Outlook on Climate Change Adaptation in the Carpathian Mountains*. Mountain Adaptation Outlook Series. Nairobi/Vienna/Arendal, Norvegia/Bolzano, Italia, Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP)/GRID-Arendal/Eurac Research. www.grida.no/publications/381.

Alford, D., Kamp, U. e Pan, C. 2015. *The Role of Glaciers in the Hydrologic Regime of the Amu Darya and Syr Darya Basins*. Report No. ACS12128. Washington DC, Banca mondiale. https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/94d8d53f-c8ff-53c7-899b-3d01f5eb8c85/content.

Altomonte, H. e Sánchez, R. J. 2016. *Hacia una Nueva Gobernanza de los Recursos Naturales en América Latina y el Caribe*. Libros de la CEPAL No. 139. LC/G.2679-P. Santiago, Commissione economica delle Nazioni Unite per l'America Latina e i Caraibi (UNECLAC). www.cepal.org/es/publicaciones/40157-nueva-gobernanza-recursos-naturales-america-latina-caribe. (In spagnolo.)

Alweny, S., Nsengiyumva, P. e Gatarabirwa, W. 2014. *Africa Sustainable Mountain Development Technical Report No. 1*. Kampala/Cambridge, Regno Unito, Albertine Rift Conservation Society (ARCOS). doi.org/10.13140/RG.2.2.11656.16640.

Ariza, C., Maselli, D. e Kohler, T. 2013. *Mountains: Our Life, Our Future. Progress and Perspectives on Sustainable Mountain Development from Rio 1992 to Rio 2012 and Beyond*. Berna, Agenzia svizzera per lo sviluppo e la cooperazione (SDC)/Centro per lo sviluppo e l'ambiente (CDE). https://boris.unibe.ch/47827/1/Mountain_Synthesis_Report.pdf.

Autorità di gestione del bacino dei fiumi Bug occidentale e Sian in Ucraina (inedito). Informazione ottenuta da Kruta N., Autorità di gestione del bacino dei fiumi Bug occidentale e Sian, comunicazione a uso privato, 14 maggio 2024.

Autorità di gestione del bacino del Dnestr. 2024. З Міжнародним днем Дністра! Sito web dell'Autorità di gestione del bacino del Dnestr. https://vodaif.gov.ua/z-mizhnarodnym-dnem-dnistra-2/. (In ucraino; consultato il 27 novembre 2024.)

Awange, J. 2022. GHA's water tower: Ethiopian highlands. *Food Insecurity & Hydro-Climate in Greater Horn of Africa: Potential for Agriculture Amidst Extremes*. Cham, Svizzera, Springer, pagg. 107-142. doi.org/10.1007/978-3-030-91002-0_6.

Banca mondiale. 2023. Madagascar: Making an Impact on Land Reform and Agriculture. Results Briefs. Sito web della Banca mondiale. www.worldbank.org/en/results/2023/11/19/madagascar-making-an-impact-on-land-reform-and-agriculture.

——. s.d. Dati del gruppo della Banca mondiale. Agriculture, forestry, and fishing, value added (% of GDP) – Madagascar. Sito web della Banca mondiale. https://data.worldbank.org/indicator/NV.AGR.TOTL.ZS?end=2023&locations=MG&start=2023&view=bar. (Consultato il 29 novembre 2024.)

Banks, J. R., Heinold, B. e Schepanski, K. 2022. Impacts of the desiccation of the Aral Sea on the Central Asian dust life cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 127, N. 21, articolo e2022JD036618. doi.org/10.1029/2022JD036618.

BIS (Banca interamericana di sviluppo). 2020. *Impactful Innovations: Lessons from Family Agriculture on Adaptation to Climate Change in Latin America and the Caribbean*. 2015 Competition for Successful Cases. Washington DC, BIS. https://publications.iadb.org/es/publications/english/viewer/Impactful-Innovations-Lessons-from-Family-Agriculture-on-Adaptation-to-Climate-Change-in-Latin-America-and-the-Caribbean.pdf.

Bodin, X. 2019. Impactos de la evolución de los glaciares rocosos en los Andes semí-áridos. M. Turrel, *Luis Lliboutry – El Hombre que Descifró los Glaciares*. Santiago, Aguas Andinas, pagg. 241-242. https://hal.science/hal-03083932. (In spagnolo.)

Bown, F., Rivera, A. e Acuña, C. 2008. Recent glacier variations at the Aconcagua basin, Central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, vol. 48, pagg. 43-48. doi.org/10.3189/172756408784700572.

Bretas, F., Casanova, G., Crisman, T., Embid, A., Martin, L., Miralles, F. e Muñoz, R. 2020. *Agua para el Futuro: Estrategia de Seguridad Hídrica para América Latina y el Caribe*. Banca interamericana per lo sviluppo (BIS). doi.org/10.18235/0002816. (In spagnolo.)

Cajar. 2024. Alerta urgente: Sobre desplazamiento forzado masivo del pueblo Wiwa de la Sierra Nevada de Santa Marta. Sito web del Cajar, 27 febbraio 2024. www.colectivodeabogados.org/organizaciones-de-derechos-humanos-denunciamos-desplazamiento-masivo-del-pueblo-indigena-wiwa-de-la-snsm-alerta-urgente/. (In spagnolo.)

Canal Capital. 2023. ¿De dónde viene el agua que consumimos en Bogotá? Sito web di Canal Capital, 30 agosto 2023. www.canalcapital.gov.co/eureka/donde-viene-el-agua-de-bogota. (In spagnolo.)

Canales Sierra, L. 2018. *Construcción de Diques para la Cosecha de Agua en Lagunas Periglaciares*. Lima, CARE Perú. (In spagnolo.)

Capitani, C., Garedew, W., Mitiku, A., Berecha, G., Hailu, B. T., Heiskanen, J., Hurskainen, P., Platts, P. J., Siljander, M., Pinard, F., Johansson, T. e Marchant, R. 2019. Views from two mountains: Exploring climate change impacts on traditional farming communities of Eastern Africa highlands through participatory scenarios. *Sustainability Science*, vol. 14, pagg. 91-203. doi.org/10.1007/s11625-018-0622-x.

Caretta, M. A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., Lissner, T. K., Liu, J., López Gunn, E., Morgan, R., Mwanga, S. e Supratid, S. 2022. Water. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 551-712. doi.org/10.1017/9781009325844.006.

CAWater-info (Portal of Knowledge for Water and Environmental Issues in Central Asia). s.d. Knowledge Base. Degradation of Glaciers. Sito web del

CAWater-info. Interstate Commission for Water Coordination of Central Asia (ICWC). http://cawater-info.net/bk/7-3_e.htm. (Consultato il 27 novembre 2024.)

Chaperon, P., Danloux, J. e Ferry, L. 1993. *Fleuves et rivières de Madagascar – Ony sy renirano eto Madagasikara*. Collection Monographies hydrologiques, No. 10. Parigi, ORSTOM. (In francese.)

Chen, Z., Gao, X. e Lei, J. 2022. Dust emission and transport in the Aral Sea region. *Geoderma*, vol. 428, articolo 116177. doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116177.

CHR (Commissione internazionale per l'idrologia del bacino del Reno). 2022. When the Melt Water is Missing: More Often Low Water Expected in the Rhine in the Future. Sito web della CHR, 11 luglio 2022. www.chr-khr.org/en/news/when-melt-water-missing-more-often-low-water-expected-rhine-future.

Climate-ADAPT. 2024. Adaptation in Carpathian Mountains. Sito web del Climate-ADAPT. https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/countries-regions/transnational-regions/carpathian-mountains/general. (Consultato il 12 novembre 2024.)

Climate Diplomacy. 2022. How Much Progress Has Been Made on Kyrgyz-Uzbek Water Cooperation? Sito web del Climate Diplomacy, 1 luglio 2022. https://climate-diplomacy.org/magazine/cooperation/how-much-progress-has-been-made-kyrgyz-uzbek-water-cooperation.

Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales. 2022. Proyecto de Ley. Sobre Protección de Glaciares. Boletines No. 11.876-12 y 4.205-12, refundidos. Congreso Nacional de Chile. www.camara.cl/legislacion/ProyectosDeLey/tramitacion.aspx?prmID=12397&prmBOLETIN=11876-12. (In spagnolo).

Commissione per il Dnestr. 2024a. Working Group on Ecosystems and Biodiversity. Sito web della Commissione per il Dnestr. https://dniester-commission.org/en/joint-management/dniester-commission/working-groups/working-group-on-ecosystems-and-biodiversity/.

——. 2024b. Working Group on Emergencies. Sito web della Commissione per il Dnestr. https://dniester-commission.org/en/joint-management/dniester-commission/working-groups/working-group-on-emergencies/.

Cullen, N. J., Sirguey, P., Mölg, T., Kaser, G., Winkler, M. e Fitzsimmons, S. J. 2013. A century of ice retreat on Kilimanjaro: The mapping reloaded. *The Cryosphere*, vol. 7, N. 2, pagg. 419-431. doi.org/10.5194/tc-7-419-2013.

Delly, F. Z. 2024. Balancing tourism and environmental conservation in Lebanon's changing climate. *Beirut Political Review*, 28 febbraio 2024. https://beirutpoliticalreview.org/publications/f/the-environment-tourism-and-lebanons-changing-climate.

Descroix, L., Faty, B., Manga, S. P., Diedhiou, A. B., Lambert, L. A., Soumaré, S., Andrieu, J., Ogilvie, A., Fall, A., Mahé, G., Sombily Diallo, F. B., Diallo, A., Diallo, K., Albergel, J., Tanimoun, B. A., Amadou, I., Bader, J. C., Barry, A., Bodian, A., Boulvert, Y., Braquet, N., Couture, J. L., Dacosta, H., Dejacquelot, G., Diakité, M., Diallo, K., Gallese, E., Ferry, L., Konaté, L., Nka Nnomo, B., Olivry, J. C., Orange, D., Sakho, Y., Sambou, S. e Vandervaere, J. P. 2020. Are the Fouta Djallon highlands still the water tower of West Africa? *Water*, vol. 12, N. 11, articolo 2968. doi.org/10.3390/w12112968.

Devenish, C. e Gianella, C. (a cura di). 2012. *20 years of Sustainable Mountain Development in the Andes: From Rio 1992 to 2012 and Beyond*. Regional Report. Consorcio para el Desarrollo Sostenible en la Ecorregión Andina (CONDESAN). https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/17b3c4fe-863e-4475-b12e-269d5578be58/content.

Dickerson, S., Cannon, M. e O'Neill, B. 2021. Climate change risks to human development in Sub-Saharan Africa: A review of the literature. *Climate and Development*, vol. 14, N. 6, pagg. 1-19. doi.org/10.1080/17565529.2021.1951644.

Doummar, J., Kassem, A. H. e Gurdak, J. J. 2018. Impact of historic and future climate on spring recharge and discharge based on an integrated numerical modelling approach: Application on a snow-governed semi-arid karst catchment area. *Journal of Hydrology*, vol. 565, pagg. 636-649. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.062.

Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P. e Ruiz, L. 2019. Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, vol. 12, pagg. 802-808. doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5.

EAC/UNEP/GRID-Arendal (Comunità dell'Africa orientale/ Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente/GRID-Arendal). 2016. *Sustainable Mountain Development in East Africa in a Changing Climate*. Mountain Adaptation Outlook Series. Arusha, Repubblica Unita della Tanzania/ Nairobi/Arendal, Norvegia, EAC/UNEP/GRID-Arendal. www.grida.no/publications/119.

EC IFAS (Executive Committee of the International Fund for Saving the Aral Sea). 2024. Water Resources. Sito web dell'EC IFAS. https://ecifas.kz/en/drugie-resursy/vodnye-resursy-basseyna-aralskogo-morya.

ESCAP/UNEP/OIL/UNFCCC RCC Asia-Pacifico/UNIDO (Commissione economica e sociale per l'Asia e il Pacifico/Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente/Organizzazione internazionale del lavoro/Centro di collaborazione regionale per l'Asia-Pacifico del Segretariato della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici/ Organizzazione delle Nazioni Unite per lo sviluppo industriale). 2023. *2023 Review of Climate Ambition in Asia and the Pacific: Just Transition Towards Regional Net-Zero Climate Resilient Development*. Nazioni Unite. www.unescap.org/kp/2023/2023-review-climate-ambition-asia-and-pacific-just-transition-towards-regional-net-zero.

ESCWA (Commissione economica e sociale delle Nazioni Unite per l'Asia occidentale). 2022. *Groundwater in the Arab Region – ESCWA Water Development Report 9*. Beirut, Nazioni Unite. www.unescwa.org/publications/water-development-report-9.

ESCWA (Commissione economica e sociale delle Nazioni Unite per l'Asia occidentale) et al. 2017. *Arab Climate Change Assessment Report – Main Report*. Beirut, Nazioni Unite. www.unescwa.org/publications/riccar-arab-climate-change-assessment-report.

ESCWA/ACSAD/Ministero dell'Energia e dell'Acqua del Libano/FAO (Commissione economica e sociale delle Nazioni Unite per l'Asia occidentale/Centro arabo per gli studi sulle zone aride e le terre secche/Ministero dell'Energia e dell'Acqua del Libano/Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura). 2022. *Climate-Proof Watershed Management Design and Resilience Package: Nahr el Kalb Basin*. Rapporto tecnico dell'Iniziativa regionale per la valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche e sulla vulnerabilità socioeconomica nella regione araba (RICCAR). Beirut, Nazioni Unite. www.unescwa.org/sites/default/files/pubs/pdf/climate-proof-watershed-management-design-resilience-nahr-el-kalb_0.pdf.

ESCWA/UNFPA/NCLW (Commissione economica e sociale delle Nazioni Unite per l'Asia occidentale/Fondo delle Nazioni Unite per la popolazione/Commissione nazionale per le donne libanesi). 2022. *Women's Economic Participation in Lebanon: A Mapping Analysis of Laws and Regulations*. Beirut, Nazioni Unite. www.unescwa.org/sites/default/files/pubs/pdf/women-economic-participation-lebanon-mapping-analysis-laws-english.pdf.

FAO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura). 2000. Ventiseiesima Conferenza Regionale della FAO per l'America Latina e i Caraibi, Mérida, Messico, 10-14 aprile 2000. Sustainable Development in Mountain Areas. www.fao.org/4/x4442e/x4442e.htm.

——. 2015. *Mapping the Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity*. Roma, FAO. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i5175e.

——. s.d. AQUASTAT Dissemination System. Sito web della FAO. https://data.apps.fao.org/aquastat/?lang=en&share=f-97207b8a-f0f7-4b27-8a0b-64ba7477c4e4. (Consultato il 20 novembre 2024.)

FAO/UNEP (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura/Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente). 2023. *Restoring Mountain Ecosystems: Challenges, Case Studies and Recommendations for Implementing the UN Decade Principles for Mountain Ecosystem Restoration*. Roma/Nairobi, FAO/UNEP. doi.org/10.4060/cc9044en.

Fayad, A. 2019. *Evaluation of the snow water resources in Mount Lebanon using observations and modelling.* Tesi di dottorato, idrologia, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2017. NNT: 2017TOU30364. tel-01755397v2. https://theses.hal.science/tel-01755397v2.

Fayad, A., Gascoin, S., Faour, G., Fanise, P., Drapeau, L., Somma, J., Fadel, A., Al Bidar, A. e Escadafal, R. 2017. Snow observations in Mount Lebanon (2011–2016). *Earth System Science Data*, vol. 9, N. 2, pagg. 573-587. doi.org/10.5194/essd-9-573-2017.

Frazier, A. G. e Brewington, L. 2020. Current changes in alpine ecosystems of Pacific Islands. *Encyclopedia of the World's Biomes*, pagg. 607-619. Elsevier. doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11881-0.

Frei, P., Kotlarski, S., Liniger, M. A. e Schär, C. 2018. Future snowfall in the Alps: Projections based on the EURO-CORDEX regional climate models. *The Cryosphere*, vol. 12, N. 1, pagg. 1-24. doi.org/10.5194/tc-12-1-2018.

Gagné, K., Rasmussen, M. B. e Orlove, B. 2014. Glaciers and society: Attributions, perceptions, and valuations. *Wiley Interdisciplinary Reviews (WIREs): Climate Change*, vol. 5, N. 6, pagg. 793-808. doi.org/10.1002/wcc.315.

García Pachón, M. P. 2018. La Conservación de Glaciares y Humedales como Ecosistemas Proveedores de Agua Dulce a Través del SINAP. A. Embid Irujo and M. P. García Pachón (a cura di), *La Conservación de la Naturaleza: Su Régimen Jurídico en Colombia y España*. Bogotá, Universidad Externado de Colombia, pagg. 85-115. doi.org/10.57998/bdigital.handle.001.2118. (In spagnolo.)

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H. e Veloso-Águila, D. 2019. The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, vol. 40, N. 1, pagg. 421-439. doi.org/10.1002/joc.6219.

Ghosh, D. 2021. Alps Mountain Range. Sito web del WorldAtlas, 18 marzo 2021. www.worldatlas.com/mountains/alps-mountain-range.html.

GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH). 2021. *Regional Action Plan for a Joint Political Dialogue on Climate, Environment and Security.* GIZ. https://greencentralasia.org/en/category/regional-action-plan/.

——. 2023. *Regional Climate Change Adaptation Strategy for Central Asia.* GIZ. https://greencentralasia.org/en/regional-climate-change-adaptation-strategy-in-central-asia/.

Global Forest Watch. s.d. Madagascar. Sito web del Global Forest Watch. www.globalforestwatch.org/dashboards/country/MDG/. (Consultato il 2 dicembre 2024.)

González Molina, S. e Vacher, J.-J. (a cura di). 2014. *El Perú Frente al Cambio Climático: Resultados de Investigaciones Franco-peruanas*. Institut de Recherche pour le Devélopment (IRD). https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/1029. (In spagnolo.)

Goodman, S. M., Raherilalao, M. J. e Wohlhauser, S. (a cura di). 2021. *Les aires protégées terrestres de Madagascar: Leur histoire, description et biota*. Antananarivo, Association Vahatra. (In francese.)

Governo dell'Argentina. 2010. *Ley 26.639: Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial*. https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/170000-174999/174117/norma.htm. (In spagnolo.)

Hanich, L., Chehbouni, A., Gascoin, S., Boudhar, A., Jarlan, L., Tramblay, Y., Boulet, G., Marchane, A., Baba, M. W., Kinnard, C., Simonneaux, V., Fakir, Y., Bouchaou, L., Leblanc, M., Le Page, M., Bouamri, H., Er-Raki, S. e Khabba, S. 2022. Snow hydrology in the Moroccan Atlas Mountains. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 42, articolo 101101. doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101101.

ICIMOD (Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna). 2017. Reaching the Most Vulnerable Across the Border: Community-Based Flood Early Warning Systems. Sito web dell'ICIMOD, 12 agosto 2017. www.icimod.org/article/reaching-the-most-vulnerable-across-the-border-community-based-flood-early-warning-systems/.

——. 2020. *The HKH Call to Action to Sustain Mountain Environments and Improve Livelihoods in the Hindu Kush Himalaya*. Summary. Kathmandu, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1.

——. 2023. *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook* [P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal e J. F. Steiner (a cura di)]. Kathmandu, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1028.

——. s.d. The Hindu Kush Himalaya Ministerial Mountain Summit 2020. Sito web dell'ICIMOD. www.icimod.org/hkhmms/.

ICPDR (Commissione internazionale per la protezione del fiume Danubio). 2014. The ICPDR and its observers: Inspiring wider interaction with stakeholders. *Danube Watch,* pagg. 25-27. www.icpdr.org/sites/default/files/nodes/documents/dw2014_1.pdf.

——. 2021. *Danube Flood Risk Management Plan: Update 2021*. Vienna, ICPDR. www.icpdr.org/sites/default/files/nodes/documents/dfrmp_update_2021_lores_0.pdf.

ICPR (Commissione internazionale per la protezione del Reno). 2022. ICPR to Start Updating Climate Change Adaptation Strategy in Autumn 2022: Third Extreme Low Water in 20 Years Underlines Urgency. Sito web dell'ICPR, 15 settembre 2022. www.iksr.org/en/press/press-releases/press-releases-individual-presentation/iksr-beginnt-ab-herbst-2022-mit-aktualisierung-der-strategie-zur-anpassung-an-den-klimawandel-drittes-extremes-niedrigwasser-in-20-jahren-unterstreicht-die-dringlichkeit?no_cache=1&sword list%5B0%5D=glacier&cHash=18f033335f10a05898b0ef4a1ce973a2.

IDEAM (Istituto di idrologia, meteorologia e studi ambientali). 2021. *Informe del Estado de los Glaciares Colombianos 2020*. Bogotá, IDEAM. www.siac.gov.co/glaciares. (In spagnolo.)

IFAD (Fondo internazionale per lo sviluppo agricolo). s.d. Madagascar. Sito web dell'IFAD. www.ifad.org/en/w/countries/madagascar. (Consultato il 2 dicembre 2024.)

Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B. J., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T. H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A. B., Viviroli, D., Wada, Y., Xiao, C., Yao, T. e Baillie, J. E. M. 2020. Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, vol. 577, N. 7790, pagg. 364-369. doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y.

IPCC (Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico). 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di)]. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009325844.

Jackson, M., Azam, M. F., Baral, P., Benestad, R., Brun, F., Muhammad, S., Pradhananga, S., Shrestha, F., Steiner, J. F. e Thapa, A. 2023. Consequences of climate change for the cryosphere in the Hindu Kush Himalaya. P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal e J. F. Steiner (a cura di), *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook*. Kathmandu, Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna (ICIMOD), pagg. 17-71. doi.org/10.53055/ICIMOD.1030.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Bøssing Christensen, O., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B. e Yiou, P. 2013. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, vol. 14, pagg. 563-578. doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2.

Jorio, L. e Reusser, K. 2019. Glaciers and the Changing Landscape in the Alps. Sito web di Swissinfo.ch, 26 agosto 2019. www.swissinfo.ch/eng/sci-tech/swiss-glaciers-series-3-000-4-500-metres_glaciers-and-the-changing-landscape-in-the-alps/45181238.

JPL (Jet Propulsion Laboratory). 2004. Photojournal. Sito web del JPL. National Aeronautics and Space Administration (NASA). https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia04965.

Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y. e Wang, H. 2020. A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere. *Earth-Science Reviews*, vol. 210, articolo 103346. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346.

Kanui, I., Kibwage, T. e Murangiri, M. R. 2016. Water tower ecosystems services and diversification of livelihood activities to neighbouring communities; A case study of Chyulu Hills water tower in Kenya. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International,* vol. 6, N. 4, pagg. 1-12. doi.org/10.9734/JGEESI/2016/26620.

Kennedy, C. M., Fariss, B., Oakleaf, J. R., Fa, J. E., Baruch-Mordo, S. e Kiesecker, J. 2023. Indigenous Peoples' lands are threatened by industrial development; Conversion risk assessment reveals need to support Indigenous stewardship. *One Earth*, vol. 6, pagg. 1032-1049. doi.org/10.1016/j.oneear.2023.07.006.

Kiplagat, J. K., Wang, R. Z. e Li, T. X. 2011. Renewable energy in Kenya: Resource potential and status of exploitation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, N. 6, pagg. 2960-2973. doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.023.

Klein, R. J. T., Midgley, G. F., Preston, B. L., Alam, M., Berkhout, F. G. H., Dow, K. e Shaw, M. R. 2014. Adaptation opportunities, constraints, and limits. C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea e L. L. White (a cura di), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contributo del Gruppo di lavoro II al Quinto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 899-943.doi.org/10.1017/CBO9781107415379.021.

Laurent, L., Buoncristiani, J.-F., Pohl, B., Zekollari, H., Farinotti, D., Huss, M., Mugnier, J.-L. e Pergaud, J. 2020. The impact of climate change and glacier mass loss on the hydrology in the Mont-Blanc massif. *Scientific Reports*, vol. 10, articolo 10420. doi.org/10.1038/s41598-020-67379-7.

