PROCESE ȘI FENOMENE NATURALE DE RISC

NOTE DE CURS

RODION DOMENCO
UNIVERSITATEA DE STAT
FACULTATEA DE BIOLOGIE ȘI GEOȘTIINȚE

CZU: 550.3:551.5(075.8)

Recomandat de Consiliul Facultății de Biologie și Geoștiințe (proces-verbal nr. 3 din 19 decembrie 2025) și de Consiliul Calității al Universității de Stat din Moldova (proces-verbal nr. 3 din 29 decembrie 2025)

Recenzenți:

Ilie BOIAN, docotr în științe agricole, conferențiar universitar

Anatolie PUȚUNTICĂ doctor în geografie, conferențiar universitar

Descrierea CIP a Camerei Naționale a Cărții din Republica Moldova
Domenco, Rodion
Procese și fenomene naturale de risc : note de curs / Rodion Domenco; Universitatea de Stat din Moldova. - Chișinău: Editura USM, 2025. – 189 p.: fig., tab. color.

Bibliogr.: p. 187-188 – 20 ex.

ISBN 978-9975-62-991-1.
550.3:551.5(075.8)
D 65

© Domenco Rodion

© Universitatea de Stat din Moldova, 2025

CUPRINS

PRELIMINARII. iii
PREFAȚĂ vi
INTRODUCERE ÎN STUDIUL RISCURILOR NATURALE. 3
TECTONICA PLĂCILOR ŞI RISCURILE GEOFIZICE 16
Structura internă a Pământului. 17
Tectonica plăcilor. Definiţii şi mecanism de formare 20
Impact asupra mediului şi societăţii.. 25
Prevenirea şi reducerea riscurilor geofizice. 28
VULCANISMUL ŞI ERUPŢIILE VULCANICE. 31
Definiţii şi mecanism de formare. 32
Distribuţie spaţială şi tipuri de vulcani 36
Impact asupra mediului şi societăţii. 46
Prevenirea şi reducerea riscurilor vulcanice 63
CUTREMURELE DE PĂMÂNT: CAUZE ŞI EFECTE 68
Definiţie şi mecanism de formare. 69
Tipuri genetice de seisme 77
Efectele cutremurelor asupra mediului natural 82
Prevenirea şi reducerea riscurilor seismice 90
TSUNAMI: FORMARE, EVOLUȚIE ŞI CONSECINȚE. 94
Definiţie şi mecanism de formare. 95
Tipuri de tsunami. 97
Regiuni geografice expuse riscului de tsunami. 101
Efectele tsunami-urilor şi legăturile cu alte riscuri naturale 103
Prevenirea şi reducerea riscurilor tsunami 111
PROCESELE GRAVITAȚIONALE ŞI RISCURILE ASOCIATE 114
Definiţii şi tipuri de procese gravitaţionale 115
Regiuni expuse riscului asociat proceselor gravitaţionale 130
Efecte asupra mediului şi societăţii 133
Prevenirea şi reducerea riscurilor de alunecare 139
RISCURI METEO-CLIMATICE 144
Tipologia riscurilor meteo-climatice. 146

Riscuri termice 150
Riscuri atmosferice dinamice 153
Seceta – fenomen complex 168
Schimbări climatice și amplificarea riscurilor 173
MANAGEMENTUL RISCULUI DE DEZASTRE. 180
Concepte și principii generale 181
Reducerea riscului de dezastre în Republica Moldova. 183
Perspective contemporane asupra gestionării riscurilor. 184
BIBLIOGRAFIE. 187

PRELIMINARII

Procesele şi fenomenele naturale cu frecvenţă redusă, dar cu impact ridicat, nu pot fi prevenite, iar astfel de evenimente produc numeroase pagube, inclusiv pierderi de vieţi omeneşti. Ştim, din datele istorice că lumea a înregistrat o reducere semnificativă a deceselor cauzate de dezastre prin prognoze îmbunătăţite, infrastructură mai rezistentă, pregătire pentru situaţii de urgenţă şi sisteme de răspuns. Persoanele cu venituri mici sunt adesea cele mai vulnerabile la dezastre: îmbunătăţirea nivelului de trai, a infrastructurii şi a sistemelor de răspuns în aceste regiuni este esenţială pentru prevenirea deceselor cauzate de dezastre naturale în deceniile următoare.