Lourenco, M. e Woodborne, S. 2023. Defining the Angolan Highlands Water Tower, a 40 plus-year precipitation budget of the headwater catchments of the Okavango Delta. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 195, N. 7, pag. 859. doi.org/10.1007/s10661-023-11448-7.

Ludwig-Maximilians-Universität di Monaco di Baviera. 2018. *Revision and Update of the Danube Study.* Rapporto finale preparato per conto del Ministero federale per l'ambiente, la conservazione della natura, l'edilizia e la sicurezza nucleare della Germania, Ludwig-Maximilians-Universität di Monaco di Baviera e Commissione internazionale per la protezione del fiume Danubio (ICPDR). www.icpdr.org/sites/default/files/nodes/documents/danube_climate_adaptation_study_2018.pdf.

Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J.-P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. R. e Vicuña, S. 2014. Central and South America. V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea e L. L. White (a cura di), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contributo del Gruppo di lavoro II al Quinto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 1499-1566. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartB_FINAL.pdf.

Mani, M. (a cura di). 2021. *Glaciers of the Himalayas: Climate Change, Black Carbon, and Regional Resilience.* South Asia Development Forum. Washington DC, Banca internazionale per la ricostruzione e lo sviluppo/Banca mondiale. https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/ff8b1264-d631-5d3d-814f-80f509c82aa9/content.

Ministero degli affari esteri dello Stato Plurinazionale della Bolivia. 2023. Bolivia fortalece el sistema de monitoreo de glaciares andinos. Sito web del Ministero degli affari esteri dello Stato Plurinazionale della Bolivia, 31 ottobre 2023. https://cancilleria.gob.bo/mre/2023/10/31/11918/. (In spagnolo.)

Ministero dei beni nazionali del Cile. 2023. Decreto 25 - Crea el "Parque Nacional Glaciares de Santiago", en la Comuna de San José de Maipo, Provincia de Cordillera, Región Metropolitana. Sito web del Ministero dei beni nazionali del Cile. www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1195043. (In spagnolo.)

Ministero dei lavori pubblici del Cile. 2023. *Dirección General de Aguas del MOP instala dos nuevas estaciones glaciológicas en la región de Magallanes y de la Antártica Chilena.* https://dga.mop.gob.cl/direccion-general-de-aguas-del-mop-instala-dos-nuevas-estaciones-glaciologicas-en-la-region-de-magallanes-y-de-la-antartica-chilena/. (In spagnolo.)

Ministero del clima e dell'ambiente della Polonia. 2022. Impact of War on Natural Environment of the Carpathians in Ukraine. Dipartimento per la conservazione della natura. www.gov.pl/attachment/9ed63b69-87d8-4c52-a74a-1c88385f5508.

Ministero dell'energia e delle miniere dell'Ecuador. s.d. Ecuador consolida la producción eléctrica a partir de fuentes renovables. Sito web del Ministero dell'energia e delle miniere dell'Ecuador. www.recursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/#:~:text=Bajo%20este%20precepto%2C%20es%20importante,%2C%20geotermia%2C%20entre%20otras. (In spagnolo.)

MoE/UNDP/GEF (Ministero dell'ambiente della Repubblica del Libano/Programma delle Nazioni Unite per lo sviluppo/Fondo mondiale per l'ambiente). 2015. *Economic Costs to Lebanon from Climate Change: A First Look.* Beirut, MoE/UNDP. http://www.studies.gov.lb/getattachment/Sectors/Environment/2016/ENV-16-11/env-16-11.pdf.

Mosello, B., Foong, A., Viehoff, A. e Rüttinger, L. 2023. *Regional Consultation on Climate Change and Security in Central Asia.* Berlino/Vienna, Adelphi Research/Organizzazione per la sicurezza e la cooperazione in Europa (OSCE). https://adelphi.de/system/files/document/Regional%20consultation%20on%20climate%20change%20and%20security%20in%20central%20asia.pdf.

Mountain Partnership. 2013. *Why Mountains Matter for Energy: A Call for Action on the Sustainable Development Goals (SDGs).* Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO). www.fao.org/fileadmin/templates/mountain_partnership/doc/POLICY_BRIEFS/SDGs_and_mountains_energy_en.pdf.

Mountain Research Initiative/GEO Mountains. 2023. *MRI Mountain Observatories Working Group & GEO Mountains Workshop in Central Asia: Workshop Report.* Almaty, Kazakhstan, 18-20 aprile 2023. doi.org/10.48350/183023.

MRC (Commissione del fiume Mekong). s.d. Hydrometeorological Monitoring. Sito web della MRC. www.mrcmekong.org/our-work/functions/basin-monitoring/hydrometeorological-monitoring/.

Mwangi, K. K., Musili, A. M., Otieno, V. A., Endris, H. S., Sabiiti, G., Hassan, M. A., Tsehayu, A. T., Guleid, A., Atheru, Z., Guzha, A. C., De Meo, T.,

Smith, N., Lubanga Makanji, D., Kerkering, J., Doud, B. e Kanyanya, E. 2020. Vulnerability of Kenya's water towers to future climate change: An assessment to inform decision making in watershed management. *American Journal of Climate Change*, vol. 9, N. 3, pagg. 317-353. doi.org/10.4236/ajcc.2020.93020.

Nazioni Unite. 2024. *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2024: Acqua per la prosperità e la pace*. Parigi, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO). https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000389107.

—— s.d. Progress on Transboundary Water Cooperation (SDG Target 6.5). Sito web SDG 6 Data. https://sdg6data.org/en/indicator/6.5.2. (Consultato il 3 settembre 2024.)

Nsengiyumva, P. 2019. African mountains in a changing climate: Trends, impacts, and adaptation solutions. *Mountain Research and Development*, vol. 39, N. 2, pagg. 1-8. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00062.1.

Nyingi, D. W., Gichuki, N. e Ogada, M. O. 2013. Freshwater ecology of Kenyan highlands and lowlands. P. Paron, D. O. Olago e C. T. Omuto (a cura di), *Developments in Earth Surface Processes*, vol. 16, pagg. 199-218. doi.org/10.1016/B978-0-444-59559-1.00016-5.

Olmos, X. 2017. *Sostenibilidad Ambiental en las Exportaciones Agroalimentarias: Un Panorama de América Latina*. Documentos de Proyectos. Santiago, Commissione economica delle Nazioni Unite per l'America Latina e i Caraibi (UNECLAC). https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a63d47d6-c0c5-4a0a-93bd-456f684d1739/content. (In spagnolo.)

Ontumbi, G. M. e Sanga, J. K. 2018. Kenya's water towers; A scenario scrutiny of Njoro sub catchment, Eastern Mau towers. *International Journal of Scientific and Technological Research (IJSTER)*, vol. 1, N. 1, pagg. 6-15.

Ownby, J. 2024. La crisis hídrica de Bogotá: "Solo nos puede salvar el cielo". Sito web di El País, 18 aprile 2024. https://elpais.com/america-colombia/2024-04-18/la-crisis-hidrica-de-bogota-solo-nos-puede-salvar-el-cielo.html. (In spagnolo.)

Pohl, B., Kramer, A., Hull, W., Blumstein, S., Abdullaev, I., Kazbekov, J., Reznikova, T., Strikeleva, E., Interwies, E. e Görlitz, S. 2017. *Rethinking Water in Central Asia: The Costs of Inaction and Benefits of Water Cooperation*. Adelphi/CAREC. https://carececo.org/Rethinking%20Water%20in%20Central%20Asia.pdf.

Prinz, R., Nicholson, L. I. Mölg, T., Gurgiser, W. e Kaser, G. 2016. Climatic controls and climate proxy potential of Lewis Glacier, Mt. Kenya. *The Cryosphere*, vol. 10, N. 1, pagg. 133-148. doi.org/10.5194/tc-10-133-2016.

Reyes Haczek, A. 2022. Venezuela ya se quedó sin glaciares. ¿Qué pasa en el resto de la región? Sito web della CNN, 5 agosto 2022. https://cnnespanol.cnn.com/2022/08/05/glaciares-nivel-del-mar-america-latina-caribe-omm-orix/. (In spagnolo.)

Robbins, J. 2019. The West's Great River Hits its Limits: Will the Colorado Run Dry? Sito web di Yale Environment 360, 14 gennaio 2019. https://e360.yale.edu/features/the-wests-great-river-hits-its-limits-will-the-colorado-run-dry.

Romeo, R., Grita, F., Parisi, F. e Russo, L. 2020. *Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity: Updated Data and Analysis of Drivers*. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO)/Convenzione delle Nazioni Unite per la lotta alla desertificazione (UNCCD). doi.org/10.4060/cb2409en.

Ruggeri, A. 2023. Could Giant Blankets e Other Extreme Actions Save Glaciers? Sito web di Scientific American, 6 marzo 2023. www.scientificamerican.com/article/could-giant-blankets-and-other-extreme-actions-save-glaciers/.

Russell, M. 2018. *Water in Central Asia: An Increasingly Scarce Resource*. Unione Europea. www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/625181/EPRS_BRI(2018)625181_EN.pdf.

Samaniego, J., Galindo, L. M., Mostacedo Marasovic, S. J., Ferrer Carbonell, J., Alatorre, J. E. e Reyes, O. 2017. *Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agropecuario en América Latina y el Caribe: Síntesis de Políticas Públicas sobre Cambio Climático*. Commissione economica delle Nazioni Unite per l'America Latina e i Caraibi (UNECLAC). Santiago, Nazioni Unite. www.cepal.org/sites/default/files/news/files/sintesispp_cc_adaptacion_al_cambio_climatico_en_alac.pdf. (In spagnolo.)

Schmitz, T. 2020. Investing in ecosystems for water security: The case of the Kenya water towers. R. C. Brears (a cura di), *The Palgrave Handbook of Climate Resilient Societies*. Cham, Svizzera, Palgrave Macmillan. doi.org/10.1007/978-3-030-32811-5_23-1.

Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M. e Verbist, K. 2018. *The Andean Glacier and Water Atlas – The Impact of Glacier Retreat on Water Resources*. Parigi/Arendal, Norvegia, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO)/GRID-Arendal. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265810?posInSet=1&queryId=fc16de3e-c03e-4c99-9f7a-1766150d7788.

Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. 2009a. *Water and Water Management Issues: Report on the State of the Alps*. Alpine Convention: Alpine Signals - Special Edition 2. Summary. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia, Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA2_summary_EN.pdf.

——. 2009b. *Water and Water Management Issues: Report on the State of the Alps*. Alpine Convention: Alpine Signals - Special Edition 2. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia, Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA2_long_EN.pdf.

——. 2019. *Natural Hazard Risk Governance: Report on the State of the Alps*. Alpine Convention: Alpine Signals - Special Edition 7. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia, Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA7_EN.pdf.

——. 2022. *Multi-annual Work Programme of the Alpine Conference 2023–2030*. Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Organisation/AC/XVII/AC_MAP_2023-2030_en_web.pdf.

Shaban, A. 2020. Snow cover. *Water Resources of Lebanon*. World Water Resources, vol. 7. Cham, Svizzera, Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-48717-1_5.

Shaban, A., Faour, G., Khawlie, M. e Abdallah, C. 2004. Remote sensing application to estimate the volume of water in the form of snow on Mount Lebanon. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 49, N. 4, pagg. 643-653. doi.org/10.1623/hysj.49.4.643.54432.

Shikuku, K. M., Winowiecki, L., Twyman, J., Eitzinger, A., Pérez, J. G., Mwongera, C. e Läderach, P. 2017. Smallholder farmers' attitudes and determinants of adaptation to climate risks in East Africa. *Climate Risk Management*, vol. 16, pagg. 234-245. doi.org/10.1016/j.crm.2017.03.001.

Shrestha, F. 2023. Glacial Lake Outburst Floods in High Mountain Asia Documented in Regional Effort. Sito web del Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna, 15 dicembre 2023. www.icimod.org/media-advisory/glacial-lake-outburst-floods-in-high-mountain-asia-documented-in-regional-effort/.

Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskyi, V., De Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J. A. e Gleick, P. 2023. Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability,* vol. 6, pagg. 578-586. doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x.

Singh Shrestha, M. e Sherchan, U. 2018. Communicating Flood Early Warning in the Ratu Watershed. Sito web del Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna, 30 luglio 2018. www.icimod.org/communicating-flood-early-warning-in-the-ratu-watershed/.

Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O. e Beniston, M. 2012. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, vol. 2, pagg. 725-731. doi.org/10.1038/nclimate1592.

Stecher, G., Hohensinner, S. e Herrnegger, M. 2023. Changes in the water retention of mountainous landscapes since the 1820s in the Austrian Alps. *Frontiers in Environmental Science*, vol. 11. doi.org/10.3389/fenvs.2023.1219030.

Sturm, M., Taras, B., Liston, G. E., Derksen, C., Jonas, T. e Lea, J. 2010. Estimating snow water equivalent using snow depth data and climate classes. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 11, N. 6, pagg. 1380-1394. doi.org/10.1175/2010JHM1202.1.

Takase, M., Kipkoech, R. e Essandoh, P. K. 2021. A comprehensive review of energy scenario and sustainable energy in Kenya. *Fuel Communications*, vol. 7, articolo 100015. doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100015.

Taylor, R. G., Mileham, L., Tindimugaya, C. e Mwebembezi, L. 2009. Recent glacial recession and its impact on alpine riverflow in the Rwenzori Mountains of Uganda. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 55, N. 3-4, pagg. 205-213. doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.04.008.

Taylor, S. J., Ferguson, J. W. H., Engelbrecht, F. A., Clark, V. R., Van Rensburg, S. e Barker, N. 2016. The Drakensberg Escarpment as the great supplier of water to South Africa. *Developments in Earth Surface Processes*, vol. 21, pagg. 1-46. doi.org/10.1016/B978-0-444-63787-1.00001-9.

Torres, M. C., Naranjo, E., Fierro, V. e Carchipulla-Morales, D. 2023. Social technology for the protection of the *Páramo* in the central Andes of Ecuador. *Mountain Research and Development*, vol. 43, N. 4, pagg. D1-D11. doi.org/10.1659/mrd.2022.00022.

Travers, J. 2023. Covering Glaciers with Blankets to Hide the Ice – and the Real Problem. Sito web della Columbia Climate School, 13 gennaio 2023. https://news.climate.columbia.edu/2023/01/13/covering-glaciers-with-blankets-to-hide-the-ice-and-the-real-problem/.

Trisos, C. H., Adelekan, I. O., Totin, E., Ayanlade, A., Efitre, J., Gemeda, A., Kalaba, K., Lennard, C., Masao, C., Mgaya, Y., Ngaruiya, G., Olago, D., Simpson, N. P. e Zakieldeen, S. 2022. Africa. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 1285-1455. doi.org/10.1017/9781009325844.011.

Umirbekov, A., Peña-Guerrero, M. D. e Müller, D. 2022. Regionalization of climate teleconnections across Central Asian mountains improves the predictability of seasonal precipitation. *Environmental Research Letters*, vol. 17, N. 5, articolo 055002. doi.org/10.1088/1748-9326/ac6229.

UNDP (Programma delle Nazioni Unite per lo sviluppo). 2019. *DECOIN: Ecuador*. Equator Initiative Case Studies. New York, UNDP. www.equatorinitiative.org/wp-content/uploads/2019/12/DECOIN-Ecuador-1.pdf.

UNDP/ENVSEC (Programma delle Nazioni Unite per lo sviluppo/Iniziativa per l'ambiente e la sicurezza). 2011. *The Glaciers of Central Asia: A Disappearing Resource*. UNDP. http://cawater-info.net/pdf/glaciers_of_central_asia.pdf.

UNECLAC (Commissione economica delle Nazioni Unite per l'America Latina e i Caraibi). 2024. CEPALSTAT: Statistical Databases and Publications. Sito web dell'UNECLAC. https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?theme=2&lang=en. (Consultato il 10 giugno 2024.)

UNEP (Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente). 2010. *Africa Water Atlas*. Nairobi, Division of Early Warning and Assessment, UNEP. https://na.unep.net/atlas/viewAtlasBookWithID.php?atlasID=1112.

——. 2012. *Sustainable Mountain Development. RIO 2012 and Beyond. Why Mountains Matter for Africa*. UNEP. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1278fa8d-0853-4aef-a2af-c935cb643428/content.

——. 2014. *Africa Mountains Atlas*. Nairobi, UNEP. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9301.

——. 2022a. *The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review*. EO/2466/NA. Nairobi, UNEP. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/40746.

——. 2022b. *A Scientific Assessment of the Third Pole Environment*. Nairobi, UNEP. www.unep.org/resources/report/scientific-assessment-third-pole-environment.

——. 2023a. The Carpathian Convention Marks its 20th Anniversary with a New Biodiversity Framework and a Transboundary Protected Wetland. Sito web dell'UNEP, 12 ottobre 2023. www.unep.org/news-and-stories/press-release/carpathian-convention-marks-its-20th-anniversary-new-biodiversity.

——. 2023b. Shrinking Glaciers Upend Lives Across South America. Sito web dell'UNEP, 15 marzo 2023. www.unep.org/news-and-stories/story/shrinking-glaciers-upend-lives-across-south-america.

UNESCO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura). 2022. *Improving Knowledge of Central Asian Glaciers and their Resilience to Climate Change*. ATA-2022/PI/2. UNESCO. hhttps://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000382818.

——. 2024. *Category 2 Institutes and Centres: Reviews and Renewals – Part I: Central Asian Regional Glaciological Centre (Kazakhstan)*. Duecentodiciannovesima sessione del Comitato esecutivo. Parigi, UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388450.

——. s.d. Central Asian Regional Glaciological Centre. Sito web del Central Asian Regional Glaciological Centre. https://cargc.org/en/.

UNESCO/IUCN (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura/Unione mondiale per la conservazione della Natura). 2022. *World Heritage Glaciers: Sentinels of Climate Change*. Parigi/Gland, Svizzera, UNESCO/IUCN. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000383551.

UN Women. 2023. *Women in the Agro-Food Sector in Lebanon: A Review of the Legislative Framework*. Beirut, UN Women. https://arabstates.unwomen.org/sites/default/files/2023-12/psdp-legislativeframework.pdf.

Valdivia Araica, A., Navarro, C. e Hernández, M. 2023. Climate Services: A Strategy for Increasing Resilience in Guatemala's Dry Corridor. Sito web dell'Alliance Biodiversity & CIAT, 3 settembre 2023. https://alliancebioversityciat.org/stories/stories/climate-services-strategy-to-increase-resilience-corridor-dry-guatemala.

Van der Graaf, L. e Siarova, H. 2021. Multifaceted Threats to Biodiversity in Central Asia. Sito web del Global Waste Cleaning Network, 25 settembre 2021. https://gwcnweb.org/2021/09/25/multifaceted-threats-to-biodiversity-in-central-asia/.

Veettil, B. K. e Kamp, U. 2019. Global disappearance of tropical mountain glaciers: Observations, causes, and challenges. *Geosciences*, vol. 9, N. 5, pag. 196. doi.org/10.3390/geosciences9050196.

Viviroli, D. e Weingartner, R. 2004. The hydrological significance of mountains: From regional to global scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 8, N. 6, pagg. 1017-1030. doi.org/10.5194/hess-8-1017-2004.

Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M. e Weingartner, R. 2007. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, vol. 43, N. 7. doi.org/10.1029/2006WR005653.

Viviroli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M. e Wada, Y. 2020. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability*, vol. 3, pagg. 917-928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.

Wamucii, C. N., van Oel, P. R., Ligtenberg, A., Gathenya, J. M. e Teuling, A. J. 2021. Land use and climate change effects on water yield from East African forested water towers. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 25, N. 11, pagg. 5641-5665. doi.org/10.5194/hess-25-5641-2021.

Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. e Shrestha, A. B. (a cura di). 2019. *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Svizzera, Springer. lib.icimod.org/record/34383.

WGMS (World Glacier Monitoring Service). 2024. *Fluctuations of Glaciers Database*. Zurigo, Svizzera, WGMS. doi.org/10.5904/wgms-fog-2024-01.

WMO (Organizzazione meteorologica mondiale). 2022. *The State of the Climate in Africa 2021*. WMO-No. 1300. Ginevra, WMO. https://library.wmo.int/idurl/4/58070.

——. 2023. *State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2022*. WMO-No. 1322. Ginevra, WMO. https://library.wmo.int/idurl/4/66252.

——. 2024a. *State of the Climate in Africa 2023*. WMO-No. 1360. Ginevra, WMO. https://library.wmo.int/idurl/4/69000.

——. 2024b. *1st Third Pole Climate Forum Consensus Statement (TPCF-1)*. Third Pole Regional Climate Forum, Lijiang, Cina, 4-6 giugno 2024. https://reliefweb.int/report/afghanistan/1st-third-pole-climate-forum-consensus-statement-tpcf-1-summary-climate-december-2023-april-2024-and-climate-outlook-june-september-2024.

Wymann von Dach, S., Romeo, R., Vita, A., Wurzinger, M. e Kohler, T. (a cura di). 2014. *La Agricultura de Montaña es Agricultura Familiar: Una Contribución de las Zonas de Montaña al Año Internacional de la Agricultura Familiar 2014*. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO)/Centro per lo sviluppo e l'ambiente (CDE)/BOKU. www.fao.org/3/a-i3480s.pdf. (In spagnolo.)

Zandi, M. 2023. Central Asia's Clean Energy Opportunity: Hydropower. Sito web dell'Atlantic Council, 2 giugno 2023. www.atlanticcouncil.org/blogs/energysource/central-asias-clean-energy-opportunity-hydropower/.

Zhang, Y., Kang, S., Sprenger, M., Cong, Z., Gao, T., Li, C., Tao, S., Li, X., Zhong, X., Xu, M., Meng, W., Neupane, B., Qin, X. e Sillanpää, M. 2018. Black carbon and mineral dust in snow cover on the Tibetan Plateau. *Cryosphere*, vol. 12, pagg. 413-431. doi.org/10.5194/tc-12-413-2018.

Zhang, Y., Gao, T., Kang, S., Sprenger, M., Tao, S., Du, W., Yang, J., Wang, F. e Meng, W. 2020. Effects of black carbon and mineral dust on glacial melting on the Muz Taw glacier, Central Asia. *Science of The Total Environment*, vol. 740, articolo 140056. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140056.

Zheng, L., Gaire, N. P. e Shi, P. 2021. High-altitude tree growth responses to climate change across the Hindu Kush Himalaya. *Journal of Plant Ecology*, vol. 14, N. 5, pagg. 829-842. doi.org/10.1093/jpe/rtab035.

Zoï Environment Network. 2022. *Mountains of Central Asia: Supporting Biodiversity Safeguards in the Era of an Infrastructure Boom in Kyrgyzstan, Kazakhstan, and Uzbekistan*. IMPACT Report. CEPF-Zoï Project, 2021–2022. https://zoinet.org/wp-content/uploads/2022/06/CEPF-impact-2022-en.pdf.

Capitolo 8

Sviluppo di conoscenze e competenze

UNESCO IHP*

Zoë Johnson, Chris DeBeer, Corinne Schuster-Wallace e John Pomeroy[1], Sher Muhammad[2], Fred Wrona e Kerry Black[3], Dhiraj Pradhananga[4] e James McPhee[5,6]

Con il contributo di Anil Mishra e Abou Amani (UNESCO IHP), Stefan Uhlenbrook (WMO) e Tenzing Sherpa (ICIMOD)

*L'UNESCO IHP ha coordinato l'elaborazione del capitolo con la partecipazione delle seguenti istituzioni:

[1] Università di Saskatchewan, [2] ICIMOD, [3] Università di Calgary, [4] Università Tribhuvan, [5] Università del Cile e [6] Associazione internazionale di scienze idrologiche

Le caratteristiche idrologiche di base delle regioni di alta montagna devono essere meglio comprese per supportare il processo decisionale. Sono necessarie politiche che diano priorità ai seguenti obiettivi: ridurre le lacune nella raccolta di dati idrometeorologici nelle regioni montane; sviluppare modelli integrati che tengano conto, su base fisica, delle interconnessioni tra atmosfera, criosfera, idrologia, ecologia ed esseri umani; ampliare i programmi di formazione per consentire l'integrazione di diversi tipi di conoscenza (ad esempio, dati biofisici, dati socioeconomici, conoscenze indigene e locali); facilitare la partecipazione delle popolazioni indigene e delle comunità locali (IPLC nell'acronimo inglese), nonché delle donne, nei processi di raccolta delle conoscenze.