Procesele şi fenomenele naturale de risc sunt parte a Geografiei, chiar dacă hazardurile care stau la baza lor există sub diferite forme, iar cercetarea acestora nu poate fi decât interdisciplinară. Studenţii care urmează un curs de hazarduri naturale îşi îmbunătăţesc foarte mult cunoştinţele despre procesele dinamice ale Pământului. Ei ar trebui să poată face alegeri, în cunoştinţă de cauză, cu privire la locul în care să trăiască şi să lucreze, cum să recunoască mai bine riscurile naturale şi să se ocupe de cei din jurul lor. Scopul studierii şi utilizării rezultatelor, presupun un obiectiv comun: evaluarea riscurilor şi managementul acestora, în vederea diminuării pierderilor materiale sau umane. Această disciplină are menirea de a forma competenţe necesare unui specialist geograf, ecolog sau silvicultor, având ca obiectiv cunoaşterea riscurilor naturale ce reprezintă o necesitate a societăţii moderne, constituind o condiţie necesară în realizarea studiilor de impact, a planurilor de amenajare teritorială şi, în general, o condiţie a gestionării eficiente a resurselor naturale sau a elaborării unor proiecte de dezvoltare durabilă. Materia studiată la această disciplină serveşte drept suport pentru studierea altor discipline geografice.

Disciplina este predată în limba română. Beneficiari ai disciplinei sunt studenţii de la programul de formare profesională (specialitatea) „Geografie”, ciclul I – licenţă, anul II / III de studii.

Sugestii metodologice de predare-învăţare-evaluare. Promovarea dimensiunii europene în învăţământul universitar, antrenează o varietate de modalităţi de predare/ învăţare/ evaluare. În cadrul acestei discipline de studii se folosesc *metode/ tehnici de predare-învăţare* precum:

a) prelegerea, conversaţia euristică, explicaţia, demonstrarea ş.a. - *la orele de curs*.

b) investigaţia ştiinţifică, explicaţia, elaborarea şi aplicarea materialelor grafice şi cartografice etc. - *la seminare*.

c) investigaţia ştiinţifică, elaborarea proiectelor individuale şi de grup (pe parcursul semestrului), scrierea referatelor ş.a. - *în cadrul activităţii individuale a studentului*.

COMPETENȚE GENERALE	REZULTATELE ÎNVĂȚĂRII
CG1. Interpretarea datelor colectate pe teren, prin utilizarea metodelor, tehnicilor şi echipamentelor de specialitate	**RÎ1.** *Absolventul/candidatul la atribuirea calificării poate* identifica obiecte, procese şi fenomene geografice; **RÎ3.** *Absolventul/candidatul la atribuirea calificării poate* aplica metode şi tehnici pentru investigarea obiectelor, proceselor şi fenomenelor geografice
CG3. Raportarea elementelor, proceselor şi fenomenelor din mediul geografic la reprezentarea lor grafică, topografică şi cartografică, precum şi la modelări şi simulări.	**RÎ7.** *Absolventul/candidatul la atribuirea calificării poate* identifica/compara/localiza geospaţial elementele, procesele şi fenomenele geografice
COMPETENȚE PROFESIONALE	
CP2. Relaţionarea obiectelor, proceselor şi fenomenelor geografice cu reprezentarea lor grafică şi cartografică	**RÎ12.** *Absolventul/candidatul la atribuirea calificării poate* relaţiona obiectele, procesele şi fenomenele geografice; **RÎ13.** *Absolventul/candidatul la atribuirea calificării poate* stabili legităţile geospaţiale de relaţionare a obiectelor, proceselor şi fenomenelor geografice, cu reprezentarea lor grafică şi cartografică
CP3. Elaborarea produselor tematice prin utilizarea metodologiei specifice studiului geografic	**RÎ14.** *Absolventul/candidatul la atribuirea calificării poate* aplica metodele de investigare a mediului geografic în elaborarea produselor tematice (raport, proiect tematic, plan de amenajare, studiu de caz ş.a.)
CP9. Propunerea soluţiilor la situaţiile-problemă din mediul geografic din perspectiva dezvoltării sustenabile	**RÎ22.** *Absolventul/candidatul la atribuirea calificării poate* identifica soluţii la situaţiile-problemă din mediul geografic din perspectiva dezvoltării sustenabile
CP10. Promovarea mentalităţii şi atitudinii prietenoase mediului ambiant	**RÎ22.** *Absolventul/candidatul la atribuirea calificării poate* aprecia mentalităţi şi atitudini prietenoase mediului ambiant

În cadrul disciplinei, **activitatea individuală a studentului** se concretizează prin elaborarea unui proiect de investigaţie sau a unui studiu de caz, realizat pe parcursul semestrului. Studentul îşi selectează tema din lista propusă anual de către profesorul titular, iar sub îndrumarea acestuia delimitează aria de studiu şi elaborează planul general al cercetării. Procesul de lucru include întocmirea bibliografiei, analiza şi sinteza surselor, formularea structurii proiectului şi redactarea propriu-zisă a lucrării.

Realizarea proiectului are loc în trei etape: primele două sunt coordonate de profesor și vizează fundamentarea teoretică, alegerea bibliografiei, selectarea metodelor și stabilirea tehnicilor de interpretare; etapa finală este individuală și oferă studentului oportunitatea de a aplica creativ cunoștințele dobândite.

Pentru a asigura calitatea produsului final, proiectul trebuie să respecte următoarele cerințe: maximum 15 pagini A4 (fără pagina de titlu și cuprins), redactare cu font Cambria 12 p., spațiere 1.15, margini standard (sus/jos/dreapta – 2 cm; stânga – 2.5 cm) și aliniere justify. Figurile și tabelele trebuie numerotate și denumite conform normelor academice (Cambria 10 p.), iar structura lucrării trebuie să includă toate componentele specifice unui proiect de cercetare. De asemenea, este obligatorie utilizarea adecvată a limbajului de specialitate și integrarea unor materiale grafice și/sau cartografice realizate de autor. Proiectul trebuie să includă minimum cinci surse bibliografice, dintre care cel puțin două publicate în ultimii cinci ani.

Lucrarea este prezentată public în cadrul orelor și este evaluată cu o notă de la 1 la 10. Nota obținută contribuie în proporție de 10% la media semestrială.

Procesul de evaluare a rezultatelor academice cuprinde 3 componente obligatorii: *evaluarea inițială* – diagnostică; *evaluarea curentă* – formativă (se realizează prin seminare, autoevaluare și evaluarea lucrului individual; include și 2 testări obligatorii pe parcursul semestrului, conform calendarului academic, aprobat de Senatul USM) și *evaluarea finală* – sumativă.

Metodologia evaluării finale – sumative este orientată spre evaluarea rezultatelor învățării exprimate în termeni de competențe. Evaluarea inițială, curentă și finală va fi combinată (scrisă și orală) și cuprinde o probă la care se aplică teste docimologice, cu diverse tipuri de itemi și o probă orală. Nota finală acordată este constituită din nota semestrială, cu o pondere de 60% din total și nota de la examen, cu o pondere de 40% din total.

PREFAȚĂ

În ultimele decenii, cutremure, inundaţii şi uragane au ucis milioane de oameni în întreaga lume. Numărul deceselor cauzate de dezastrele naturale poate varia foarte mult de la an la an. Trec foarte puţini ani cu foarte puţine decese înainte ca un eveniment dezastruos de mare amploare să revendice multe vieţi. Dacă ne uităm la media din ultimul deceniu, aproximativ 45.000 de oameni la nivel global au murit din cauza dezastrelor naturale în fiecare an. Aceasta reprezintă aproximativ 0.1% din decesele globale.

Evenimentele cu frecvenţă redusă, dar cu impact ridicat, cum ar fi cutremurele şi tsunami-urile, nu pot fi prevenite, iar astfel de fenomene produc numeroase pierderi de vieţi omeneşti. Ştim din datele istorice că lumea a înregistrat o reducere semnificativă a deceselor cauzate de dezastre prin prognoze îmbunătăţite, infrastructură mai rezistentă, pregătire pentru situaţii de urgenţă şi sisteme de răspuns. Persoanele cu venituri mici sunt adesea cele mai vulnerabile la dezastre: îmbunătăţirea nivelului de trai, a infrastructurii şi a sistemelor de răspuns în aceste regiuni este esenţială pentru prevenirea deceselor cauzate de dezastre naturale în deceniile următoare.