8.1 Lacune di dati e di conoscenze sulle zone di alta montagna

8.1.1 Dati e modelli per l'adattamento e la gestione del rischio

L'elevata variabilità del clima, della topografia, della geologia e della vegetazione delle aree montane – tutti elementi che influenzano il movimento delle acque in questo contesto – comporta la necessità di disporre di reti idrometeorologiche che rappresentino efficacemente le aree in oggetto, oltre che di sistemi informativi affidabili. Tale variabilità contribuisce anche a rendere incerti i dati idrometeorologici relativi alle montagne, dato che le condizioni nei fondovalle possono essere molto diverse da quelle in alta quota, anche quando le distanze orizzontali sono ridotte.

Le osservazioni e le previsioni idrometeorologiche nelle aree di alta montagna sono incerte a causa delle scarse reti di monitoraggio e dei modelli a bassa risoluzione. I regimi naturali di neve e ghiaccio in montagna sono determinati dalle precipitazioni e dalla termodinamica, e sono altresì influenzati da forti gradienti altimetrici. Di conseguenza, modelli climatici e meteorologici su scala ridotta forniscono previsioni idrometeorologiche inadeguate su ordini di grandezza inferiori a pochi chilometri. Per migliorare la loro accuratezza, questi modelli devono dimostrarsi in grado di tener conto della convezione, dei processi di precipitazione orografica e delle fasi delle stesse precipitazioni (Karki et al., 2017).

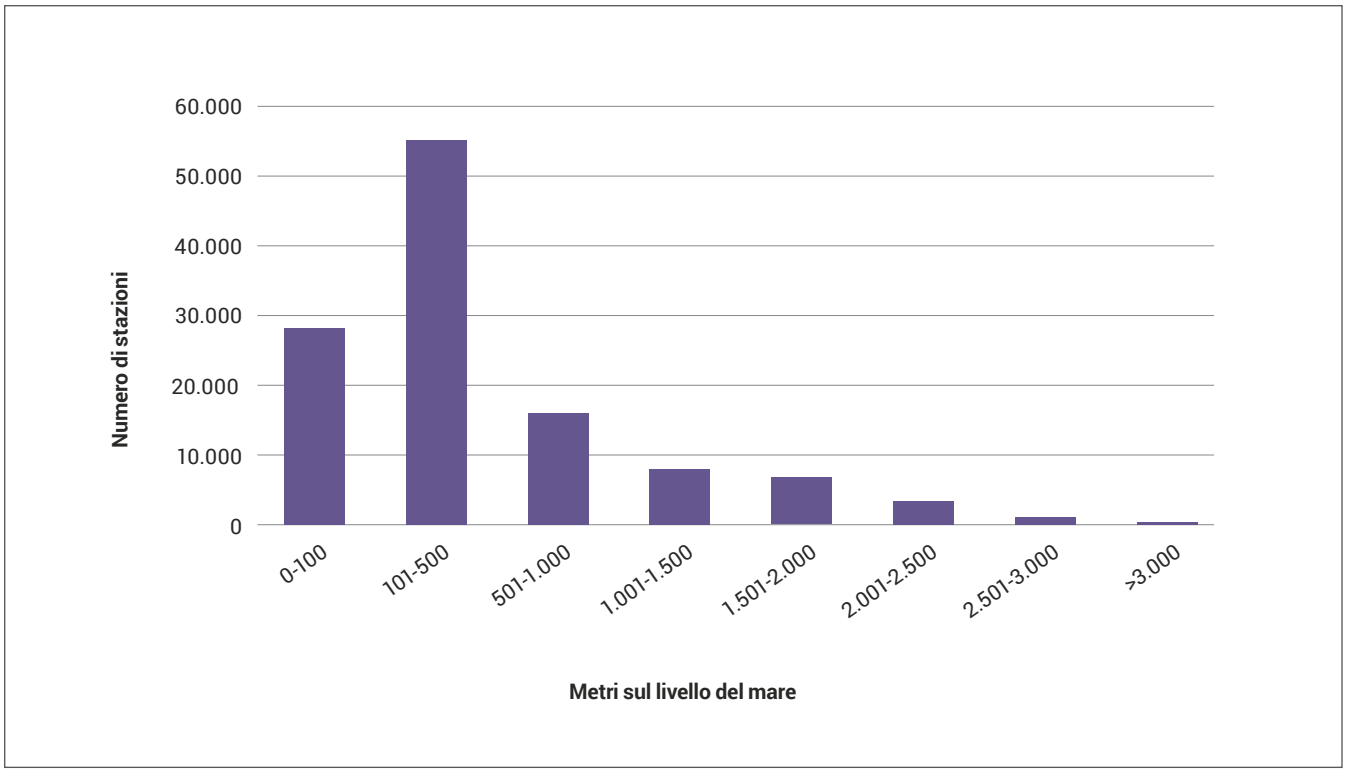
Le caratteristiche idrologiche di base delle regioni di alta montagna devono essere meglio comprese per supportare il processo decisionale

Per definire modelli di ridistribuzione della neve e di ablazione del ghiaccio, i modelli idroglaciologici devono operare su scale di qualche centinaio di metri e tenere conto della complessa circolazione dei flussi d'aria in prossimità del terreno e dell'aspetto dei pendii (Pradhananga e Pomeroy, 2022). Le previsioni dei modelli possono beneficiare della correzione dei *bias* e dell'assimilazione dei dati; diventano dunque cruciali le osservazioni *in situ* per migliorare la comprensione delle interazioni tra clima e criosfera. Tuttavia, fare queste osservazioni nelle regioni montane è complesso, tenendo conto che le altitudini, l'asprezza dei rilievi e le aree più remote presentano notevoli pericoli e minacce per la sicurezza umana (IPCC, 2019).

La regione dell'Hindu Kush Himalaya è un esempio di tale sfida: solo nel caso di 28 degli oltre 50.000 ghiacciai dell'area il bilancio di massa viene misurato regolarmente (ICIMOD, 2023). I ghiacciai di riferimento per la determinazione del bilancio di massa, se selezionati in base a criteri quali l'accessibilità, la sicurezza e la relativa semplicità della geometria (Østrem, 2006), potrebbero non rappresentare appieno la diversità dei ghiacciai nel più ampio contesto regionale. Anche le osservazioni del manto nevoso, delle condizioni meteorologiche e dei flussi di corrente in montagna vengono effettuate prevalentemente nelle aree a bassa quota, e quindi più facilmente accessibili.

I *bias* relativi alle aree a bassa quota (figura 8.1) generano inevitabilmente delle problematiche, data la forte influenza che esercita l'altitudine sulle condizioni idrometeorologiche: in molte regioni, infatti, le zone di alta montagna non vengono monitorate (Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015). Gli *snow course* e gli *snow pillow* vengono situati soprattutto nelle radure delle foreste alle medie altitudini. Anche i pochi che si trovano ad alta quota vengono spesso posizionati su terreni relativamente pianeggianti, e in questo modo non riescono a cogliere la variabilità della ridistribuzione della neve e delle dinamiche di ablazione in montagna (Bales et al., 2006).

Figura 8.1 Distribuzione storica globale delle stazioni idrometeorologiche per altitudine, 1750-2024



Nota: non tutte queste stazioni sono attualmente attive. Le alte montagne (regioni montane in cui la neve e il ghiaccio svolgono un ruolo importante nell'approvvigionamento globale di acqua dolce e nel ciclo idrologico locale o regionale) variano in termini di altitudine, ma la maggior parte di esse si trova ad almeno 2.000 metri sul livello del mare e alcune superano i 6.000 metri.

Fonte: basato sui dati del NCEI NOAA (s.d.).

I limiti del monitoraggio della criosfera nelle regioni montane aggravano le incertezze nelle previsioni idroglaciologiche, aumentando così il rischio di un'errata gestione delle risorse idriche. L'insufficienza di dati storici ostacola inoltre la capacità di calcolare i rischi e di esaminare i cambiamenti nel tempo. Tale presupposto porta anche ad accettare grossolane risoluzioni dei modelli, approcci modellistici troppo semplificati e inadeguate rappresentazioni delle dinamiche idrometeorologiche. Idealmente, le reti di misurazione idrometeorologiche, idrometriche e di bilancio di massa dei ghiacciai dovrebbero essere coordinate e ampliate. Oltre alle barriere finanziarie, logistiche e di accesso, rimane il limite pratico che, man mano che un ghiacciaio si disintegra, diventa più difficile da misurare in modo coerente, rendendo così tecnicamente impegnativa l'espansione della rete.

Le tecniche di telerilevamento, come il LiDAR aereo e l'altimetria satellitare, possono fornire informazioni preziose. Tuttavia, richiedono osservazioni *in situ* per la convalida e la calibrazione. Sarebbe quindi più che necessario un sistema satellitare ad alta risoluzione in grado di misurare l'equivalente in acqua del manto nevoso (SWE nell'acronimo inglese) in montagna; infatti, a proposito dei terreni complessi, i satelliti attuali possono determinarne l'area innevata, ma non lo SWE.

Man mano che un ghiacciaio si disintegra, diventa più difficile da misurare in modo coerente, rendendo così tecnicamente impegnativa l'espansione della rete

Ridurre queste lacune di dati è essenziale per diminuire l'incertezza e mitigare i rischi. I sistemi di allerta precoce e gli altri interventi di mitigazione spesso si basano, in larga misura, sulla tecnologia impiegata sul campo. La capacità di prevedere siccità e alluvioni, il funzionamento ottimale di dighe e sfioratori, nonché il ricorso a reti anti-dissesto, dighe a secco e ripari per mitigare le colate detritiche, dipendono da una solida comprensione dei sistemi fisici in cui vengono effettuati questi interventi.

Per comprendere i cambiamenti della criosfera e migliorare la sostenibilità degli approcci di mitigazione e adattamento, è necessario ampliare le infrastrutture per l'osservazione nelle aree di alta montagna e, soprattutto, rendere i dati di libero accesso. Incrementare le osservazioni richiede la conduzione di misurazioni regolari e su ampia scala del bilancio di massa dei ghiacciai e di transetti per determinare lo SWE, insieme al monitoraggio delle condizioni termiche e di umidità del suolo congelato. Inoltre, è necessario creare un maggior numero di stazioni meteorologiche ad alta quota per il monitoraggio costante di variabili come precipitazioni solide, temperatura e spessore della neve. Infine, c'è bisogno di un maggior numero di pozzi idrometrici e di monitoraggio delle acque sotterranee ad alta quota, oltre a stazioni per controllare il livello dei laghi in alta montagna.

Nelle aree di montagna, è inoltre essenziale formare e inviare sul campo del personale tecnico in grado di condurre rilievi relativi a ghiacciai, neve e aspetti idrometrici, di gestire le apparecchiature automatiche e di elaborare dati trasformandoli in informazioni utilizzabili. Poiché si guarda alla scienza partecipata come a un'opzione per aumentare la raccolta dei dati (vedere sezione 8.3.2), ulteriori tappe potrebbero includere la possibilità di elaborare metodi convalidati e standardizzati adatti alle capacità della cittadinanza, oltre allo sviluppo di competenze aggiuntive per mantenere attivi i meccanismi di supervisione dei sistemi di raccolta dei dati.

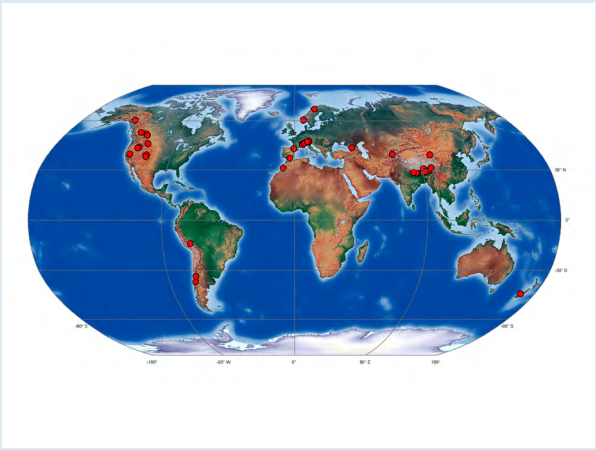
Una volta raccolti i dati, l'utilizzo delle informazioni richiede ulteriori capacità umane, tecniche e finanziarie per i sistemi di gestione (sezione 8.4). Disporre di dati aperti, liberamente accessibili e di sistemi integrati di osservazione, previsione e servizio per i bacini montani può essere fondamentale per promuovere la fruibilità delle informazioni (Adler et al., 2019): si tratta di un'area in cui la politica nazionale può certamente contribuire. Il finanziamento per sostenere questo modello qualitativo è necessario, anche se non costituisce una barriera intrinseca alle reti di ricerca collaborativa (come esemplificato nel riquadro 8.1).

Le collaborazioni internazionali sono state preziose per facilitare la ricerca sulla criosfera. Ad esempio, l'International Association of Cryospheric Sciences, attraverso il Programma idrologico intergovernativo dell'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la

Riquadro 8.1 L'International Network for Alpine Research Catchment Hydrology (INARCH)

INARCH è un progetto trasversale del Global Energy and Water Exchanges Hydroclimatology Panel del Programma mondiale di ricerca sul clima[a]. Tale progetto ha i seguenti obiettivi: misurare e comprendere i processi atmosferici, idrologici, criosferici, biologici e di interazione tra esseri umani e acqua nelle zone di alta montagna; migliorare la loro previsione considerandoli come sistemi accoppiati; diagnosticare la loro sensibilità ai cambiamenti climatici e proporre modalità di gestione per promuovere la sostenibilità idrica in un contesto di cambiamento globale (Pomeroy et al., 2015).

La rete conta 56 membri della comunità scientifica e 38 bacini di ricerca perfettamente equipaggiati in 18 paesi e 6 continenti, e opera dal 2015 senza alcun finanziamento centrale. INARCH fa leva su altre attività per raggiungere obiettivi collettivi, operando sulla base di una filosofia e di un impegno votati al libero accesso ai dati, nonché impegnandosi nella compilazione e pubblicazione di questi ultimi (Pomeroy e Marks, 2024). Il successo del progetto si deve all'entusiasmo e al duro lavoro dei singoli membri dell'équipe di ricerca, che promuovono un impegno attivo anche attraverso workshop annuali organizzati in località di alta montagna, in prossimità dei bacini di ricerca, e lavorando in collaborazione su iniziative come il Common Observing Period Experiment di INARCH (2022-2024). I risultati scientifici dell'INARCH sono stati alla base del Vertice sulle alte montagne dell'Organizzazione meteorologica mondiale e dell'Anno internazionale delle Nazioni Unite per la conservazione dei ghiacciai proclamato per il 2025.



Ubicazione dei bacini di ricerca INARCH nelle regioni montane di tutto il mondo

Fonte: autori

Esempio di stazione idrometeorologica automatizzata INARCH installata in un bacino di alta montagna: Monti Qilian, Cina

Foto: John Pomeroy.

[a] *Per ulteriori informazioni, consultare il sito https://inarch.usask.ca/.*

scienza e la cultura, ha elaborato il *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms* (Cogley et al., 2011), per aiutare a standardizzare la raccolta dei dati sul bilancio di massa, e la *International Classification for Seasonal Snow on the Ground* (Fierz et al., 2009). Sistemi di classificazione standardizzati come questi sono importanti per mantenere la coesione nelle pratiche scientifiche internazionali e per condurre analisi globali.

Molte agenzie del settore pubblico e privato sono impegnate nella ricerca e nel monitoraggio della criosfera montana, a livello nazionale, regionale e internazionale. Le reti di ricerca collaborativa possono essere uno strumento autorevole e utilizzabile per superare le lacune di conoscenza ed evitare ridondanze nella ricerca o nell'impiego delle risorse. Bisogna osservare che le catene montuose e i bacini di montagna sono spesso transfrontalieri, ma raramente vengono considerati come un'unica unità da gestire: ciò dipende dal fatto che, in vari casi, le singole istituzioni non hanno le competenze o il mandato per gestire il monitoraggio, la modellazione e la valutazione delle aree montane. Per questo motivo, lo sviluppo di sistemi integrati di osservazione, previsione e servizio per i bacini montani è un mezzo prezioso per superare le carenze relative a competenze e risorse.

Disporre di dati aperti, liberamente accessibili per i bacini montani può essere fondamentale per promuovere la fruibilità delle informazioni

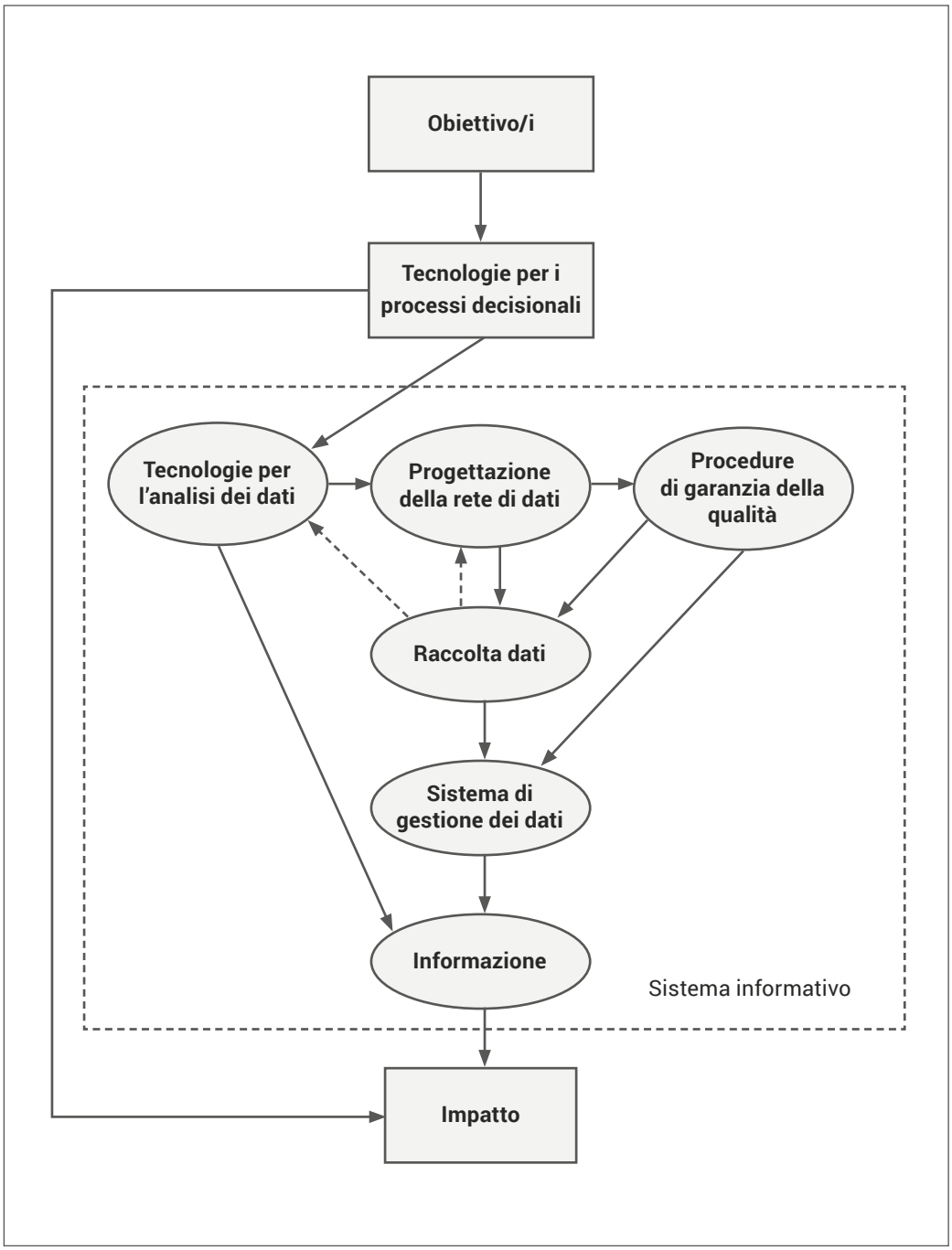
Il potenziamento dei modelli idroglaciologici può colmare alcune lacune nei dati; tali modelli sono necessari per effettuare previsioni relative ai cambiamenti criosferici e idrologici nelle regioni montane su scala più ampia. L'accumulo e lo scioglimento della neve stagionale e dei ghiacciai sono influenzati da processi che variano a seconda del luogo, e dunque sensibili alle perturbazioni climatiche e in rapida evoluzione (vedere capitolo 2); tuttavia, tali fenomeni non sono ben rappresentati nella maggior parte dei modelli (Pomeroy et al., 2022).

È dunque doveroso che i modelli predittivi per le montagne siano fondati su leggi fisiche appropriate relative ai vari fenomeni e non, al contrario, su approcci basati sui dati, empirici o eccessivamente semplificati (ad esempio, modelli di fusione con indice di temperatura). La complessa termodinamica della criosfera montana e la scarsità di osservazioni disponibili per la calibrazione giustificano una tale esigenza. Con l'aumento della capacità computazionale e della comprensione dell'idrologia ecologica e sociale, questi modelli idroglaciologici devono essere accompagnati da modelli di sistemi ecologici e sociali, così come dall'assimilazione dei dati. Ciò consentirà di fare previsioni non solo sulle tendenze del sistema idrologico, ma anche sui loro potenziali impatti su persone, società, economie ed ecosistemi, nonché di esaminare i *feedback* e i cambiamenti transitori, oltre a permettere di prevedere quali saranno i compromessi e le conseguenze indesiderate delle soluzioni di adattamento.

Lo sviluppo di sistemi informativi integrati per la montagna è un percorso complesso. La figura 8.2 identifica le componenti di base di un sistema informativo idrologico: è evidente che, anche solo per determinare gli obiettivi iniziali, sono necessari *input* idrometeorologici, ecologici e socioeconomici (WMO, 2020). L'identificazione dei bisogni può trarre enormi benefici da reti trasversali transdisciplinari, istituite non solo tra membri della comunità scientifica specializzati in diverse discipline, ma anche con rappresentanti di vari ambiti culturali, sociali, economici e politici della società. Per progettare una ricerca interdisciplinare che sia coerente con lo scopo e che risponda alle esigenze in tempo reale, è importante avvalersi dei contributi di più settori, che possono risultare utili per i seguenti scopi: favorire l'identificazione di attori chiave (ad esempio, le comunità colpite da certi fenomeni, le persone esperte del settore e le organizzazioni esistenti con obiettivi simili); capire quali quadri politici e normativi considerare (come gli accordi di condivisione delle acque transfrontaliere); individuare le esigenze di ricerca che si sovrappongono sull'argomento e le opportunità per promuovere collaborazioni.

Il sovraccarico di informazioni è generalmente riconosciuto come un problema nel contesto della ricerca e della formulazione delle politiche. È possibile ridurlo in modo significativo attraverso l'incontro delle persone interessate affinché possano discutere in merito a

Figura 8.2
Componenti di un sistema informativo idrologico



Fonte: WMO (2020, fig. I.2.2, pag. I.2-4).

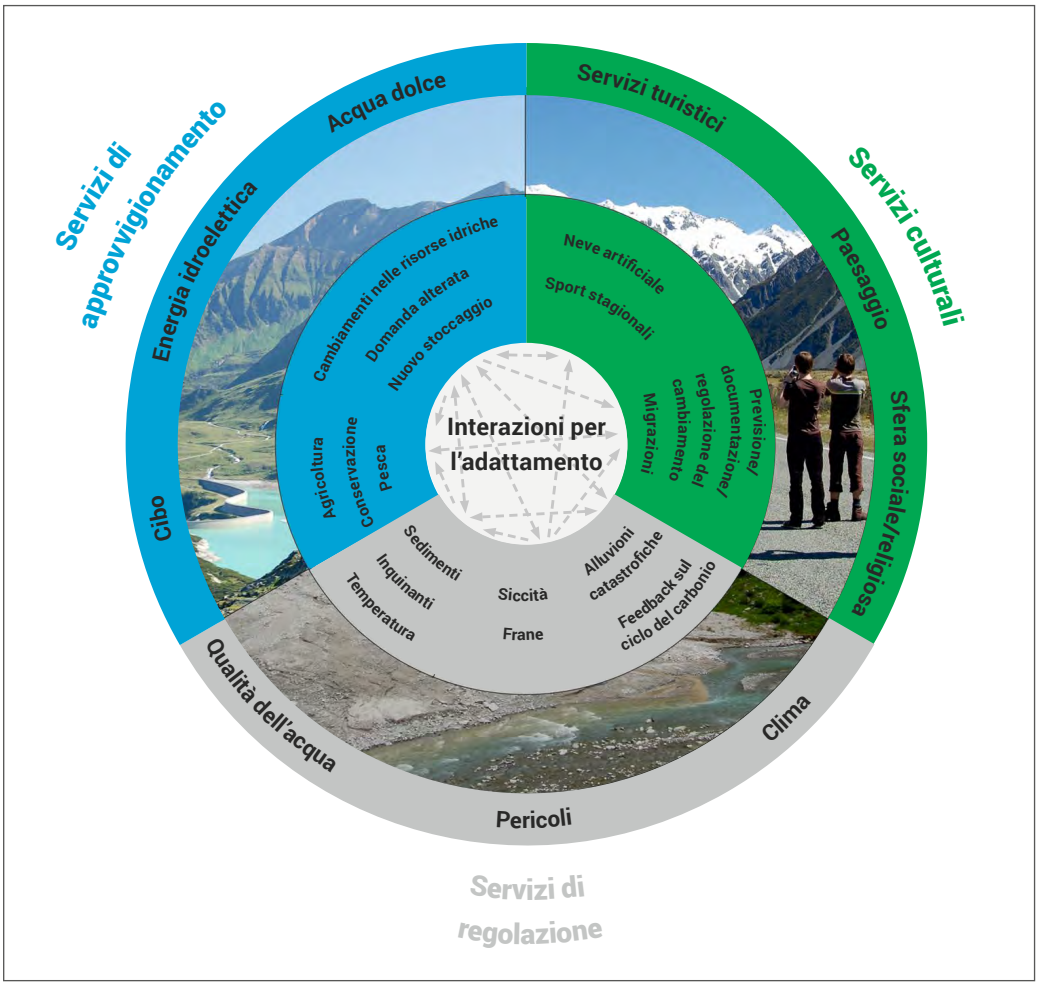
linee guida chiave, risorse e aspetti scientifici. È chiaro che i benefici della collaborazione interdisciplinare e interregionale non possono essere sottovalutati: nel caso delle regioni di alta montagna, tale collaborazione è necessaria per cogliere l'entità di tutte le componenti dei sistemi idrici, atmosferici, idrologici, glaciologici, ecologici e umani.

Lo sviluppo di sistemi informativi integrati per la montagna è un percorso complesso

8.1.2 Lacune nei dati ecologici e ambientali

Gli impatti del cambiamento delle condizioni della criosfera sui sistemi ecologici non sono del tutto noti (vedere capitolo 6). Le considerazioni ambientali sono spesso inquadrate attraverso la lente dei servizi ecosistemici, ossia i benefici che i sistemi naturali forniscono gratuitamente agli esseri umani e che altrimenti dovrebbero essere prodotti o creati, come ad esempio un'adeguata quantità di acqua potabile (Mengist et al., 2020). Gli impatti degli ecosistemi meritano un'attenzione particolare: il valore di un ecosistema, infatti, non deriva intrinsecamente dall'uso che l'essere umano ne fa. Nel prepararsi al cambiamento delle

Figura 8.3
Quadro concettuale che integra gli effetti della riduzione della criosfera sui servizi ecosistemici culturali, di approvvigionamento e di regolazione



Fonte: Milner et al. (2017, fig. 3, pag. 9775). La licenza Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC BY-SA 3.0 IGO) non si applica a questa figura. PNAS non è responsabile dell'accuratezza della traduzione.

condizioni ambientali, gli sforzi per riconoscere in modo esplicito come gli esseri umani attualmente, e forse inconsapevolmente, beneficiano di vari processi ecologici montani sono necessari per delineare una direzione politica e per identificare le popolazioni vulnerabili. La ricerca di Milner et al. (2017) ha sottolineato l'importanza di migliorare la capacità di prevedere tempi, entità e durata della fusione della criosfera montana per indirizzare le azioni necessarie a promuovere una serie di servizi ecosistemici socioeconomici, compresi l'approvvigionamento, la regolazione e i servizi culturali (figura 8.3).

Esistono pochi progetti di ricerca a lungo termine sulle connessioni esistenti tra ecosistemi terrestri, acquatici e marini. Sono tuttavia necessari nuovi studi che affrontino, secondo un approccio integrato, i legami delle comunità con gli ecosistemi alpini e i loro adattamenti al cambiamento. In via prioritaria, questi studi dovrebbero aiutare a comprendere meglio gli impatti del degrado della criosfera sulla qualità dell'acqua, e ancora la distribuzione e la produttività delle specie terrestri e acquatiche; la produzione agricola locale; gli habitat della fauna selvatica in relazione alla sussistenza e le loro interconnessioni con la sicurezza idrica, alimentare e sanitaria. Ad esempio, nella regione dell'Hindu Kush Himalaya le preoccupazioni per la produttività delle piante officinali, così come per la sostenibilità dei mezzi di sussistenza basati sulla pastorizia, sono fortemente avvertite: la sensibilità degli ambienti alpini e opzioni di adattamento spesso limitate in ambienti così estremi, infatti, hanno costretto in alcune circostanze alla migrazione (ICIMOD, 2023). A questo proposito, il coinvolgimento delle comunità di alta montagna è fondamentale per mappare le interdipendenze e le vulnerabilità degli ecosistemi.

Dato che nelle regioni montane non sono note tutte le implicazioni dei cambiamenti della criosfera, il rischio di superare le soglie di sostenibilità ecologica e socioeconomica è elevato (IPCC, 2019). Sono dunque necessarie soluzioni per la mitigazione e l'adattamento, anche se potrebbero non essere sempre realizzabili; allo stesso modo, potrebbe esserci bisogno di cambiamenti fondamentali nelle relazioni tra essere umano e ambiente. A titolo d'esempio, la scomparsa dei corsi d'acqua alimentati da neve e ghiacciai, necessari per sostenere la produzione agricola e l'allevamento del bestiame, ha costretto una comunità nepalese a trasferire l'intero villaggio (Rauniyar, 2024). In questa circostanza, non è stato possibile adottare misure di adattamento e mitigazione; l'unica vera "soluzione" è stata quella di modificare radicalmente il rapporto degli abitanti del villaggio con l'ambiente circostante. Dunque, sono necessarie valutazioni pienamente integrate degli impatti sugli ecosistemi per comprendere meglio tali legami e vulnerabilità, nonché gli effetti a breve e lungo termine sulla salute umana, sul tessuto sociale, sulle colture e sui mezzi di sussistenza.

8.2 Contributi delle conoscenze indigene, di genere e locali

Il coinvolgimento delle IPLC e una collaborazione significativa con le stesse una volta avuto il loro consenso informato, insieme alla volontà di imparare dalle procedure di gestione dei sistemi idrici che si sono evolute nel corso di generazioni, miglioreranno la capacità collettiva di rispondere ai cambiamenti della criosfera montana e delle condizioni idrologiche a valle. Tradizionalmente, le donne sono state marginalizzate nel contesto delle consultazioni per la gestione dell'acqua; allo stesso modo, le IPLC delle regioni montane sono tra le categorie più colpite da tali fenomeni e maggiormente trascurate quando si tratta di partecipazione politica e allocazione delle risorse (Latchmore et al., 2018). Sebbene le IPLC rappresentino il 6% della popolazione globale, costituiscono il 15% delle popolazioni più povere del mondo e soffrono in maggior misura gli eventi climatici e i relativi impatti sull'acqua (Tsosie, 2007; Amnesty International, s.d.; Nazioni Unite, s.d.).

Le IPLC delle regioni montane hanno legami di lunga data con la terra e l'acqua, intrinsecamente radicati nelle loro pratiche culturali, spirituali e di sussistenza. Questi legami sono caratterizzati da una profonda comprensione dell'ambiente naturale e dal rispetto per esso; in tali contesti, i sistemi di conoscenza tradizionale sono stati sviluppati per generazioni al fine di gestire e sostenere gli ecosistemi. Ad esempio, sulle Ande i terrazzamenti agricoli e i sistemi di gestione dell'acqua dei popoli Quechua e Aymara testimoniano la loro sofisticata capacità di adattamento agli ambienti di alta quota. Allo stesso modo, nella regione dell'Himalaya, le IPLC come gli Sherpa e i Ladakhi mantengono profonde relazioni con le loro terre d'origine montane, dove le pratiche spirituali e i mezzi di sussistenza quotidiani sono intimamente legati al paesaggio.

Tradizionalmente, le donne sono state marginalizzate nel contesto delle consultazioni per la gestione dell'acqua

Questa interconnessione sottolinea quanto le strategie di gestione indigene, in particolare quelle delle donne, che spesso sono le custodi dell'acqua, svolgano un ruolo fondamentale nella conservazione degli ecosistemi montani e nell'uso sostenibile delle risorse (Kelkar e Tshering, 2002; Cave e McKay, 2016). Il significato culturale e spirituale di questi luoghi spesso trascende gli usi pratici e promuove una visione olistica del mondo che vede la terra e l'acqua come parte integrante dell'identità e del benessere.

Le IPLC delle regioni montane hanno legami intimi con la terra che possono e devono essere messi in evidenza per favorire uno sviluppo sostenibile. Sebbene le IPLC siano tra loro diverse, l'interconnessione tra acqua, terra ed essere umano è al centro di molte delle loro visioni del mondo, al contrario delle scienze occidentali, che considerano tali elementi nella misura di risorse naturali, beni biofisici o merci, spesso in modo scollegato. L'assenza di una visione olistica del mondo nella scienza occidentale si oppone fondamentalmente alle relazioni tra le IPLC e l'ambiente naturale. È questo un ambito in cui gli orizzonti del sapere occidentali possono ampliarsi molto grazie alle IPLC, soprattutto in considerazione della necessità di approcci più olistici per conseguire uno sviluppo davvero sostenibile ed equo.

La Piattaforma intergovernativa scienza-politica sulla biodiversità e i servizi ecosistemici ha valutato la diversa natura delle visioni del mondo e dei sistemi di valori (IPBES, 2022). Va inoltre notato che il capitolo 6 della passata edizione del *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche* ha fornito un esempio delle implicazioni di tali visioni e sistemi per l'acqua (Nazioni Unite, 2024). Questi approcci contrastano con le normative occidentali, che spesso hanno creato un disequilibrio fra gli obiettivi politici e le esigenze e i valori delle comunità di un territorio, ad esempio dando la priorità a uno o due "indicatori rappresentativi" in base a esigenze economiche, energetiche o urbane delle aree a valle (Latchmore et al., 2018). Lo sviluppo congiunto di progetti di ricerca (riquadro 8.2) può ridurre queste lacune e garantire che tali progetti siano pertinenti al contesto e guidati dalle IPLC.

Le IPLC delle regioni montane possono fornire prospettive profonde e ben informate a lungo termine sugli impatti dei cambiamenti della criosfera e sulle loro conseguenze. La loro conoscenza collettiva rappresenta una risorsa fondamentale ma trascurata, soprattutto in regioni poco studiate e con pochi dati disponibili.

Riquadro 8.2 Lo sviluppo congiunto di una strategia per la ricerca sull'acqua per le popolazioni indigene e le comunità locali (IPLC)

Global Water Futures è un programma di ricerca canadese progettato con persone esperte in materia di risorse idriche e custodi delle conoscenze delle IPLC. I criteri di valutazione dei progetti e delle proposte di ricerca sono stati elaborati congiuntamente da persone con conoscenze accademiche e da altre che custodiscono il sapere indigeno; tale processo ha permesso di individuare i temi prioritari per i progetti di ricerca sulla base dei valori delle stesse IPLC.

Fra le aree chiave c'erano le seguenti: lo sviluppo delle capacità di monitoraggio e di acquisizione dei dati per facilitare la scienza partecipata; la promozione della condivisione dei dati e delle applicazioni informatiche; il miglioramento della comprensione dei bisogni e dei flussi ambientali; l'individuazione delle similitudini e delle divergenze tra gli approcci occidentali e quelli delle IPLC alla scienza e alla conoscenza (GWF, s.d.). Sulla base delle esperienze presentate in un workshop, sono state sviluppate una serie di indicazioni, nell'ambito delle quali le proposte elaborate insieme alla componente indigena sono state sottoposte a un processo di peer-review coinvolgendo chi detiene il sapere delle IPLC. I progetti che ne sono scaturiti hanno affrontato le problematiche relative all'acqua delle IPLC e sono stati presentati alla Conferenza delle Nazioni Unite del 2023 sulla revisione di medio termine in materia di attuazione degli obiettivi per il Decennio internazionale d'azione "Acqua per lo sviluppo sostenibile 2018-2028".

Sulla base di questo processo, i rappresentanti indigeni di tutta la rete di ricerca si sono riuniti per condividere le loro prospettive sulla ricerca collaborativa in materia di acqua. Intitolata *Everyone Together*, la dichiarazione del 2023 ha inizio affermando: «abbiamo la responsabilità di progettare la ricerca come amministratori della nostra terra, delle nostre acque e dei nostri popoli» (GWF, 2023, pag. 2). La dichiarazione delinea inoltre uno spazio etico in cui il benessere della comunità è un obiettivo primario: la ricerca osserva e rispetta i protocolli locali, la conoscenza è sostenuta e finanziata in modo equo e la proprietà intellettuale rimane alle comunità. Questo approccio collaborativo tiene conto degli ambienti idrici di montagna ed è ad essi applicabile.

Nei territori di alta montagna dell'Asia, la letteratura scientifica sulle valanghe di neve e ghiaccio è limitata. Tuttavia, a livello locale la consapevolezza dei rischi legati alla criosfera è ben radicata nelle comunità colpite dai suddetti fenomeni ed è stata trasmessa alle nuove generazioni (Acharya et al., 2023). In Nepal, alcuni muri sacri buddisti sorgono in luoghi che storicamente sono stati zone di deflusso delle valanghe, che costituiscono uno dei principali rischi per la sicurezza delle popolazioni che allevano yak nella zona (Emerman et al., 2016; Acharya et al., 2023). I muri ricordano di non attraversare o costruire strutture in questi luoghi, perché proprio lì le divinità hanno manifestato la loro ira attraverso eventi naturali catastrofici. Queste forme culturali di conoscenza sono state tramandate di generazione in generazione, ma solitamente non sono riprese o riconosciute dalla scienza occidentale.

8.3 Potenziamento delle competenze

8.3.1 Esigenze istituzionali e sviluppo delle competenze umane

I confini politici raramente coincidono con quelli dei bacini idrografici. Ciò rende la gestione dei bacini montani complessa dal punto di vista giurisdizionale e dipendente dalla cooperazione, dalla comunicazione e dalla condivisione dei dati tra le varie unità politiche, anche a livello transfrontaliero (ad esempio, tra distretti municipali, regioni subnazionali e paesi). Un determinato bacino idrografico può non avere la stessa estensione spaziale degli acquiferi sottostanti o dei ghiacciai sovrastanti, il che aggiunge un ulteriore livello di complessità in riferimento alla governance quando si tratta di garantire l'accesso all'acqua.

Ne deriva che la gestione delle risorse idriche può essere frammentata anche all'interno di una stessa unità politica, poiché vari settori e autorità si rapportano all'acqua in modo diverso. L'acqua potabile e i servizi igienico-sanitari possono infatti ricadere sotto la giurisdizione della sanità pubblica, l'acqua utilizzata per l'irrigazione può essere di competenza delle istituzioni responsabili dell'agricoltura, mentre l'acqua impiegata per la produzione di energia idroelettrica può essere di pertinenza dello sviluppo economico; eppure, è possibile che questi settori attingano tutti la risorsa dalla stessa fonte.

Sono proprio le competenze tecniche la base su cui le agenzie e i servizi che si occupano di processi decisionali dovrebbero puntare per migliorare

La gestione della diversità e della complessità delle risorse idriche richiede quindi il contributo di una serie di discipline e attori. Il miglioramento della capacità istituzionale di affrontare queste sfide richiede programmi di formazione trasversali, tra cui un'istruzione di base relativa alle scienze fisiche e sociali rilevanti per la montagna. La trasversalità di queste discipline deve accompagnarsi alla capacità di integrazione, ossia di utilizzare diverse tipologie e fonti di dati e opinioni, specifici per ogni settore e potenzialmente contraddittori, riuscendo a trovare il modo di dare senso a questo quadro d'insieme. Prendere decisioni in un contesto del genere, di fronte a priorità contrastanti e alla scarsità di risorse, come accade sempre più spesso nel caso dei temi legati all'acqua, richiede notevoli competenze tecniche e capacità di integrazione. Sono proprio le competenze tecniche la base su cui le agenzie e i servizi che si occupano di processi decisionali dovrebbero puntare per migliorare le "competenze trasversali" necessarie per favorire la mediazione nei processi di interscambio, tra cui capacità analitiche, comunicative e di risoluzione dei problemi, la comprensione delle prospettive altrui e la capacità di difendere le decisioni.

A livello istituzionale, è necessario prevedere i tempi e le risorse necessarie per promuovere l'interazione tra persone e prospettive diverse. Non si possono sottovalutare i tempi di questi processi, né dare per scontata la volontà o la capacità di collaborare. I modelli di governance collaborativa spesso implicano compromessi che, pur essendo vantaggiosi per la società nel lungo periodo, possono risultare sgraditi a chi attualmente beneficia dello *status quo*. Stabilire quindi una visione chiara e coerente del futuro può essere fondamentale di fronte a prospettive divergenti. I valori concordati possono creare un ombrello sotto il quale le diverse parti possono accordarsi (ad esempio, "acqua dolce per

tutti"). Anche se potenzialmente complesso, un impegno così significativo è alla base dello sviluppo di politiche e progetti sostenibili. Il dialogo inclusivo può ridurre il rischio di esiti imprevisti, promuovere l'*empowerment* dei gruppi marginalizzati e consolidare la responsabilità dei decisori.

8.3.2 Scienza partecipata e coinvolgimento della comunità

Il coinvolgimento del grande pubblico nei processi scientifici è stato proposto come mezzo per ridurre le lacune nelle competenze, nonché per rafforzare la consapevolezza relativa all'ambiente naturale e l'apprezzamento dello stesso (UNESCO, 2021). La scienza partecipata si riferisce alla conoscenza raccolta e costruita su basi scientifiche da membri della comunità (McDonough MacKenzie et al., 2017). La partecipazione a progetti di scienza partecipata può fornire preziose opportunità per creare un maggiore legame fra la cittadinanza e l'ambiente locale, migliorare l'alfabetizzazione scientifica e incoraggiare a intraprendere carriere nel settore della ricerca (Rigler et al., 2022). Può risultare anche un potente meccanismo per promuovere l'*empowerment* delle giovani generazioni e delle donne, dando loro la possibilità di fare esperienze lavorative e ricoprire ruoli di *leadership*, nonché per rispondere alle esigenze della comunità. In regioni in cui i dati scarseggiano come quelle montuose, la scienza partecipata è uno strumento sempre più interessante per colmare le lacune relative al monitoraggio.

La scienza partecipata può informare e sostenere i processi decisionali a livello locale

Affinché i progetti di scienza partecipata possano informare i processi scientifici, la metodologia e le misurazioni devono essere solide e verificabili per coerenza, accuratezza e validità (McDonough MacKenzie et al., 2017). La collaborazione tra organizzazioni di ricerca e membri della comunità, che consente ai ricercatori e alle ricercatrici di sviluppare metodi e progetti di istruzione e formazione, costituisce un approccio comune volto a garantire il soddisfacimento di tale requisito (Rigler et al., 2022; riquadro 8.3). In questo quadro, le popolazioni locali dovrebbero fornire il proprio contributo in merito agli obiettivi del progetto per garantire che i risultati in termini di conoscenza siano in linea con le esigenze della loro comunità di appartenenza.

I progetti di scienza partecipata si presentano sotto varie forme. I dati comuni raccolti in *crowdsourcing* nelle regioni montane riguardano il monitoraggio della fauna selvatica (Rueda-Uribe et al., 2024), l'identificazione delle piante e la mappatura della fenologia (Bison et al., 2019), nonché l'osservazione dei flussi d'acqua (Etter et al., 2020; Scheller et al., 2024). Gli approcci per la partecipazione del pubblico basati sul web, in particolare le app di facile utilizzo che consentono a chi partecipa di caricare immagini e numeri in una piattaforma supervisionata, sono di crescente interesse nelle regioni remote o scarsamente monitorate (Rigler et al., 2022). Tuttavia, è la valutazione della validità dei dati, piuttosto che l'uso delle informazioni stesse, ad essere l'obiettivo principale della letteratura sulla scienza partecipata (McDonough MacKenzie et al., 2017; Strobl et al., 2020).

Le incognite sulla validità dei dati sono il principale ostacolo alla scienza partecipata come mezzo per colmare le lacune. Per la ricerca e gli utilizzi scientifici, gli standard di misurazione, come quelli dell'Organizzazione internazionale per la normazione, devono essere rispettati e si deve poter verificare la loro coerenza. Da questo punto di vista, la pubblicazione di insiemi di dati sottoposti a revisione paritaria, nei progetti di scienza partecipata, potrebbe essere vantaggiosa. Tuttavia, ciò implica una qualche forma di supervisione e coinvolgimento da parte delle istituzioni di ricerca e monitoraggio, sottoponendo così la scienza partecipata a limitazioni di competenze e risorse simili a quelle degli approcci istituzionali tradizionali.

Riquadro 8.3 Research Centre for Alpine Ecosystems (CREA)-Mont Blanc: un'eredità di scienza partecipata nel contesto delle Alpi

Il CREA gestisce in Francia programmi di scienza partecipata dal 2004. Oltre 5.000 membri della comunità hanno partecipato alla programmazione della ricerca attraverso otto progetti, che hanno raccolto complessivamente oltre 40.000 dati (relativi, ad esempio, alle caratteristiche fenologiche delle piante, come le date di germogliazione e fioritura e il cambiamento di colore delle foglie). Un hub online classifica i progetti in base al livello di competenza necessario, e include istruzioni e procedure da seguire per coloro che vi partecipano. I risultati vengono caricati attraverso un portale online, gestito da professionisti della ricerca. Phénoclim, progetto di punta di scienza partecipata promosso dal CREA, genera dati sulla fenologia delle piante ed è stato utilizzato per studiare gli impatti del clima sugli ecosistemi alpini (Bison et al., 2019).

Il valore della scienza partecipata non dovrebbe essere limitato alla ricerca e al monitoraggio. Può infatti essere uno strumento prezioso per la sensibilizzazione, l'educazione, il coinvolgimento e l'alfabetizzazione delle comunità in relazione alle discipline scientifiche e agli ambienti montani. Può anche creare le basi per informare e sostenere i processi decisionali a livello locale (Etter et al., 2023).

8.4 Condivisione delle informazioni e comunicazione

A livello politico, esistono diversi passaggi tra la generazione di dati e prodotti informativi e la loro fruizione. Le informazioni destinate ai processi decisionali spesso devono essere sintetizzate e comunicate in termini di obiettivi specifici (ad esempio, probabilità statistiche di eventi estremi, previsioni sui raccolti e i rendimenti economici, o distribuzione e stato di salute delle specie nel tempo). Le comunicazioni rivolte al pubblico possono invece concentrarsi su idee semplici, di ampio respiro, prive di dettagli specifici. Le agenzie, come quelle governative o di finanziamento e di ricerca, dovrebbero prestare attenzione a distinguere tra statistiche locali e globali, soprattutto quando si tratta della criosfera montana, poiché le dinamiche relative alle risorse idriche montane spesso non vengono descritte nella loro complessità (vedere riquadro 2.2).

Generare informazioni rilevanti da dati idrometeorologici grezzi richiede una notevole capacità istituzionale. Dati come quelli relativi a temperatura, precipitazioni, flusso dei corsi d'acqua, massa dei ghiacciai e umidità del suolo devono essere elaborati e analizzati più volte prima di poter essere utilizzati. Ad esempio, le misurazioni fisiche devono essere caricate in archivi di dati, quindi corrette e convalidate dal personale tecnico addetto alla ricerca; i dati acquisiti devono poi essere inseriti in un database, visualizzati o modellati per poter essere interpretati; inoltre, la validità e l'utilità dei modelli devono essere rigorosamente testate; infine, il calcolo del rischio e il significato delle tendenze dei dati nel tempo devono essere tradotti in un linguaggio appropriato per il pubblico di destinazione. Ognuna di queste fasi di trasformazione richiede determinate competenze, da quelle tecniche di interpretazione dei dati a quelle finanziarie per la gestione e il mantenimento degli inventari storici, dalle capacità comunicative per tradurre le informazioni in esigenze politiche e in un linguaggio di facile comprensione all'impegno delle risorse umane per facilitare i collegamenti tra le varie fasi (Schuster-Wallace et al., 2015).

Una sola riga di dati o un unico punto di vista analitico raramente saranno sufficienti per informare le decisioni politiche. Ciò implica che gli organi decisionali possiedano una capacità integrativa, ossia saper considerare le esigenze e gli input di più settori contemporaneamente (vedere sezione 8.3.1). Il ruolo delle agenzie idrologiche e idrometeorologiche è principalmente quello di fornire informazioni sullo stato del clima, sugli eventi estremi e sulle tendenze delle risorse idriche per facilitare la gestione del rischio (WMO, 2020). Tuttavia, la diversità degli usi e delle richieste delle stesse risorse idriche fa sì che i progetti tradizionali in materia di gestione dell'acqua debbano prendere in considerazione anche dati aggiuntivi di natura non idrologica, come quelli socioeconomici, le dinamiche degli ecosistemi, le strutture politiche che regolano i diritti sull'acqua e gli accordi transfrontalieri, nonché le disuguaglianze nell'accesso alla risorsa per motivi legati al genere, all'età, all'etnia e alla classe sociale (WMO, 2009; Rowe e Schuster-Wallace, 2023).

Per garantire un processo decisionale solido è quindi necessario disporre di una gran varietà di tipologie di informazioni, che devono essere rese disponibili o comunicate in modo tale da promuovere progetti trasversali e intersettoriali efficaci e compatibili con interventi di altro tipo. Questa può essere una sfida per le agenzie di valutazione, che devono considerare un ampio spettro di utenti dell'acqua e di formati di dati, il che richiede delle competenze e una formazione diversificate, esperienza tecnica del personale e la necessità di rivedere frequentemente gli ambiti e i processi di raccolta dei dati.

Una sola riga di dati o un unico punto di vista analitico raramente saranno sufficienti per informare le decisioni politiche

La natura trasversale delle risorse idriche e degli ecosistemi montani può generare problematiche relative alla responsabilità della gestione dei dati e della fornitura di servizi operativi. La capacità istituzionale di interpretare le informazioni e prendere decisioni può incontrare ostacoli determinati da questioni di responsabilità: in assenza di autorizzazioni esplicite, o di politiche che affrontino adeguatamente le tematiche relative alle regioni di alta montagna sulla base di considerazioni intersettoriali, gli aspetti ecosistemici, umani e idrometeorologici possono infatti essere considerati separatamente. Pertanto, l'adozione di una strategia di gestione integrativa nel contesto dei quadri politici e della legislazione può essere necessaria per garantire approcci olistici alle sfide attuali, nonché l'istituzionalizzazione della cooperazione tra i bacini attraverso accordi transfrontalieri.

Le reti di condivisione delle informazioni (vedere riquadro 8.1), le collaborazioni intersettoriali e il coinvolgimento delle parti interessate possono essere strumenti determinanti, da un lato per ridurre le lacune dovute alla mancanza di competenze integrative, e dall'altro per generare risultati sostenibili. Va da sé che il dialogo inclusivo crea l'opportunità di portare all'attenzione nuove questioni. In tale contesto, la partecipazione ai processi decisionali a livello locale può essere fondamentale per garantire la sostenibilità a lungo termine di politiche e progetti. Bisogna però considerare che la diffidenza o i pregiudizi, ad esempio nei confronti di istituzioni straniere o coloniali, possono ostacolare l'attuazione di progetti su base locale (riquadro 8.4).

Queste situazioni ci ricordano che anche gli approcci tecnici devono essere inseriti in contesti sociali, politici e culturali, e che l'efficacia dei sistemi basati sui dati è soggetta all'accettazione locale. Senza una progettazione inclusiva, che preveda un'educazione agli intenti della ricerca e ai risultati previsti, nonché la comunicazione degli stessi, non è possibile conseguire la sostenibilità (Huggel et al., 2020). Come riassunto nella Dichiarazione di Dushanbe del 2022 del Gruppo di alto livello per il miglioramento della conoscenza, dell'istruzione e della comunicazione, è necessario continuare a investire nel coinvolgimento delle comunità, in meccanismi di comunicazione innovativi, in archivi di soluzioni e dati, nella ricerca sugli impatti e nel potenziamento delle competenze e della consapevolezza in tutti i settori e istituzioni (Seconda conferenza di alto livello sul Decennio internazionale d'azione delle Nazioni Unite "Acqua per lo sviluppo sostenibile 2018-2028", 2022).

Riquadro 8.4 Oltre la competenza tecnica: l'importanza della fiducia per il successo di un progetto

La Laguna 513 nella Cordillera Blanca delle Ande peruviane è un lago formatosi negli anni '60 in seguito a una recessione glaciale. Da allora è stato fonte di ripetute inondazioni da collasso di lago glaciale (GLOF nell'acronimo inglese; vedere sezione 2.2.3; Huggel et al., 2020). Dopo che nel 2010 un evento GLOF ha danneggiato le infrastrutture comunali e i terreni agricoli a valle del lago, le autorità locali e nazionali, con l'aiuto di persone esperte e organizzazioni internazionali, hanno rapidamente sviluppato un sistema di allerta precoce per proteggere la cittadinanza da simili eventi in futuro. Tuttavia, cinque anni dopo l'adozione del sistema di allerta precoce, nel 2016, un gruppo di abitanti del luogo ha smantellato la strumentazione di monitoraggio della Laguna 513. Le condizioni di estrema siccità avevano alimentato voci secondo le quali l'attrezzatura tecnica avrebbe in qualche modo contribuito all'assenza di precipitazioni, e questo misto di sfiducia e disperazione ha spinto la gente del posto ad agire.

Dal punto di vista dello sviluppo delle competenze, un importante aspetto dell'evento che ha interessato la Laguna 513 riguarda il fatto che, nonostante il successo del sistema di allerta precoce dal punto di vista operativo, il contesto sociale è stato un fattore che ha influito in modo determinante sulla buona riuscita del progetto nel suo complesso. Quello della Laguna 513 non è un caso isolato: altri episodi di interferenza a livello locale con progetti gestiti dall'esterno sono stati osservati in Perù, sull'Himalaya, sulle Ande e sulle Alpi. Per quanto lo sviluppo del progetto e le competenze tecniche siano importanti, è necessario che le comunità interessate accettino e comprendano le soluzioni proposte perché queste possano avere un impatto duraturo (Huggel et al., 2020).

8.5 Conclusioni

Affrontare gli impatti dei cambiamenti della criosfera montana dipende fortemente dalle osservazioni che si effettuano nelle regioni montane, nonché dalle conoscenze e dalle competenze che si hanno, sia in questo contesto che in quello delle aree a valle. Tuttavia, la scarsità di rilevamenti a livello idrometeorologico, criosferico ed ecologico impedisce la validazione e mina la rappresentatività dei modelli in ambienti di alta quota. Queste lacune rappresentano un ostacolo determinante allo sviluppo di soluzioni adeguate agli impatti dei cambiamenti della criosfera.

Migliorare la capacità dei servizi di monitoraggio di generare dati idrometeorologici di base, e di condurre analisi localizzate per migliorare l'accuratezza dei modelli, deve essere una priorità. Dati abbondanti e affidabili sono infatti fondamentali per promuovere un processo decisionale solido. Le reti di condivisione delle informazioni e dei dati su scala nazionale e regionale, ad esempio i centri regionali per il clima che facilitano i programmi di monitoraggio a lungo termine, oltre a guidare l'elaborazione e la diffusione di prodotti e servizi, offrono strumenti per colmare le lacune, allo stesso modo della scienza partecipata (WMO, 2024).

L'integrazione di strategie di osservazione, modellazione e di servizio può aiutare a superare gli ostacoli allo sviluppo dei bacini montani. Ciò nondimeno, il miglioramento delle competenze tecniche deve essere integrato con investimenti nelle capacità umane. Un'educazione transdisciplinare e una formazione in materia di comunicazione nel contesto delle istituzioni decisionali che si occupano delle regioni montane e delle aree a valle sono particolarmente importanti per conseguire tali obiettivi. Anche le IPLC dovrebbero essere coinvolte nei processi decisionali e i loro sistemi di conoscenza alternativi rispettati.

La necessità e l'interesse ad affrontare i cambiamenti della criosfera montana sono urgenti, ma per farlo è fondamentale che tutti lavorino insieme, al di là dei vari confini presenti nella società e nell'ambito della governance.

Riferimenti bibliografici

Acharya, A., Steiner, J. F., Walizada, K. M., Ali, S., Zakir, Z. H., Caiserman, A. e Watanabe, T. 2023. Snow and ice avalanches in high mountain Asia—scientific, local and Indigenous knowledge. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 23, pagg. 2569-2592. doi.org/10.5194/nhess-23-2569-2023.

Adler, C., Huggel, C., Orlove, B. e Nolin, A. 2019. Climate change in the mountain cryosphere: Impacts and responses. *Regional Environmental Change*, vol. 19, pagg. 1225-1228. doi.org/10.1007/s10113-019-01507-6.

Amnesty International. s.d. Indigenous Peoples' Rights. Sito web di Amnesty International. www.amnesty.org/en/what-we-do/indigenous-peoples/#:~:text=Overview,speak%20more%20than%204%2C000%20languages. (Consultato il 22 ottobre 2024.)

Bales, R. C., Molotch, N. P., Painter, T. H., Dettinger, M. D., Rice, R. e Dozier, J. 2006. Mountain hydrology of the western United States. *Water Resources Research*, vol. 42, N. 8. doi.org/10.1029/2005WR004387.

Bison, M., Yoccoz, N. G., Carlson, B. Z. e Delestrade, A. 2019. Comparison of budburst phenology trends and precision among participants in a citizen science program. *International Journal of Biometeorology*, vol. 63, N. 1, pagg. 61-72. doi.org/10.1007/s00484-018-1636-x.

Cave, K. e McKay, S. 2016. Water song: Indigenous women and water. *Solutions*, vol. 7, N. 6, pagg. 64-73.

Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L. e Zemp, M. 2011. *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms*. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2. Parigi, Programma idrologico intergovernativo dell'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO IHP). https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000192525.

Emerman, S. H., Adhikari, S., Panday, S., Bhattarai, T. N., Gautam, T., Fellows, S. A., Anderson, R. B., Adhikari, N., Karki, K. e Palmer, M. A. 2016. The integration of the direct and indirect methods in lichenometry for dating Buddhist sacred walls in Langtang Valley, Nepal Himalaya. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, vol. 48, N. 1, pagg. 9-31. doi.org/10.1657/AAAR0015-026.

Etter, S., Strobl, B., van Meerveld, I. e Seibert, J. 2020. Quality and timing of crowd-based water level class observations. *Hydrological Processes*, vol. 34, N. 22, pagg. 4365-4378. doi.org/10.1002/hyp.13864.

Etter, S., Strobl, B., Seibert, J., van Meerveld, I., Niebert, K. e Stepenuck, K. 2023. Why do people participate in app-based environment-focused citizen science projects? *Frontiers in Environmental Sciences*, vol. 11, articolo 1105682. doi.org/10.3389/fenvs.2023.1105682.

Fierz, C., Armstrong, R. L., Durand, Y., Etchevers, P., Greene, E., McClung, D. M., Nishimura, K., Satyawali, P. K. e Sokratov, S. A. 2009. *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground*. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 83, IACS Contribution No. 1. Parigi, Programma idrologico intergovernativo dell'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO IHP). https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000186462.

GWF (Global Water Futures). 2023. *Everyone Together. Global Water Futures Mistawasis Nêhiyawak Water Gathering Statement*. GWF, Università di Saskatchewan. https://gwf.usask.ca/indigenization/water-gathering-statement.php.

——. s.d. Indigenous Research Co-Creation. Co-developing a Strategy for Indigenous Community Water Research. Sito web del GWF. Università di Saskatchewan. https://gwf.usask.ca/km/co-creation.php#CoCreationWorkshop. (Consultato il 17 maggio 2024.)

Huggel, C., Cochachin, A., Drenkhan, F., Fluixá-Sanmartín, J., Frey, H., García Hernández, J., Jurt, C., Muñoz, R., Price, K. e Vicuña, L. 2020. Glacier Lake 513, Peru: Lessons for early warning service development. *WMO Bulletin*, vol. 69, N. 1, pagg. 45-52. https://library.wmo.int/records/item/57750-vol-69-1-2020?offset=8.

ICIMOD (Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna). 2023. *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook*. P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal e J. F. Steiner (a cura di). Kathmandu, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1028.

IPBES (Piattaforma intergovernativa scienza-politica sulla biodiversità e i servizi ecosistemici). 2022. *Summary for Policymakers of the Methodological Assessment Report on the Diverse Values and Valuation of Nature of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn, Germania, Segretariato dell'IPBES. doi.org/10.5281/zenodo.6522392.

IPCC (Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico). 2019. *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009157964.

Karki, R., Hasson, S. U., Schickhoff, U., Scholten, T. e Böhner, J. 2017. Rising precipitation extremes across Nepal. *Climate*, vol. 5, N. 1, pag. 4. doi.org/10.3390/cli5010004.

Kelkar, G. e Tshering, P. 2002. *Women of the Mountains: Gender Roles, Relations, Responsibilities and Rights*. Atti del convegno presso il Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna (ICIMOD), Paro, 1-4 ottobre 2002, pagg. 1-4. https://lib.icimod.org/record/21093.

Latchmore, T., Schuster-Wallace, C. J., Roronhiakewen Longboat, D., Dickson-Anderson, S. E. e Majury, A. 2018. Critical elements for local Indigenous water security in Canada: A narrative review. *Journal of Water and Health*, vol. 16, N. 6, pagg. 893-903. doi.org/10.2166/wh.2018.107.

McDonough MacKenzie, C. M., Murray, G., Primack, R. e Weihrauch, D. 2017. Lessons from citizen science: Assessing volunteer-collected plant phenology data with Mountain Watch. *Biological Conservation*, vol. 208, pagg. 121-126. doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.027.

Mengist, W., Soromessa, T. e Legese, G. 2020. Ecosystem services research in mountainous regions: A systematic literature review on current knowledge and research gaps. *Science of the Total Environment*, vol. 702, articolo 134581. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134581.

Milner, A. M., Khamis, K., Battin, T. J., Brittain, J. E., Barrand, N. E., Füreder, L., Cauvy-Fraunié, S., Már Gíslason, G., Jacobsen, D., Hannah, D. M., Hodson, A. J., Hood, E., Lencioni, V., Ólafsson, J. S., Robinson, C. T., Tranter, M. e Brown, L. E. 2017. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United Sates of America*, vol. 114, N. 37, pagg. 9770-9778. doi.org/10.1073/pnas.1619807114.

Mountain Research Initiative EDW Working Group. 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, vol. 5, pagg. 424-430. doi.org/10.1038/nclimate2563.

Nazioni Unite. 2024. *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2024: L'acqua per la prosperità e la pace*. Parigi, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura (UNESCO). https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000389107.

——. s.d. International Day of the World's Indigenous Peoples. Sito web delle Nazioni Unite: www.un.org/en/observances/indigenous-day/background. (Consultato il 19 giugno 2024.)

NCEI NOAA (National Centers of Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration). s.d. Global Historical Climatology Network daily (GHCNd) [Dataset]. Sito web del NCEI NOAA. www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/global-historical-climatology-network-daily. (Consultato il 16 maggio 2024.)

Østrem, G. 2006. History of scientific studies at Peyto Glacier. M. N. Demuth, D. S. Munro e G. J. Young (a cura di), *Peyto Glacier – One Century of Science*. Saskatoon, Canada, National Water Research Institute Science, Environment Canada, pagg. 1-23.

Pomeroy, J. e Marks, D. (a cura di). 2024. Hydrometeorological data from mountain and alpine research catchments. [Special Issue]. *Earth System Science Data*. https://essd.copernicus.org/articles/special_issue871.html.

Pomeroy, J. W., Bernhardt, M. e Marks, D. 2015. Research network to track alpine water. *Nature*, vol. 521, pagg. 32-32. doi.org/10.1038/521032c.

Pomeroy, J. W., Brown, T., Fang, X., Shook, K. R., Pradhananga, D., Armstrong, R., Harder, P., Marsh, C., Costa, D., Krogh, S. A., Aubry-Wake, C., Annand, H., Lawford, P., He, Z., Kompanizare, M., Lopez, J. I. e Moreno, J. L. 2022. The cold regions hydrological modelling platform for hydrological diagnosis and prediction based on process understanding. *Journal of Hydrology*, vol. 615, articolo 128711. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128711.

Pradhananga, D. e Pomeroy, J. W. 2022. Diagnosing changes in glacier hydrology from physical principles using a hydrological model with snow redistribution, sublimation, firnification and energy balance ablation algorithms. *Journal of Hydrology*, vol. 608, articolo 127545. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127545.

Rauniyar, T. 2024. The drought that forced a Himalayan village in Nepal to relocate. BBC News, 23 maggio 2024. www.bbc.com/future/article/20240522-the-drought-that-forced-a-himalayan-village-in-nepal-to-relocate.

Rigler, G., Dokou, Z., Khadim, F. K., Sinshaw, B. G., Eshete, D. G., Aseres, M., Amera, W., Zhou, W., Wang, X., Moges, M., Azage, M., Li, B., Holzer, E., Tilahun, S., Bagtzoglou, A. e Anagnostou, E. 2022. Citizen science and the Sustainable Development Goals: Building social and technical capacity through data collection in the upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Sustainability*, vol. 14, N. 6, articolo 3647. doi.org/10.3390/su14063647.

Rowe, A. M. e Schuster-Wallace, C. 2023. Implementing EDI across a large formal research network: Contributing to equitable and sustainable water solutions for a changing climate. *Geoforum*, vol. 147, articolo 103881. doi.org/10.1016/j.geoforum.2023.103881.

Rueda Uribe, C., Herrera Alsina, L., Lancaster, L. T., Capellini, I., Layton, K. K. e Travis, J. M. 2024. Citizen science data reveal altitudinal movement and seasonal ecosystem use by hummingbirds in the Andes Mountains. *Ecography*, vol. 2024, N. 3, articolo e06735. doi.org/10.1111/ecog.06735.

Scheller, M., van Meerveld, I., Sauquet, E., Vis, M. e Seibert, J. 2024. Are temporary stream observations useful for calibrating a lumped hydrological model? *Journal of Hydrology*, vol. 632, articolo 130686. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130686.

Schuster-Wallace, C. J., Sandford, R., Dickin, S. K., Vijay, M., Laycock, K. e Adeel, Z. 2015. *Water in the World We Want: Catalysing National Water-Related Sustainable Development*. Hamilton, Canada, United Nations University Institute for Water, Environment and Health (UNU-IWEH). https://reliefweb.int/report/world/water-world-we-want-catalysing-national-water-related-sustainable-development.

Seconda conferenza di alto livello sul Decennio internazionale d'azione delle Nazioni Unite "Acqua per lo sviluppo sostenibile, 2018-2028". 2022. *Final Declaration from Dushanbe 2022 to New York 2023*. Dushanbe, 6-9 giugno 2022. https://dushanbewaterprocess.org/wp-content/uploads/2022/06/2022-final-declaration-final-draft-0608-en-final-1.pdf.

Strobl, B., Etter, S., van Meerveld, I. e Seibert, J. 2020. Accuracy of crowdsourced streamflow and stream level class estimates. *Hydrological Sciences Journal*, *Special Issue: Hydrological Data: Opportunities and Barriers*, vol. 65, N. 5. doi.org/10.1080/02626667.2019.1578966.

Tsosie, R. A. 2007. Indigenous People and environmental justice: The impact of climate change. *University of Colorado Law Review*, vol. 78, pag. 1625.

UNESCO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'educazione, la scienza e la cultura). 2021. *UNESCO Recommendation on Open Science*. Parigi, UNESCO. doi.org/10.54677/MNMH8546.

WMO (Organizzazione meteorologica mondiale). 2009. *Guide to Hydrological Practices*, Volume II. WMO-No. 168. Ginevra, WMO. https://library.wmo.int/records/item/36066-guide-to-hydrological-practices-volume-ii?offset=7.

——. 2020. *Guide to Hydrological Practices*, Volume I. WMO-No. 168. Ginevra, WMO. https://library.wmo.int/records/item/35804-guide-to-hydrological-practices-volume-i?offset=6.

——. 2024. Inaugural Session of the Third Pole Climate Forum (TPCF 1) and Meeting of Third Pole Regional Climate Centre Network (TPRCC-Network) Task Team. Sito web del WMO. https://community.wmo.int/en/en/activity-areas/climate/meetings/inaugural-session-third-pole-climate-forum-tpcf-1-and-meeting-third-pole-regional-climate-centre-network-tprcc-network-task-team.

Capitolo 9

Governance e finanziamenti

UNESCO WWAP
Matthew England e Richard Connor
Con il contributo di Ansgar Fellendorf (UNEP)

L'espressione "governance dell'acqua" fa riferimento alla gestione delle risorse idriche, ovvero alle politiche, alle istituzioni e ai processi decisionali che regolano l'uso e la conservazione della risorsa[20]. La governance dell'acqua nelle zone montane si è sviluppata nel tempo secondo modalità uniche e in modo diverso in ogni contesto. Tuttavia, il ruolo della governance dell'acqua nelle aree montane non ha suscitato lo stesso interesse delle zone di pianura, sulle quali si è concentrata buona parte delle iniziative, ad esempio attraverso la gestione integrata delle risorse idriche (Molden et al., 2013).

Il ruolo della governance dell'acqua nelle aree montane non ha suscitato lo stesso interesse delle zone di pianura

La governance dell'acqua nelle aree di montagna richiede una particolare attenzione, vista la crescente competizione per le risorse idriche, le dinamiche mutevoli del clima e i relativi impatti e altre sfide globali. Le sempre maggiori pressioni sulle risorse idriche dovute allo sviluppo socioeconomico, unitamente ai cambiamenti della disponibilità idrica stagionale, che varia dalla stagione calda a quella fredda, complicano i processi di governance dell'acqua. Per affrontare le molteplici sfide legate alla governance e ai sistemi socioecologici, sono necessarie ulteriori conoscenze e collaborazioni a diversi livelli e su più scale, sia nelle zone di montagna che in quelle a valle. Nel contesto delle dissertazioni e delle pratiche attuali, la governance dell'acqua di montagna viene spesso messa sullo stesso piano della protezione delle sorgenti e della gestione dei bacini idrografici, facendo leva sul modo in cui influisce sugli utenti a valle e va a loro beneficio.

Questo capitolo presenta innanzitutto un quadro generale della governance dell'acqua di montagna attraverso gli accordi e le politiche internazionali. In seguito, vengono esaminate le convenzioni regionali per la cooperazione tra bacini idrografici transfrontalieri, dato che molti fiumi hanno origine in montagna e attraversano i confini internazionali. Viene poi presentata una panoramica sulle politiche e la loro attuazione a livello nazionale, in relazione agli interessi in materia di sviluppo e alle modalità di gestione delle acque da parte delle comunità. Infine, vengono esaminati gli aspetti finanziari della governance dell'acqua nelle aree di montagna.

9.1 La governance dell'acqua nelle zone montane a livello internazionale

Le politiche internazionali offrono un promettente supporto alla governance dell'acqua e all'adattamento ai cambiamenti climatici nelle aree montane, affrontando al contempo il tema dello sviluppo sostenibile. I dati suggeriscono che i trattati e le convenzioni sono strumenti importanti per promuovere le strategie di cooperazione e la loro attuazione nelle regioni montane (Dinar et al., 2016). Tuttavia, a livello globale sono limitate le informazioni che permettono di valutare in modo sistematico la loro efficacia per affrontare sfide specifiche poste dai cambiamenti della criosfera montana (Hock et al., 2019).

Storicamente, sono stati diversi gli accordi che hanno portato all'elaborazione dei quadri internazionali relativi alle zone di montagna; l'importanza di questi ultimi è stata formalmente riconosciuta in occasione della Conferenza delle Nazioni Unite su ambiente e sviluppo del 1992. Il capitolo 13 del piano d'azione Agenda 21 era dedicato allo sviluppo sostenibile delle montagne (UNCED, 1992). Il testo sottolinea l'importanza degli ambienti montani a livello globale, regionale e locale, includendo tra le priorità la protezione delle risorse naturali e dell'acqua, il miglioramento dei mezzi di sussistenza delle comunità e delle popolazioni indigene e la promozione della cooperazione internazionale nelle aree montane. Con l'approvazione del capitolo 13 al più alto livello politico, e la partecipazione di oltre 178 Stati membri delle Nazioni Unite, per la prima volta la comunità internazionale ha espresso formalmente la sua preoccupazione in merito alle aree montane e il suo piano d'azione per esse (Romeo et al., 2022).

[20] Il rapporto speciale *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* fa riferimento alla governance come a uno «sforzo per stabilire, riaffermare o modificare istituzioni formali e informali su tutte le scale per instaurare relazioni e risolvere conflitti sociali, facendo in modo che ogni parte coinvolta ci guadagni» (IPCC, 2019, pag. 687).

Un decennio dopo, le Nazioni Unite hanno dichiarato il 2002 Anno internazionale delle montagne. Il documento finale della Conferenza delle Nazioni Unite sullo sviluppo sostenibile, intitolato *Il futuro che vogliamo*, ha riconosciuto che «gli ecosistemi montani svolgono un ruolo cruciale nel fornire risorse idriche a gran parte della popolazione mondiale» (Assemblea generale delle Nazioni Unite, 2012, pag. 41).

Successivamente, nel 2008, l'Assemblea generale delle Nazioni Unite ha adottato la risoluzione 62/196 sullo sviluppo sostenibile delle montagne. La risoluzione riconosce che le montagne forniscono indicazioni sui cambiamenti climatici attraverso le dinamiche di ritiro dei ghiacciai e le variazioni nel deflusso stagionale, che possono influenzare le fonti di acqua dolce. Inoltre, ha identificato le sfide allo sviluppo sostenibile delle montagne, tra cui la crescente domanda di acqua (soprattutto a valle) e le conseguenze di fenomeni quali erosione, deforestazione, degrado dei bacini idrografici e disastri naturali. Infine, la risoluzione sottolinea l'importanza delle montagne quali sorgenti e fonti d'acqua per le aree a valle, spesso densamente popolate (Assemblea generale delle Nazioni Unite, 2008).

Le politiche internazionali offrono un promettente supporto alla governance dell'acqua e all'adattamento ai cambiamenti climatici nelle aree montane

Più di recente, l'Assemblea generale delle Nazioni Unite ha dichiarato il 2022 Anno internazionale dello sviluppo sostenibile delle montagne sulla base di una proposta del Governo del Kirghizistan appoggiata da 94 paesi.

Le acque di montagna hanno ricevuto attenzione anche nell'ambito di altri quadri internazionali, come l'Accordo di Parigi (UNFCCC, 2015) e il Quadro di Sendai per la riduzione del rischio di disastri 2015-2030 (Assemblea generale delle Nazioni Unite, 2015a). Questi quadri hanno evidenziato l'importanza del monitoraggio e della presentazione di dati in relazione a obiettivi e indicatori rilevanti per la governance dell'acqua.

La *Convenzione sulla protezione e l'utilizzazione dei corsi d'acqua transfrontalieri e dei laghi internazionali* (o Convenzione Acque) fornisce una piattaforma giuridica e intergovernativa unica a livello mondiale per la cooperazione transfrontaliera nella gestione delle acque, e può essere determinante per la governance e la salvaguardia sostenibile delle montagne. La convenzione impegna e aiuta i paesi a elaborare e mettere in atto accordi transfrontalieri, nonché a istituire organismi comuni per la cooperazione transfrontaliera che coprano anche le regioni montane. Inoltre, garantisce un approccio "dalla fonte al mare", in cui il bacino idrografico, da monte a valle, viene gestito come un sistema olistico.

Gli Obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite (Assemblea Generale delle Nazioni Unite, 2015b) possono offrire ulteriori prospettive per rafforzare la governance dell'acqua in un contesto in cui la criosfera è interessata da cambiamenti; dal monitoraggio e dalla presentazione di dati in merito ai traguardi e agli indicatori chiave relativi alle risorse idriche, nonché alle interconnessioni con altri Obiettivi, infatti, emerge che la fornitura di acqua è una condizione essenziale per lo sviluppo. Tuttavia, le informazioni per valutare concretamente la loro efficacia sono limitate (Hock et al., 2019).

9.2 La governance dell'acqua nelle zone montane a livello regionale

La maggior parte dei fiumi di maggiori dimensioni ha origine nelle zone montane e spesso attraversa i confini internazionali. Una governance delle acque transfrontaliere basata su un approccio a livello di bacino che tenga conto delle acque di montagna può garantire benefici ai paesi rivieraschi. La cooperazione regionale tra paesi, comprese le iniziative di governance dei bacini idrografici, è un meccanismo importante per promuovere l'adattamento al clima nelle aree montane (Molden et al., 2013; Mishra et al., 2019). Trattati o accordi possono rafforzare la cooperazione tra paesi confinanti, promuovendo una più intensa attività di monitoraggio ed elaborazione di dati, che solitamente scarseggiano nelle regioni montane; aiutare a identificare e colmare le lacune nelle competenze tecniche umane e istituzionali; istituire comitati di gestione congiunta; promuovere la condivisione delle informazioni; incoraggiare e favorire il dialogo e la diplomazia tra paesi vicini (Adler et al., 2022).

Una ricerca condotta sulle iniziative di governance per la montagna a livello regionale ha identificato alcuni fattori rilevanti in relazione alle acque di alta quota (riquadro 9.1). Sebbene gli accordi iniziali tra paesi confinanti siano spesso insufficienti o troppo generici per promuovere una cooperazione duratura, tali accordi creano comunque le basi per stipulare ulteriori trattati che incoraggino una maggiore cooperazione[21] (ad esempio, quelli più specifici e dedicati a una determinata questione che interessa il bacino). L'aumento della variabilità idrologica, indotta dal clima, spinge i paesi a mostrare un atteggiamento cooperativo, soprattutto a livello operativo, come testimoniano i casi di gestione delle acque attraverso infrastrutture condivise. Tuttavia, quando la variabilità idrologica supera una certa soglia, gli approcci cooperativi possono risentirne (Dinar et al., 2016). È stato riscontrato che il conflitto tra interessi nazionali nel contesto degli accordi sulle acque transfrontaliere, così come l'inefficacia delle istituzioni nel promuovere il coordinamento a livello locale, ostacolano una cooperazione efficace (Kliot et al., 2001; Hayat et al., 2022).

Riquadro 9.1 Elementi costitutivi delle iniziative di governance delle zone di montagna a livello regionale

Fra le principali caratteristiche delle iniziative di governance delle aree di montagna su scala regionale si possono annoverare le seguenti:

- territorialità: portata geografica dell'iniziativa, in termini di giurisdizione dei membri e zona di applicazione degli accordi;
- formalità istituzionale: grado di giustificazione, o informalità, e mezzi di attuazione;
- integrazione settoriale: numero di settori e meccanismi istituzionali che li collegano;
- coordinamento verticale: varietà e natura del coinvolgimento degli attori gonvernativi a diversi livelli, nonché grado di accettazione dell'iniziativa e meccanismi di applicazione della sussidiarietà;
- participazione della società civile: grado e natura del coinvolgimento delle organizzazioni non governative e del settore privato;
- interfaccia scienza-politica: natura dei meccanismi istituzionali per lo scambio bilaterale tra chi si occupa della formulazione delle politiche e membri della comunità scientifica;
- modalità di finanziamento: valutazione delle fonti di finanziamento e delle spese, nella misura in cui le informazioni sono disponibili;
- adattamento basato sugli ecosistemi in relazione ai cambiamenti climatici, anche per quanto riguarda l'acqua.

Fonte: estratto da Balsiger et al. (2020, pagg. 5-6).

[21] Il diritto internazionale consuetudinario e i principi generali regolano anche gli usi delle acque transfrontaliere e possono essere utili per facilitare la cooperazione.

È stato riscontrato che il conflitto tra interessi nazionali nel contesto degli accordi sulle acque transfrontaliere, così come l'inefficacia delle istituzioni nel promuovere il coordinamento a livello locale, ostacolano una cooperazione efficace

I seguenti tre accordi regionali forniscono esempi di cooperazione in materia di acque transfrontaliere nelle zone di montagna.

La catena montuosa dell'**Hindu Kush Himalaya** si estende per oltre 3.500 chilometri ed è condivisa da otto paesi (Afghanistan, Bangladesh, Bhutan, Cina, India, Myanmar, Nepal e Pakistan); su queste montagne hanno origine dieci grandi bacini idrografici. La regione ospita 240 milioni di persone e si stima che 1,65 miliardi di persone a valle dipendano dalle acque montane per l'acqua potabile e i servizi igienico-sanitari, il cibo (tramite l'irrigazione), l'energia (di tipo idroelettrico) e i servizi ecosistemici (habitat, flussi ambientali e considerevoli valori culturali). L'acqua di fusione dei ghiacciai e delle nevi è una componente importante del flusso dei torrenti, il cui contributo relativo aumenta con l'altitudine e la vicinanza alle riserve di ghiacciai e nevi. Anche le acque sotterranee, provenienti da sorgenti situate sulle alture medie della regione dell'Hindu Kush Himalaya, contribuiscono in modo significativo ad alimentare il flusso di base dei fiumi (Wester et al., 2019).

Nella regione dell'Hindu Kush Himalaya manca tuttavia un'efficace cooperazione transfrontaliera per migliorare la governance dell'acqua. Le iniziative intergovernative si sono concentrate sugli interessi politici ed economici delle varie nazioni, piuttosto che sul benessere sociale e ambientale dell'intera regione. La governance dell'acqua è caratterizzata da regimi ibridi formali-informali, con una prevalenza di istituzioni informali a livello locale e istituzioni statali formali a livello nazionale e regionale. Si è osservato che la sinergia e il sostegno tra istituzioni statali e informali per la gestione dell'acqua sono spesso carenti. Ad esempio, le disuguaglianze di genere sono molto diffuse nelle istituzioni, il che non consente un accesso equo all'acqua. Similmente, a livello regionale la condivisione dei dati e il miglioramento della cooperazione in materia di acque transfrontaliere sono spesso ostacolati da una reciproca mancanza di fiducia. Va sottolineato, a tal proposito, che la condivisione dei dati e delle informazioni è un passo fondamentale per la riduzione del rischio di disastri su scala transfrontaliera, come nel caso delle inondazioni da collasso di laghi glaciali (vedere sezione 2.2.3). La sfiducia tra i paesi rivieraschi limita di fatto la condivisione dei benefici derivanti dall'acqua e dai servizi ad essa collegati, come l'irrigazione, l'energia e la navigazione (Wester et al., 2019).

Per la regione dell'Hindu Kush Himalaya sono stati individuati elementi fondamentali per migliorare la governance dell'acqua e la cooperazione transfrontaliera (vedere sezione 7.4). Tali elementi includono: la necessità di quadri normativi formali come base per la cooperazione regionale; l'importanza di piattaforme di condivisione delle conoscenze per facilitare la cooperazione su scala regionale; la necessità di un meccanismo appropriato per gestire i conflitti e distribuire equamente i benefici (Wester et al., 2019).

Nella regione dell'Hindu Kush Himalaya, la cooperazione transfrontaliera a livello di bacino idrografico (locale) ha una lunga tradizione, mentre la governance a livello di catena montuosa è un fenomeno recente (riquadro 9.2). Il linguaggio della cooperazione transfrontaliera risente della pressione di agende e interessi politici e territoriali. In questo contesto, può risultare più conveniente promuovere una collaborazione fra paesi rivieraschi nel quadro della cooperazione regionale attorno alle catene montuose.

Riquadro 9.2 *Task force* di alto livello per l'Hindu Kush Himalaya

In un'ottica di progressivo rafforzamento della governance per l'intera catena montuosa, gli otto paesi della regione dell'Hindu Kush Himalaya hanno creato una *task force* di alto livello per dare seguito alle raccomandazioni precedentemente formulate nel contesto della Call to Action per la regione (ICIMOD, 2020). I paesi hanno approvato l'istituzione di tale *task force* in occasione del primo vertice ministeriale (HKH Ministerial Mountain Summit) tenutosi nel 2020. Alla riunione dei ministri degli otto paesi è stata firmata una dichiarazione di importanza storica, con la quale si è concordato di rafforzare la cooperazione regionale. Gli alti funzionari governativi collaborano ora nell'ambito della *task force* di alto livello per l'Hindu Kush Himalaya per monitorare i progressi della Call to Action e valutare il potenziale dei meccanismi istituzionali con l'obiettivo di rafforzare la collaborazione.

La Call to Action per la regione dell'Hindu Kush Himalaya fornisce una tabella di marcia per il futuro della zona, articolata in sei azioni:

1. cooperare a tutti i livelli per ottenere vantaggi sostenibili e reciproci;
2. riconoscere e dare priorità all'unicità delle popolazioni di montagna;
3. portare avanti iniziative congiunte sul clima, a tutti i livelli, per contenere il riscaldamento globale a 1,5 °C entro il 2100;
4. adottare delle strategie per accelerare il conseguimento degli Obiettivi di sviluppo sostenibile e le nove priorità relative alle zone di montagna;
5. migliorare la resilienza degli ecosistemi, arrestare la perdita di biodiversità e il degrado del suolo;
6. condividere dati e informazioni a livello regionale, promuovere la cooperazione scientifica e la conoscenza.

Inoltre, nella Call to Action vengono trattati i temi della cooperazione e della governance in materia di acque transfrontaliere.

Più nello specifico, l'Azione 5 invita i paesi della regione dell'Hindu Kush Himalaya ad attuare programmi sugli ecosistemi d'acqua dolce, compresi quelli relativi alla criosfera e ai bacini idrografici, a sostegno della qualità dell'acqua e dei flussi nei fiumi della regione. Tale azione raccomanda di optare per una gestione dei bacini idrografici su scala transfrontaliera. Inoltre, i paesi della regione dell'Hindu Kush Himalaya vengono sollecitati a tener conto degli ecosistemi acquatici e d'acqua dolce nelle politiche e nelle strategie nazionali e subnazionali, ad esempio promuovendo la valutazione dell'impatto ambientale e sociale dei progetti di sviluppo, come quelli per energia idroelettrica, dighe e strade. Inoltre, viene sottolineata la necessità di incentivare i sussidi per i servizi ecosistemici a vantaggio delle popolazioni che proteggono i bacini idroelettrici, così come per l'approvvigionamento di acqua potabile e per il turismo.

L'Azione 6, invece, incoraggia la generazione e la condivisione di dati sulle variabili climatiche, anche per quanto riguarda l'acqua, la sicurezza energetica e alimentare, la biodiversità e la povertà nelle aree di montagna. Promuove in modo proattivo la cooperazione fra paesi rivieraschi per condividere dati aperti per i beni e i servizi pubblici.

Fonti: adattato da ICIMOD (2020) e Adaptation at Altitude (s.d.).

La **Convenzione delle Alpi** (vedere sezione 7.2.1) è un trattato internazionale per la cooperazione transfrontaliera firmato nel 1991 e prevede un Segretariato permanente e un organo direttivo (Romeo et al., 2022). La convenzione coinvolge Austria, Francia, Germania, Italia, Liechtenstein, Monaco, Slovenia, Svizzera e Unione europea. È uno degli unici due trattati relativi alle montagne giuridicamente vincolanti, insieme alla Convenzione dei Carpazi (Balsiger et al., 2020). Identifica 12 aree attraverso otto protocolli giuridicamente vincolanti[22]. Tuttavia, non esiste un protocollo sull'acqua, la cui gestione resta una questione trasversale (Balsiger, 2007; Lackner e Psenner, 2007), essendo sotto la giurisdizione dei governi nazionali. Il Segretariato della Convenzione delle Alpi assiste i paesi membri sviluppando linee guida su temi quali l'impatto dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche (Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi, 2014). Il trattato ha dato l'opportunità di accelerare l'adozione di misure di adattamento attraverso l'integrazione delle risposte politiche dei vari paesi, la promozione di partenariati e la creazione di reti (Balsiger, 2007).

La **Convenzione dei Carpazi** è stata adottata nel 2003 per proteggere la seconda catena montuosa più grande d'Europa (vedere sezione 7.2). È stata sottoscritta da Repubblica Ceca, Polonia, Romania, Serbia, Slovacchia, Ucraina e Ungheria (Segretariato della Convenzione dei Carpazi, 2020). È l'unico meccanismo di governance multilivello per l'intera regione che fornisce un quadro per la cooperazione e il coordinamento di politiche multisettoriali, una piattaforma per le strategie congiunte di sviluppo sostenibile e un forum per il dialogo tra tutte le parti interessate (Climate-ADAPT, s.d.). Il Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente ospita il Segretariato della Convenzione dei Carpazi, e il suo gruppo di lavoro porta avanti una visione a lungo termine per l'adattamento ai cambiamenti climatici. In particolare, l'articolo 6 della convenzione si concentra sulla gestione sostenibile e integrata dei bacini idrografici. Esiste anche un gruppo di lavoro sull'adattamento che menziona la vulnerabilità dell'acqua e degli ecosistemi ai cambiamenti climatici nel suo mandato.

9.3 La governance dell'acqua nelle zone montane a livello nazionale e locale

La gestione delle acque di montagna si svolge principalmente all'interno dei confini dei paesi, attraverso leggi, politiche e strategie nazionali. La formulazione e l'attuazione delle politiche avvengono nel contesto politico-economico di un paese. In alcuni casi, le politiche nazionali in materia di acqua, agricoltura, industria ed energia vengono sviluppate per favorire le regioni a valle dei bacini idrografici, ad esempio con l'obiettivo di rifornire le aree più popolate. Spesso le politiche nazionali non riflettono appieno le problematiche settoriali relative all'acqua nelle zone montane, ma tendono piuttosto a vedere le montagne come fonti per gli utenti a valle.

Le raccomandazioni contenute nei quadri internazionali e negli accordi transfrontalieri forniscono indicazioni per lo sviluppo di politiche e strategie nazionali. Diverse strategie e approcci vengono universalmente proposti per migliorare la governance dell'acqua nelle zone montane. Tra questi, si possono citare l'importanza di fattori quali rafforzare la collaborazione e aumentare il monitoraggio, compresa la raccolta e la condivisione dei dati; usufruire delle diverse conoscenze indigene e locali; promuovere l'uguaglianza di genere; dare priorità allo sviluppo inclusivo e agli approcci di adattamento al clima per ridurre la povertà nelle aree montane; creare piattaforme o meccanismi per la risoluzione dei conflitti e accordi di condivisione dei benefici tra i paesi rivieraschi (Adler et al., 2022).

I dati relativi alla regione dell'Hindu Kush Himalaya evidenziano che il processo di attuazione delle politiche nei paesi migliorerà solo se i governi nazionali riconosceranno

[22] Gli otto protocolli riguardano: *Pianificazione territoriale e sviluppo sostenibile*; *Agricoltura di montagna*; *Protezione della natura e conservazione del paesaggio*; *Foreste montane*; *Turismo*; *Energia*; *Difesa del suolo*; *Trasporti*.

La gestione delle acque di montagna si svolge principalmente all'interno dei confini dei paesi, attraverso leggi, politiche e strategie nazionali

la natura multisettoriale e interscalare della governance dell'acqua. Tale processo dipende dall'impegno di vari *stakeholder*, comprese le comunità indigene e le donne, e dal ricorso alle conoscenze locali. È necessario facilitare le interazioni a monte e a valle per migliorare la governance a livello territoriale. A livello nazionale si raccomanda di rafforzare la partecipazione delle comunità e il decentramento, promuovere il coinvolgimento di più soggetti interessati e affrontare le sfide relative all'attuazione dei processi di gestione. I governi devono creare quadri normativi e accordi istituzionali su scala locale per consentire la diffusione di iniziative di successo per potenziare l'azione delle comunità e favorire la creazione di partenariati tra comunità e governi (Wester et al., 2019).

Le regioni montane potrebbero godere di notevoli benefici se la governance desse la priorità ad approcci più inclusivi allo sviluppo e all'adattamento. Questi includono un approccio rispettoso ai diversi saperi indigeni e ai sistemi di conoscenze locali nel contesto delle aree montane, oltre a uno sforzo costante nell'affrontare le cause profonde della vulnerabilità. Ciò richiederebbe un migliore coordinamento e attività di monitoraggio; meccanismi decisionali più inclusivi, anche per piccoli agricoltori, donne, popolazioni indigene e gruppi giovanili; inoltre, un aumento sostanziale dei finanziamenti per lo sviluppo sostenibile delle montagne. Questi fattori chiave relativi alla governance rappresentano una risposta importante alle sfide che le regioni montane devono affrontare, soprattutto in relazione alle acque di montagna.

Leggi sulla protezione dei ghiacciai

Solo pochi paesi hanno leggi dedicate alla protezione o alla conservazione dei ghiacciai. La legge nazionale argentina sui ghiacciai (vedere sezione 7.3.1), che vieta l'estrazione mineraria nelle aree occupate da ghiacciai e permafrost, è stata approvata nel 2010 e confermata dalla Corte suprema argentina nel 2018 (Taillant, 2019). Nel 2024, il Tagikistan ha approvato una legge che delinea le basi legali, economiche e organizzative per la protezione dei ghiacciai in qualità di beni ambientali e fonti strategiche di risorse idriche (Repubblica del Tagikistan, 2024). Altri paesi come il Cile (riquadro 5.1) e il Kirghizistan hanno proposto leggi simili che definiscono i ghiacciai come aree protette (Iribarren Anacona et al., 2018).

Poiché i ghiacciai sono sistemi dinamici, tali quadri giuridici possono essere complessi e difficili da adottare e mettere in pratica. Possono includere considerazioni sull'approvvigionamento idrico e sulla qualità dell'acqua, nonché misure preventive o di emergenza per affrontare i rischi legati ai ghiacciai, bilanciando diversi punti di vista ed esigenze al fine di scongiurare conflitti sociali, ambientali ed economici.

9.4 Valutazione e finanziamenti

Mentre alcuni dei beni e servizi forniti dagli ambienti montani, come il legname, l'energia idroelettrica e i minerali, possono avere un valore economico misurabile (ad esempio, i costi di estrazione rispetto ai profitti), i benefici e i valori ambientali sono molto più difficili da quantificare. Si pensi all'acqua pulita, all'aria e alla biodiversità. Inoltre, le risorse montane sono intrinsecamente complesse e interconnesse, e costituiscono quindi un insieme comune piuttosto che singoli elementi a sé stanti.

L'esame delle perdite e dei danni causati dai pericoli naturali fornisce anche indicazioni sul valore complessivo delle regioni montane (riquadro 9.3).

Riquadro 9.3 Perdite economiche dovute ai pericoli naturali in montagna

Tra il 1985 e il 2014, i costi dei danni economici riportati dalle regioni montane a causa di inondazioni e movimenti di massa (compresi quelli non direttamente legati alla criosfera) sono stati più elevati nella regione dell'Hindu Kush Himalaya (45 miliardi di dollari), seguita dalle Alpi europee (7 miliardi di dollari) e dalle Ande (3 miliardi di dollari; Stäubli et al., 2018). Secondo le stime, in Perù il costo del ritiro dei ghiacciai per il settore energetico sarebbe stato di 740 milioni di dollari all'anno, e nel complesso avrebbe determinato una riduzione della produzione di energia elettrica tra l'11% e il 15% (Vergara et al., 2007). Analogamente, si ritiene che la Svizzera, che utilizza l'energia idroelettrica per generare oltre la metà dell'energia del paese, perderà circa il 21% del suo afflusso energetico annuale nel periodo 2031-2050 rispetto al periodo 1991-2010, e si prevede un'ulteriore riduzione del suo potenziale idroelettrico a causa del restringimento della criosfera (Gaudard et al., 2013).

La valutazione dei danni, in termini monetari, spesso include solo il valore delle infrastrutture distrutte e non considera quello dei terreni agricoli (Muhammad et al., 2021) o i danni a lungo termine alle infrastrutture stradali, sanitarie o scolastiche (Shrestha et al., 2023). L'aumento dei pericoli legati al clima, combinato con la variazione della disponibilità di acqua di fusione, ha colpito più duramente le popolazioni indigene e le comunità montane locali che dipendono dallo scioglimento dei ghiacciai e delle nevi per il proprio sostentamento. Queste comunità spesso subiscono perdite e danni di natura non economica o intangibili, come la perdita del patrimonio culturale e di paesaggi sacri, il che costituisce una minaccia anche per la loro stessa capacità di adattamento (Adler et al., 2022).

Fonte: adattato da UNEP (2023).

Disponibilità di risorse finanziarie

I governi nazionali sono importanti fonti di sostegno economico, di solito attraverso strumenti settoriali come le politiche agricole e idriche. Anche diversi programmi di cooperazione territoriale con una qualche componente relativa alle zone di montagna possono essere fonte di finanziamento. Nei paesi in via di sviluppo, i donatori bilaterali e multilaterali possono fornire alcune sovvenzioni aggiuntive (Balsiger et al., 2020).

I governi nazionali sono importanti fonti di sostegno economico, di solito attraverso strumenti settoriali come le politiche agricole e idriche

Il finanziamento delle misure di adattamento, l'inclusione del settore privato e il contributo di quest'ultimo costituiscono fattori chiave per conseguire potenziali strategie di adattamento per le aree montane (Mishra et al., 2019; UNEP, 2023). Sebbene in teoria siano disponibili ingenti finanziamenti per gli investimenti nello sviluppo sostenibile delle regioni montane, l'accesso ai principali programmi di sostegno è stato relativamente limitato; questo significa che delle importanti opzioni di risposta rimangono inutilizzate (McDowell et al., 2020). In particolare, fondi innovativi e accessibili a livello internazionale, regionale,

nazionale e locale dovrebbero essere utilizzati a sostegno di una pianificazione in materia di acqua, agricoltura ed energia, nonché per investimenti infrastrutturali. Un maggiore ricorso alle misure di sostegno e ai finanziamenti disponibili potrebbe inoltre contribuire ad alleggerire il peso che grava sulle comunità e sui paesi di montagna, i quali hanno bisogno di rafforzare la capacità e l'abilità degli attori coinvolti di identificare e mobilitare le risorse finanziarie. Sono stati per questo identificati alcuni fattori favorevoli per incoraggiare gli investimenti finanziari nelle zone di montagna (riquadro 9.4; Wymann von Dach et al., 2016).

Lo sviluppo nelle zone montane è generalmente più costoso e complesso che in aree pianeggianti, a causa dei terreni accidentati e della scarsa accessibilità, delle limitazioni delle economie di scala, della notevole distanza dai porti marittimi e dai centri economici e a causa di uno scarso sviluppo del settore industriale e dei servizi. Ne consegue che i costi relativi a trasporti, infrastrutture, beni e servizi aumentano con l'altitudine e l'isolamento. Questo aspetto deve essere considerato nelle politiche e nelle misure di finanziamento, insieme alla necessità di politiche e programmi specifici per le zone montane nel quadro dei piani di sviluppo nazionali e globali.

Riquadro 9.4 Fattori che incoraggiano gli investimenti finanziari nelle zone di montagna

- La creazione di un contesto nazionale favorevole. Ciò prevede l'esistenza di una politica nazionale per le regioni montane, in linea con le politiche generali per lo sviluppo dello Stato, che possa incoraggiare e coordinare gli investimenti pubblici.
- La sicurezza è un prerequisito per gli investimenti. Questo aspetto riguarda la stabilità politica, la fiducia nella leadership, lo stato di diritto e l'accesso sicuro a risorse come la terra, il credito, i risparmi e le assicurazioni per gli investitori a livello locale, nazionale ed internazionale.
- Gli investimenti dovrebbero essere preferibilmente decentralizzati, con particolare attenzione alle piccole e medie imprese, in ragione della dispersione degli insediamenti, la topografia dissestata e la bassa densità di popolazione in molte aree montane rispetto alle pianure. Le città di piccole e medie dimensioni offrono l'opportunità di attuare questi principi di investimento.
- Il decentramento politico e fiscale è importante perché si possa prendere consapevolezza di come spesso ambiente, società e cultura siano diversi anche in zone relativamente vicine. Questo aspetto comporta il trasferimento di poteri, competenze e finanziamenti a enti subnazionali e locali.
- La collaborazione transfrontaliera crea opportunità d'investimento, poiché le regioni montane spesso si trovano a cavallo dei confini nazionali. Tra queste opportunità, si possono citare gli investimenti in infrastrutture di transito e di gestione delle acque transfrontaliere, nonché in strategie di riduzione del rischio di disastri. Le organizzazioni che si occupano dei bacini idrografici transfrontalieri e le autorità di bacino potrebbero facilitare od ospitare i processi di pianificazione congiunta degli investimenti da parte degli Stati confinanti, razionalizzandoli grazie a meccanismi innovativi ed efficienti di finanziamento misto.
- Conoscenza e ricerca. La conoscenza locale e scientifica e lo sviluppo delle competenze sono importanti per adattare gli investimenti a specifiche condizioni naturali e culturali. Il monitoraggio dei risultati degli investimenti è fondamentale per illustrare i benefici che vanno a vantaggio delle comunità e degli ecosistemi montani nel loro complesso, nonché degli stessi investitori, il che contribuisce ad attrarre maggiori investimenti per lo sviluppo sostenibile delle montagne.

Fonte: adattato da Wymann von Dach et al. (2016, pag. 67).

Lo sviluppo nelle zone montane è generalmente più costoso e complesso che in aree pianeggianti

Sebbene l'importanza dei servizi ecosistemici (vedere capitolo 6) forniti dalle montagne sia ampiamente riconosciuta, le popolazioni di montagna che contribuiscono a garantire queste risorse raramente ricevono compensazioni. Le politiche e gli investimenti saranno più sostenibili se promuoveranno un'equa condivisione dei benefici derivanti dalla gestione delle acque di montagna con le popolazioni montane. È chiaro che le acque di montagna offrono ampio spazio per lo sviluppo di meccanismi di investimento e di compensazione per la salvaguardia degli ecosistemi montani, nonché per il miglioramento dei mezzi di sussistenza delle popolazioni montane. Ciò potrebbe avvenire, per ipotesi, attraverso il finanziamento partecipativo per la gestione dei bacini idrografici e la condivisione diretta dei benefici (ad esempio, la condivisone dei flussi di reddito derivanti dalla generazione di energia idroelettrica con le popolazioni che vivono nelle vicinanze delle centrali).

I rapporti di produzione tra altipiani e zone di pianura e le condizioni commerciali tendono ad essere asimmetrici, favorendo le seconde. Inoltre, le industrie estrattive come quella mineraria, ma anche la produzione di energia idroelettrica e la raccolta di legname, tendono a essere poco vantaggiose per le popolazioni di montagna. Concentrarsi su piani di investimento congiunti che coprano più settori, come energia, agricoltura, pesca, acqua potabile, trasporti e servizi ecosistemici, può fornire interessanti profili di rischio-rendimento. I piani di investimento congiunti e integrati possono inoltre contribuire a ridurre la probabilità di conflitti, favorendo una comprensione comune degli interessi settoriali, politici e generazionali sulla base della disponibilità attuale e futura di acqua, nonché offrendo interessanti possibilità di riduzione del rischio per gli investitori (UNCDF, 2021).

Riferimenti bibliografici

Adaptation at Altitude. s.d. Hindu Kush Himalaya. Sito web di Adaptation at Altitude. https://mountains-connect.org/mountain-range-hindu-kush-himalaya/.

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. e Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem e B. Rama (a cura di), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contributo del Gruppo di lavoro II al Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico. Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Assemblea generale delle Nazioni Unite. 2008. Sustainable Mountain Development. Risoluzione adottata dall'Assemblea generale il 19 dicembre 2007. Sessantaduesima sessione, A/RES/62/196. https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n07/475/53/pdf/n0747553.pdf.

——. 2012. The Future We Want. Risoluzione adottata dall'Assemblea generale il 27 luglio 2012. Sessantaseiesima sessione, A/RES/66/288. www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_66_288.pdf.

——. 2015a. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Risoluzione adottata dall'Assemblea generale il 3 giugno 2015. Sessantanovesima sessione, A/RES/69/283. www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_69_283.pdf.

——. 2015b. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Risoluzione adottata dall'Assemblea Generale il 25 settembre 2015. Settantesima sessione, A/RES/70/1. www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf.

Balsiger, J. 2007. *Regionalism Reconsidered: The Alpine Convention as a Model of Earth System Governance.* Articolo presentato alla Conferenza di Amsterdam del 2007 sulle dimensioni umane del cambiamento ambientale globale, 24-26 maggio 2007.

Balsiger, J., Dupuits, E. e Scolobig, A. 2020. *International Experience in Transboundary Mountain Governance: Insights for Andean Cooperation.* Ginevra, Institute for Environmental Governance and Territorial Development, Università di Ginevra. https://archive-ouverte.unige.ch/unige:145756.

Climate-ADAPT. s.d. Carpathian Convention. Sito web del Climate-ADAPT. https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/organisations/carpathian-convention.

Dinar, S., Katz, D., De Stefano, L. e Blankespoor, B. 2016. *Climate Change and Water Variability: Do Water Treaties Contribute to River Basin Resilience?* Policy Research Working Paper No. 7855. Washington DC, Banca mondiale. https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/209901476193940390/climate-change-and-water-variability-do-water-treaties-contribute-to-river-basin-resilience.

Gaudard, L., Gilli, M. e Romerio, F. 2013. Climate change impacts on hydropower management. *Water Resources Management*, vol. 27, pagg. 5143-5156. doi.org/10.1007/s11269-013-0458-1.

Hayat, S., Gupta, J., Vegelin, C. e Jamali, H. 2022. A review of hydro-hegemony and transboundary water governance. *Water Policy*, vol. 24, N. 11, pagg. 1723-1740. doi.org/10.2166/wp.2022.256.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. e Steltzer, H. 2019. High mountain areas. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama e N. M. Weyer (a cura di), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 131-202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.

ICIMOD (Centro internazionale per lo sviluppo integrato della montagna). 2020. *The HKH Call to Action to Sustain Mountain Environments and Improve Livelihoods in the Hindu Kush Himalaya.* Kathmandu, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1.

IPCC (Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico). 2019. Annex I: Glossary [Weyer, N. M. (a cura di)]. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama e N. M. Weyer (a cura di), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, Regno Unito/New York, Cambridge University Press, pagg. 677-702. doi.org/10.1017/9781009157964.015.

Iribarren Anacona, P., Kinney, J., Schaefer, M., Harrison, S., Wilson, R., Segovia, A., Mazzorana, B., Guerra, F., Farías, D., Reynolds, J. M. e Glasser, N. F. 2018. Glacier protection laws: Potential conflicts in managing glacial hazards and adapting to climate change. *Ambio*, vol. 47, pagg. 835-845. doi.org/10.1007/s13280-018-1043-x.

Kliot, N., Shmueli, D. e Shamir, U. 2001. Institutions for management of transboundary water resources: Their nature, characteristics and shortcomings. *Water Policy*, vol. 3, N. 3, pagg. 229-255. doi.org/10.1016/S1366-7017(01)00008-3.

Lackner, R. e Psenner, R. 2007. *The water balance of the Alps: What do we need to protect the water resources of the Alps?* Atti del convegno tenutosi presso l'Università di Innsbruck, 28-29 settembre 2006. Innsbruck University Press. doi.org/10.26530/OAPEN_503830.

McDowell, G., Harris, L., Koppes, M., Price, M. F., Chan, K. M. A. e Lama, D. G. 2020. From needs to actions: Prospects for planned adaptations in high mountain communities. *Climatic Change*, vol. 163, pagg. 953-972. doi.org/10.1007/s10584-020-02920-1.

Mishra, A., Appadurai, A. N., Choudhury, D., Regmi, B. R., Kelkar, U., Alam, M., Chaudhary, P., Mu, S. S., Ahmed, A. U., Lotia, H., Fu, C., Namgyel, T. e Sharma, U. 2019. Adaptation to climate change in the Hindu Kush Himalaya: Stronger action urgently needed. P. Wester, A. Mishra e A. B. Shrestha (a cura di), *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People.* Cham, Svizzera, Springer, pagg. 457-490. doi.org/10.1007/978-3-319-92288-1_13.

Molden, D., Hurni, H., Zimmermann, A. e Wymann von Dach, S. 2013. Focus issue: Water governance in mountains. *Mountain Research and Development*, vol. 33, N. 3, pagg. 193-194. doi.org/10.1659/mrd.3303.

Muhammad, S., Li, J., Steiner, J. F., Shrestha, F., Shah, G. M., Berthier, E., Guo, L., Wu, L.-X. e Tian, L. 2021. A holistic view of Shisper Glacier surge and outburst floods: From physical processes to downstream impacts. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 12, N. 1, pagg. 2755-2775. doi.org/10.1080/19475705.2021.1975833.

Repubblica del Tagikistan. 2024.*Закон Республики Таджикистан о защите ледников* [Legge della Repubblica del Tagikistan sulla protezione dei ghiacciai]. No. 2026. Dushanbe. https://faolex.fao.org/docs/pdf/taj224299.pdf.

Romeo, R., Manuelli, S. e Abear, S. 2022. The International Year of Sustainable Mountain Development 2022: An opportunity to promote action for mountains. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 6, N. 933080. doi.org/10.3389/fsufs.2022.933080.

Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi. 2014. La Convenzione quadro: Principi guida per una vita sostenibile nelle Alpi. Sito web della Convenzione delle Alpi. https://www.alpconv.org/it/home/convenzione/convenzione-quadro/.

Segretariato della Convenzione dei Carpazi. 2020. *Long-term Vision 2030 Towards Combating Climate Change in the Carpathians*. Gruppo di lavoro della Convenzione dei Carpazi sui cambiamenti climatici. Sesto incontro della Conferenza delle Parti della convenzione quadro sulla protezione e lo sviluppo sostenibile dei Carpazi. http://www.carpathianconvention.org/tl_files/carpathiancon/Downloads/03%20Meetings%20and%20Events/COP/2020_COP6_Online/official%20documents/CC%20COP6%20DOC10_Long_Term_Vision_2030_FINAL%20DRAFT.pdf.

Shrestha, F., Steiner, J. F., Shrestha, R., Dhungel, Y., Joshi, S. P., Inglis, S., Ashraf, A., Wali, S., Walizada, K. M. e Zhang, T. 2023. A comprehensive and version-controlled database of glacial lake outburst floods in High Mountain Asia. *Earth System Science Data*, vol. 15, N. 9, pagg. 3941-3961. doi.org/10.5194/essd-15-3941-2023.

Stäubli, A., Nussbaumer, S. U., Allen, S. K., Huggel, C., Arguello, M., Costa, F., Hergarten, C., Martínez, R., Soto, J., Vargas, R., Zambrano, E. e Zimmermann, M. 2018. Analysis of weather- and climate-related disasters in mountain regions using different disaster databases. S. Mal, R. B. Singh e C. Huggel (a cura di), *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction: Towards Sustainable Development Goals*. Sustainable Development Goals Series. Cham, Svizzera, Springer, pagg. 17-41. doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_2.

Taillant, J. D. 2019. Argentine Supreme Court Upholds Glacier Law. Sito web del Center for Human Rights and Environment. https://center-hre.org/argentine-supreme-court-upholds-glacier-law/.

UNCDF (Fondo delle Nazioni Unite per lo sviluppo del capitale). 2021. *Blue Peace Financing Initiative: Solving Local Water and Sanitation Challenges Through Cooperation and Sustainable Financing*. UNCDF. www.uncdf.org/article/7569/blue-peace-financing-initiative-solving-local-water-and-sanitation-challenges-through-cooperation-and-sustainable-financing.

UNCED (Conferenza delle Nazioni Unite su ambiente e sviluppo). 1992. Managing fragile ecosystems: Sustainable mountain development. *Agenda 21*. UNCED, Rio de Janeiro, Brasile. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf.

UNEP (Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente). 2023. *Underfinanced. Underprepared. Inadequate Investment and Planning on Climate Adaptation Leaves World Exposed.* Adaptation Gap Report 2023. Nairobi, UNEP. doi.org/10.59117/20.500.11822/43796.

UNFCCC (Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici). 2015. *Paris Agreement*. Nazioni Unite. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.

Vergara, W., Deeb, A., Valencia, A., Bradley, R., Francou, B., Zarzar, A., Grünwaldt, A. e Haeussling, S. 2007. Economic impacts of rapid glacier retreat in the Andes. *EOS*, vol. 88, N. 25, pagg. 261-264. doi.org/10.1029/2007EO250001.

Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. e Shrestha, A. B. (a cura di). 2019. *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Svizzera, Springer. lib.icimod.org/record/34383.

Wymann von Dach, S., Bachmann, F., Borsdorf, A., Kohler, T., Jurek, M. e Sharma, E. 2016. *Investing in Sustainable Mountain Development: Opportunities, Resources and Benefits*. Sustainable Mountain Development Series. Berna, Centro per lo sviluppo e l'ambiente (CDE)/Università di Berna/Bern Open Publishing (BOP). http://www.carpathianconvention.org/tl_files/carpathiancon/Downloads/04%20Publications%20-%20Press%20-%20Gallery/Documents%20and%20Publications/CDE_2016_Investing%20in%20Sustainable%20Mountain%20Development.pdf.

Capitolo 10

Conclusioni

UNESCO WWAP
Richard Connor

Perché le montagne sono importanti per tutti

Le montagne, che coprono circa un quarto della superficie terrestre globale, forniscono tra il 55% e il 60% dei flussi annuali di acqua dolce. Essendo le "torri d'acqua" del mondo, sono una fonte vitale di acqua dolce per miliardi di persone, sia nelle aree montane che in quelle a valle. Inoltre, forniscono altre risorse naturali, beni e servizi essenziali e spesso unici, utilizzati in tutto il mondo. Nonostante la loro fondamentale importanza, le regioni montane ricevono generalmente un'attenzione molto minore rispetto ad altre zone del mondo, e nella maggior parte dei casi non vengono menzionate nelle agende politiche globali. In quanto punto di intersezione fra le crisi relative ad acqua, clima e biodiversità, il ruolo essenziale che tali regioni svolgono nel contesto dello sviluppo sostenibile non può essere ignorato.

Nelle regioni montane, le principali attività economiche sono agricoltura, pastorizia, silvicoltura, turismo, estrazione mineraria, commercio transfrontaliero e produzione di energia. Le montagne forniscono prodotti di alto valore come piante officinali, legname e altri prodotti forestali, oltre a capi di bestiame tipici delle aree di montagna e specialità agricole. Si tratta di zone di riferimento a livello globale per l'agrobiodiversità, e ospitano una percentuale consistente del *pool* genetico mondiale delle piante officinali e in generale delle colture agricole.

Le regioni montane ricevono generalmente un'attenzione molto minore rispetto ad altre zone del mondo, e nella maggior parte dei casi non vengono menzionate nelle agende politiche globali

A causa dei cambiamenti climatici, le regioni montane si stanno riscaldando rapidamente, il che influisce sul ciclo dell'acqua in modi insoliti e spesso imprevedibili. Sebbene l'accelerazione della fusione dei ghiacciai alpini abbia ricevuto una notevole e meritata attenzione, è il manto nevoso stagionale, piuttosto che i ghiacciai, ad essere la principale fonte di deflusso nella maggior parte delle aree di alta montagna. Tuttavia, l'importanza relativa e il contributo dell'acqua di fusione della neve, del ghiaccio e dei terreni ghiacciati in relazione alla disponibilità e alla qualità delle risorse idriche a valle sono spesso poco conosciuti e mal descritti (vedere capitolo 2).

Le conseguenze dei cambiamenti climatici, tra cui l'aumento delle temperature, la recessione dei ghiacciai, lo scioglimento del permafrost e il cambiamento dei regimi delle precipitazioni, possono accrescere la vulnerabilità a fenomeni naturali come frane, inondazioni e colate detritiche. Proprio a causa del ritiro dei ghiacciai, il numero dei laghi glaciali e l'area totale che occupano sono aumentati in modo significativo dagli anni '90. Nei prossimi decenni si verranno a creare altri corpi idrici di questo tipo, che costituiranno nuove zone a rischio di potenziali inondazioni da collasso di laghi glaciali.

Le pratiche insostenibili di uso del suolo, dalla deforestazione alla rapida espansione di città e paesi, e l'inquinamento prodotto da attività umane come l'estrazione mineraria, minacciano l'equilibrio idrologico delle fragili regioni montane, i loro ecosistemi, le forme di vita che ospitano e i mezzi di sussistenza che sostengono lungo tutto il percorso dell'acqua, dalla sorgente al mare.

Oltre un miliardo di persone (circa il 15% della popolazione mondiale) risiede nelle regioni montane, e la maggior parte di esse (90%) vive in paesi in via di sviluppo. Circa due terzi della popolazione mondiale di montagna vive in città. La complessità dei terreni, la maggiore esposizione ai pericoli naturali e i costi più elevati nelle regioni montane, interessate da una rapida urbanizzazione, complicano lo sviluppo e la manutenzione di reti di approvvigionamento idrico e di drenaggio, oltre che di impianti per il trattamento delle acque e la protezione delle sorgenti (vedere capitolo 4).

Circa la metà degli abitanti delle zone rurali di montagna, nei paesi in via di sviluppo, soffre di insicurezza alimentare, e sono le donne e i bambini ad essere più a rischio (capitolo 3). Tra i fattori che contribuiscono a determinare l'insicurezza alimentare vi sono l'isolamento e l'inaccessibilità (ad esempio, la distanza dalle strade e dai mercati alimentari), le più brevi stagioni di crescita delle colture, le notevoli variazioni nella disponibilità di acqua stagionale per l'agricoltura e i bassi livelli di meccanizzazione.

Le industrie che dipendono dalle risorse idriche si sono sviluppate nelle aree montane dove acqua e altre risorse sono presenti in quantitativi relativamente abbondanti (capitolo 5). Oltre che per la produzione di energia, come nel caso dell'idroelettrico, l'acqua è necessaria anche per l'estrazione e la lavorazione dei minerali, per la produzione di legname e per lo sviluppo del settore turistico. Le aree montane remote possono essere difficili da regolamentare, il che può determinare prelievi e scarichi incontrollati di acqua, compreso il rilascio di inquinanti industriali che possono influire sulla qualità dell'acqua a disposizione delle comunità montane e di quelle stanziate a valle.

Fra i servizi ecosistemici legati all'acqua forniti dalle montagne ci sono lo stoccaggio dell'acqua e la regolazione delle inondazioni, nonché la protezione da fenomeni di erosione e frana. Le montagne presentano poi un'ampia gamma di zone ecologiche differenti, e spesso custodiscono una biodiversità endemica maggiore rispetto alle zone di pianura, con una notevole varietà genetica di colture agricole e animali (capitolo 6). I cambiamenti idrologici, più degli impatti diretti delle variazioni di temperatura, saranno responsabili del mutamento della maggior parte degli ecosistemi montani.

Strategie di risposta: la via da seguire

L'acqua svolge un ruolo fondamentale nel contesto dell'**adattamento ai cambiamenti climatici** nelle aree di montagna. La maggior parte delle iniziative documentate nelle regioni montane riguarda aspetti legati all'acqua (ad esempio, la variabilità delle precipitazioni e gli eventi estremi, tra cui episodi di siccità, inondazioni e variazioni della disponibilità idrica), che vengono affrontati attraverso il ricorso a misure come lo sviluppo di **sistemi di allerta precoce**. L'acqua svolge un ruolo importante ai fini dell'adattamento anche in altri settori, come l'agricoltura, la riduzione del rischio di disastri, il turismo e le attività ricreative.

Poiché circa il 30% delle foreste del mondo si trova in regioni montane, il potenziale di stoccaggio e sequestro del carbonio è notevole. Tuttavia, ad eccezione della protezione delle foreste e del rimboschimento per favorire lo stoccaggio del carbonio, le misure di **mitigazione dei cambiamenti climatici**, come quelle relative alla cura del suolo e al cambiamento della sua destinazione, sono spesso limitate.

Misure di adattamento incentrate sulla **conservazione dell'acqua** nelle regioni montane, come il ripristino e la protezione di aree particolarmente vulnerabili (ad esempio delle zone umide), la gestione dei bacini idrografici e l'uso oculato dell'acqua, sono concrete e a basso rischio. Sono state sperimentate anche iniziative per "far formare il ghiaccio" in inverno attraverso l'innevamento artificiale e gli stupa di ghiaccio per aumentare i primi flussi di acqua di fusione in primavera, con un certo successo su piccola scala e a livello locale.

I trattati e le convenzioni sono strumenti importanti per promuovere le strategie di cooperazione e la loro attuazione nelle regioni montane

La **riduzione dei rischi legati all'acqua** nelle aree montane richiederà di affrontare le cause profonde di vulnerabilità come povertà, marginalizzazione e dinamiche di genere inique. Riconoscere e rispettare le numerose culture e le diverse **conoscenze indigene e locali** presenti nelle zone montane, che costituiscono la spina dorsale della capacità di adattamento delle comunità, può creare solide basi per elaborare strategie integrate di adattamento e mitigazione specifiche per ogni luogo. Tale capacità che può essere favorita dalla promozione di strutture e processi di governance inclusivi, compresa la progettazione e l'attuazione di politiche e misure specifiche.

Le crescenti pressioni sulle risorse idriche dovute allo sviluppo socioeconomico, unitamente ai cambiamenti della disponibilità idrica stagionale, che varia dalla stagione calda a quella fredda, complicano i processi di **governance dell'acqua**. Con la consapevolezza che i miglioramenti nella gestione dei bacini fluviali non richiedono solo la costruzione di nuove infrastrutture.

I **quadri normativi internazionali** offrono un promettente sostegno alla governance dell'acqua e all'adattamento ai cambiamenti climatici nelle aree montane, affrontando al contempo il tema dello sviluppo sostenibile. I dati suggeriscono che i trattati e le convenzioni sono strumenti importanti per promuovere le strategie di cooperazione e la loro attuazione nelle regioni montane.

L'importanza delle montagne come sorgenti e fonti d'acqua per le aree a valle, spesso densamente popolate, è stata riconosciuta dall'Assemblea generale delle Nazioni Unite nel 2008, con l'adozione della Risoluzione 62/196 sullo sviluppo sostenibile delle montagne. La governance dell'acqua in montagna spesso consiste nella protezione delle fonti e nella gestione dei bacini idrografici a beneficio degli utenti a valle. È quindi nell'interesse di tutti governare, gestire e finanziare le regioni montane in modo sostenibile.

Poiché la maggior parte dei grandi fiumi ha origine nelle aree montane, e spesso i bacini idrografici sono condivisi da più paesi, una **governance delle acque transfrontaliere** basata su una "visione a livello di bacino" che consideri attentamente le acque di montagna può sicuramente fornire grandi benefici agli Stati che le condividono. La **cooperazione regionale** tra i paesi, volta a promuovere una governance congiunta del territorio e dei bacini idrografici, è un meccanismo importante per promuovere lo sviluppo sostenibile nelle aree montane, soprattutto perché molte catene montuose e servizi ecosistemici montani sono di natura transfrontaliera. I trattati o gli accordi possono rafforzare la cooperazione attraverso la condivisione di dati e informazioni e contribuire a colmare le lacune in termini di competenze tecniche umane e istituzionali, oltre a promuovere e favorire il dialogo e la diplomazia.

I costi relativi a trasporti, infrastrutture, beni e servizi aumentano con l'altitudine e l'isolamento

Le raccomandazioni incluse nei quadri internazionali e negli accordi transfrontalieri forniscono indicazioni per l'elaborazione di politiche e strategie nazionali. Tuttavia, la gestione delle acque di montagna si svolge principalmente all'interno dei confini dei paesi, attraverso **leggi, politiche e strategie nazionali**. La formulazione e l'attuazione delle politiche avvengono nel contesto politico-economico di un paese. In alcuni casi, le politiche nazionali in materia di acqua, agricoltura, industria ed energia vengono sviluppate per favorire le regioni a valle dei bacini idrografici, ad esempio con l'obiettivo di rifornire le aree più popolose. Spesso, però, le stesse politiche nazionali non riflettono appieno le problematiche settoriali relative all'acqua nelle zone montane, ma tendono piuttosto a vedere le montagne come fonti per gli utenti a valle.

Sebbene in teoria siano disponibili ingenti finanziamenti per gli **investimenti** nello sviluppo sostenibile delle regioni montane, l'accesso ai principali programmi di sostegno è stato relativamente limitato; questo significa che delle importanti opzioni di risposta rimangono inutilizzate. Un maggiore ricorso alle **misure di sostegno** e ai **finanziamenti** disponibili potrebbe inoltre contribuire ad alleggerire il peso che grava sulle comunità e sui paesi di montagna, i quali hanno bisogno di rafforzare la capacità e l'abilità degli attori coinvolti di identificare e mobilitare le risorse finanziarie.

Generalmente, lo sviluppo nelle zone montane è più costoso e complesso che nelle aree pianeggianti, a causa dei terreni accidentati e della scarsa accessibilità, delle limitazioni alle economie di scala, della notevole distanza dai porti marittimi e dai centri economici e di uno scarso sviluppo del settore industriale e dei servizi. Ne consegue che i costi relativi a trasporti, infrastrutture, beni e servizi aumentano con l'altitudine e l'isolamento. Questo aspetto deve essere considerato nelle **politiche** e nelle **misure di finanziamento** per la promozione di strategie governative e programmi specifici per le zone di montagna nel quadro dei piani di sviluppo nazionali e globali.

La comprensione delle caratteristiche idrologiche delle aree di montagna e del ruolo della criosfera è importante per promuovere lo sviluppo sostenibile e facilitare i processi di pianificazione, oltre che per favorire interventi preventivi alla luce dei sostanziali

cambiamenti in corso. Tuttavia, molte regioni montane sono scarsamente monitorate, anche per quanto riguarda parametri fondamentali come la temperatura e le precipitazioni. Inoltre, la maggior parte delle stazioni di monitoraggio è situata in valli a bassa quota, il che impedisce di delineare un quadro accurato delle condizioni climatiche a quote più elevate.

Le lacune in termini di **dati, monitoraggio a lungo termine e ricerca** sulla criosfera montana e, più in generale, sulle acque di montagna, ostacolano l'attuazione di provvedimenti efficaci; inoltre, si tratta di un'area chiave per gli investimenti nella **creazione di conoscenze e competenze a lungo termine**. In un mondo caratterizzato da una crescente scarsità idrica, rafforzare le conoscenze sulle risorse idriche montane attuali e future è di fondamentale importanza. Ciò richiede ingenti investimenti in costose stazioni per il monitoraggio dei ghiacciai e del clima ad alta quota e a lungo termine, nonché una **scienza integrativa che attinga a tutte le discipline**, in modo da poter comprendere meglio le dinamiche relative alle acque e alle comunità di montagna. Sarebbe inoltre auspicabile che l'accesso a tutti i dati esistenti sull'acqua fosse libero.

Epilogo

Le montagne forniscono acqua dolce fondamentale per la vita di miliardi di persone e innumerevoli ecosistemi. Si tratta di vere e proprie torri d'acqua del mondo, il cui ruolo essenziale a favore dello sviluppo sostenibile non può assolutamente essere ignorato.

È necessario agire per promuovere una più profonda comprensione e protezione di questi ambienti così fragili, sempre più minacciati dai cambiamenti climatici e da attività umane insostenibili.

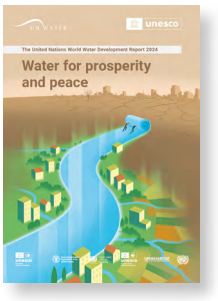
Perché nulla di ciò che accade sulle montagne rimane sulle montagne.

In un modo o in un altro, ***viviamo tutti ai piedi di qualche montagna.***

Acronimi

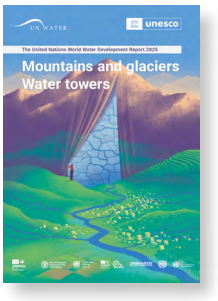
APS	Aiuto pubblico allo sviluppo
CBFEWS	Sistema di allerta precoce per le alluvioni basato sulle comunità
CREA	Research Centre for Alpine Ecosystems
DRR	Riduzione del rischio di disastri
GIAHS	Globally Important Agricultural Heritage Systems
GLOF	Inondazione da collasso di lago glaciale
INARCH	International Network for Alpine Research Catchment Hydrology
IPLC	Popolazioni indigene e comunità locali
IWRM	Gestione integrata delle risorse idriche
NDC	Contributo determinato a livello nazionale
PGS	Participatory Guarantee System
PSH	Centrale idroelettrica di pompaggio
ROS	Eventi di pioggia su neve
s.l.m.	sul livello del mare
SWE	Equivalente in acqua del manto nevoso
TPRCC-Network	Third Pole Regional Climate Centre Network
WASH	Acqua e servizi igienico-sanitari

RAPPORTO MONDIALE DELLE NAZIONI UNITE SULLO SVILUPPO DELLE RISORSE IDRICHE



ISBN 978-92-3-100657-9
© UNESCO 2024
176 pagine
Prezzo: 55,00 EUR

WWDR 2024 A colori, con riquadri, figure, mappe, tabelle, note, fotografie, riferimenti, elenco delle abbreviazioni e degli acronimi e prefazione della Direttrice generale dell'UNESCO, Audrey Azoulay, e del Presidente di UN-Water e dell'IFAD, Álvaro Lario.

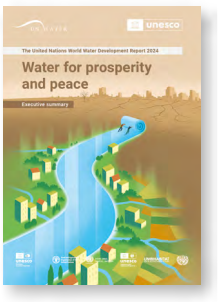


ISBN 978-92-3-100743-9
© UNESCO 2025
176 pages
Prezzo: 55,00 EUR

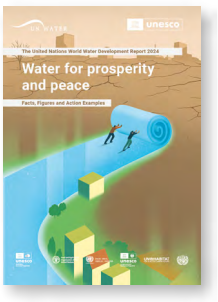
WWDR 2025 A colori, con riquadri, figure, mappe, tabelle, note, fotografie, riferimenti, elenco delle abbreviazioni e degli acronimi e prefazione della Direttrice generale dell'UNESCO, Audrey Azoulay, e del Presidente di UN-Water e dell'IFAD, Álvaro Lario.

Per scaricare il formato PDF del rapporto e le pubblicazioni associate, le edizioni precedenti del WWDR e il materiale multimediale, consultare il sito: www.unesco.org/en/wwap.

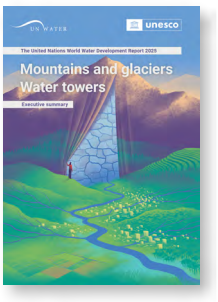
PUBBLICAZIONI ASSOCIATE



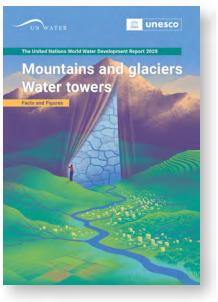
Sintesi del WWDR 2024
12 pagine
Disponibile in arabo, cinese, coreano, francese, hindi, inglese, italiano, portoghese, russo, spagnolo e tedesco.



Fatti, cifre ed esempi di azioni dal WWDR 2024
20 pagine
Disponibile in francese, inglese, italiano, portoghese e spagnolo.



Sintesi del WWDR 2025
12 pagine
Disponibile in arabo, cinese, coreano, francese, hindi, inglese, italiano, nepalese, portoghese, russo, spagnolo e tedesco.



Fatti e cifre dal WWDR 2025
12 pagine
Disponibile in francese, inglese, italiano, nepalese, portoghese e spagnolo.

Per scaricare i documenti, consultare il sito: www.unesco.org/en/wwap.

unesco
World Water Assessment Programme

RAPPORTI E ALTRE PUBBLICAZIONI DI UN-WATER

UN-Water coordina l'impegno delle Nazioni Unite e delle organizzazioni internazionali che lavorano su questioni relative all'acqua e ai servizi igienico-sanitari. In tal modo, UN-Water cerca di aumentare l'efficacia del sostegno fornito agli Stati membri nei loro sforzi per stipulare accordi internazionali in materia di acqua e servizi igienico-sanitari. Le pubblicazioni di UN-Water attingono all'esperienza e alla competenza dei membri e dei partner.

Il *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche* è uno dei rapporti di riferimento di UN-Water sui temi relativi alle risorse idriche e ai servizi igienico-sanitari, ed è dedicato ogni anno ad un tema diverso. Il rapporto è pubblicato dall'UNESCO, per conto di UN-Water, e la sua stesura è coordinata dal Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO. Il rapporto offre informazioni utili sulle principali tendenze riguardanti lo stato, l'uso e la gestione dell'acqua dolce e dei servizi igienico-sanitari, sulla base del lavoro svolto dai membri e dai partner di UN-Water. Pubblicato in occasione della Giornata mondiale dell'acqua, il rapporto fornisce conoscenze e strumenti a chi è responsabile delle decisioni politiche con l'obiettivo di formulare e attuare normative sostenibili in materia di risorse idriche. Offre inoltre esempi di buone pratiche e analisi approfondite per stimolare idee e azioni che migliorino la gestione del settore idrico e di altri settori correlati.

Strategia delle Nazioni Unite per l'acqua e i servizi igienico-sanitari
A seguito della Conferenza delle Nazioni Unite sull'acqua, tenutasi nel 2023, la risoluzione A/RES/77/334 dell'Assemblea generale ha chiesto al Segretario generale di «presentare una strategia delle Nazioni Unite per l'acqua e i servizi igienico-sanitari a livello di sistema, in consultazione con gli Stati membri, prima della fine della settantottesima sessione dell'Assemblea generale». L'obiettivo della strategia è quello di migliorare il coordinamento e l'attuazione delle priorità legate all'acqua a livello di sistema delle Nazioni Unite, in modo da fornire un sostegno più strategico, efficace, coerente ed efficiente agli Stati membri nell'ambito dei loro sforzi per accelerare i progressi dei piani e delle priorità nazionali, degli obiettivi e dei traguardi concordati a livello internazionale, in materia di acqua, e delle soluzioni trasformative alle sfide attuali e future ad essa legate. La strategia è stata lanciata nel luglio 2024, a New York, in occasione del Forum politico di alto livello sullo sviluppo sostenibile.

UN-Water Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-Water (GLAAS)
Il GLAAS è redatto dall'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) per conto di UN-Water. Fornisce un aggiornamento globale sul quadro delle politiche, degli accordi istituzionali, delle risorse umane e dei flussi finanziari internazionali e nazionali a supporto dell'acqua e dei servizi igienico-sanitari. Si tratta di un contributo sostanziale alle attività Sanitation and Water for All, nonché alla rendicontazione dei progressi relativi all'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6.

Rapporti del Joint Monitoring Programme (JMP) for Water Supply, Sanitation and Hygiene dell'OMS e dell'UNICEF
Il Joint Monitoring Programme è associato a UN-Water ed è responsabile del monitoraggio globale dei progressi compiuti verso il conseguimento dei traguardi dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6 per l'accesso universale ad acqua potabile sicura ed economica e a servizi igienico-sanitari adeguati ed equi. Ogni due anni il programma pubblica stime e rapporti aggiornati sui progressi relativi ai servizi WASH in ambito domestico, scolastico e sanitario.

Casi di studio sull'accelerazione a livello nazionale
Per conseguire più velocemente i traguardi dell'Obiettivo di sviluppo sostenibile 6, nell'ambito del Quadro di accelerazione globale dell'Obiettivo 6, UN-Water pubblica i casi di studio a livello nazionale, in cui vengono esaminati i percorsi intrapresi dai singoli paesi per accelerare il conseguimento dei progressi relativi all'Obiettivo 6 a livello nazionale. I casi di studio documentano buone pratiche replicabili per il conseguimento dei traguardi dell'Obiettivo 6 e analizzano il modo in cui i relativi progressi possono essere moltiplicati in un paese. Dal 2022 sono stati pubblicati nove studi sui seguenti paesi: Brasile, Cambogia, Costa Rica, Repubblica Ceca, Ghana, Giordania, Pakistan, Senegal e Singapore. Nel luglio 2025 è prevista la pubblicazione di tre nuovi studi su Bhutan, Ruanda e Arabia Saudita.

Policy and analytical briefs
I policy brief di UN-Water forniscono una guida breve e informativa sulle politiche relative alle questioni più urgenti in materia di acqua dolce, attingendo all'esperienza combinata del sistema delle Nazioni Unite. Gli analytical brief offrono un'analisi delle questioni emergenti e possono servire da base per ulteriori ricerche e discussioni, nonché per orientare le politiche future.

PUBBLICAZIONI PREVISTE DA UN-WATER

- UN-Water Policy Brief sulle acque transfrontaliere – aggiornamento
- UN-Water Analytical Brief sull'innovazione in materia di acqua
- UN-Water Policy Brief sui cambiamenti climatici, l'ambiente e i diritti umani

LA GIORNATA MONDIALE DELL'ACQUA E IL RAPPORTO MONDIALE DELLE NAZIONI UNITE SULLO SVILUPPO DELLE RISORSE IDRICHE

Le Nazioni Unite designano giornate, settimane, anni e decenni specifici come occasioni per celebrare eventi e valorizzare temi particolari al fine di promuovere, attraverso la consapevolezza e l'azione, gli obiettivi dell'Organizzazione.

Le ricorrenze internazionali sono occasioni per educare il grande pubblico su questioni di interesse, per mobilitare la volontà politica e le risorse al fine di affrontare problemi globali, e per celebrare e rafforzare le conquiste dell'umanità.

La maggior parte delle ricorrenze sono state stabilite da risoluzioni dell'Assemblea generale delle Nazioni Unite. La Giornata mondiale dell'acqua (22 marzo) risale alla Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente e lo sviluppo del 1992, durante la quale fu raccomandato un maggior rispetto nei confronti delle risorse idriche mondiali.

L'Assemblea generale delle Nazioni Unite ha istituito, così, la prima Giornata mondiale dell'acqua il 22 marzo 1993. Da allora si tiene ogni anno, ed è una delle giornate internazionali più popolari insieme alla Giornata internazionale dei diritti della donna (8 marzo), alla Giornata internazionale della pace (21 settembre) e alla Giornata internazionale dei diritti umani (10 dicembre).

Ogni anno, UN-Water, il meccanismo di coordinamento delle Nazioni Unite per l'acqua e i servizi igienico-sanitari, individua un tema per la Giornata mondiale dell'acqua, relativo a una sfida attuale o futura legata a questo bene così prezioso. Questo tema ispira anche quello del Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche, che viene presentato in occasione della Giornata mondiale dell'acqua. Tale pubblicazione è il rapporto principale di UN-Water e fornisce a chi è responsabile delle decisioni politiche gli strumenti per formulare e attuare normative sostenibili in materia di risorse idriche. Il rapporto offre informazioni utili sulle principali tendenze riguardanti lo stato, l'uso e la gestione dell'acqua dolce e dei servizi igienico-sanitari, sulla base del lavoro svolto dai membri e dai partner di UN-Water.

Il rapporto è pubblicato dall'UNESCO, per conto di UN-Water, e la sua produzione è coordinata dal Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell'UNESCO.

Volume tradotto e pubblicato grazie al contributo di:

Le montagne, spesso definite come le “torri d’acqua” del mondo, stanno diventando sempre più vulnerabili ai cambiamenti climatici e alle attività umane non sostenibili, minacciando le risorse idriche da cui dipendono miliardi di persone e innumerevoli ecosistemi.

L’edizione 2025 del ***Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche*** richiama l’attenzione sui servizi e sui benefici essenziali che le acque di montagna e i ghiacciai alpini forniscono alle società, alle economie e all’ambiente. Concentrandosi sulle risposte tecniche e politiche, necessarie per migliorare la gestione dell’acqua in montagna, il rapporto affronta questioni fondamentali come l’approvvigionamento idrico e i servizi igienico-sanitari, le misure di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici, la sicurezza alimentare ed energetica, l’industria, la riduzione del rischio di disastri naturali e la protezione degli ecosistemi.

In linea con la designazione del 2025 quale Anno internazionale per la conservazione dei ghiacciai, e alla luce della risoluzione dell’Assemblea generale delle Nazioni Unite del 2022 sullo sviluppo sostenibile delle montagne, il rapporto richiama l’attenzione mondiale sull’importanza delle acque di montagna, e dei ghiacciai alpini, per lo sviluppo sostenibile di queste regioni e delle comunità a valle che da esse dipendono, nel contesto di una criosfera montana in rapido cambiamento.

Il ***Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche*** è il principale rapporto di UN-Water sulle questioni relative alle risorse idriche e ai servizi igienico-sanitari, ed è dedicato ad un tema diverso ogni anno. Il rapporto è pubblicato dall’UNESCO, per conto di UN-Water, e la sua stesura è coordinata dal Programma mondiale di valutazione delle risorse idriche dell’UNESCO. Il rapporto offre informazioni utili sulle principali tendenze riguardanti lo stato, l’uso e la gestione dell’acqua dolce e dei servizi igienico-sanitari, sulla base del lavoro svolto dai membri e dai partner di UN-Water. Pubblicato in occasione della Giornata mondiale dell’acqua, il rapporto fornisce conoscenze e strumenti a chi è responsabile delle decisioni politiche con l’obiettivo di formulare e attuare normative sostenibili in materia di risorse idriche. Offre, inoltre, esempi di buone pratiche e analisi approfondite per stimolare idee e azioni che migliorino la gestione del settore idrico e di altri settori correlati.

Questa pubblicazione è finanziata
dal Governo italiano e dalla Regione Umbria.

Regione Umbria

9 789230 002442