Patru catastrofe - un ciclon însoţit de inundaţii în Bangladesh, în 1970, cutremure în China - în 1976 şi Haiti - în 2010 şi un tsunami în Oceanul Indian, în 2004 – au generat pierderea a mai mult de 230 000 de vieţi fiecare. Un ciclon care a lovit Bangladeshul în 1991 a ucis 145 000 de oameni. Patru ani mai târziu, în 1995, un cutremur în Kobe, Japonia, a provocat mai mult de 5000 de decese, a distrus clădiri şi a cauzat mai mult de 100 miliarde dolari în daune materiale. Un cutremur din nordul Pakistanului din 2005 a ucis 86000 de persoane. În acelaşi an, uraganul Katrina a devastat New Orleans şi a ucis peste 1800 de oameni. A fost cel mai mare dezastru natural în istoria Statelor Unite şi uraganul cu cel mai mare număr de jertfe omeneşti de la cel din Florida, în 1928. În 2011, tsunami-ul generat de un cutremur puternic în largul coastei din Japonia a făcut cel puţin 16000 de victime. Banca Mondială estimează că pierderile economice ale acestui cutremur şi tsunami au fost de 235 miliarde dolari SUA, ceea ce îl aduce la rangul de cel mai mare dezastru natural în istoria lumii. Mai recent, în octombrie 2012, uraganul Sandy a devastat coasta atlanticului de nord-est din Statele Unite, cu pagube estimate la 75 miliarde de dolari SUA. Cutremurul care a lovit Turcia pe 6 februarie 2023 – „cea mai mare catastrofă naturală într-un secol în Europa", potrivit Organizaţiei Mondiale a Sănătăţii a lăsat o ţară traumatizată. Cutremurul cu magnitudinea 7.8 - urmat de un altul câteva ore

mai târziu de 7.6 - a ucis aproape 46.000 de persoane şi a rănit altele 105000 în Turcia, potrivit unor bilanţuri fără îndoială incomplete. În plus, aproape 6.000 de persoane şi-au pierdut viaţa în Siria. Cutremurul devastator şi replicile sale au provocat pagube în valoare de peste 34 de miliarde de dolari, 4% din PIB-ul Turciei, a estimat Banca Mondială pe 27 februarie. Alte dezastre notabile din ultimii 20 de ani includ: inundaţii catastrofale în Venezuela, Bangladesh, şi Europa Centrală; cel mai puternic El Niño înregistrat; cutremure mortale în Chile, India, Iran, Italia, Noua Zeelandă, Turcia ş.a. În această perioadă, Pământul, de asemenea, a experimentat mulţi dintre cei mai calzi ani.

Aceste evenimente sunt rezultatul unor forţe enorme care acţionează atât din interiorul, cât şi din exteriorul planetei noastre (Keller, et al., 2015, p. 31). În această lucrare, explicăm aceste forţe şi impactul lor asupra oamenilor şi a mediului ambiant. De asemenea, discutăm despre modul în care ne putem pregăti mai bine pentru dezastre naturale, minimizând astfel impactul acestora atunci când acestea apa.

Studenţii care urmează un curs de hazarduri naturale îşi îmbunătăţesc foarte mult cunoştinţele despre procesele dinamice ale Pământului care le vor afecta pe tot parcursul vieţii. Ei ar trebui să poată face alegeri, în cunoştinţă de cauză, cu privire la locul în care să trăiască şi să lucreze, cum să recunoască mai bine riscurile naturale şi să se ocupe de cei din jurul lor. Poate că unii dintre cei care urmează acest curs vor deveni oficiali guvernamentali sau factori de decizie politică care pot schimba o parte din cultura actuală care contribuie la pierderi majore cauzate de dezastre naturale. Această lucrare încurajează studenţii să înţeleagă fundamentele, apreciind în acelaşi timp că majoritatea problemelor au complexităţi care depăşesc stadiul actual al cunoştinţelor ştiinţifice şi implică aspecte societale dincolo de domeniul ştiinţei. Hazardurile naturale şi dezastrele pot fi fascinante şi chiar interesante pentru cei care le studiază, doar să nu fie în rol de elemente supuse riscului (Hyndman & Hyndman, 2017, p. XII)

Cu părere de rău, continuăm să ne punem pe noi înşine în pericol, prin ignoranţă sau printr-o credinţă naivă că un pericol iminent îi poate afecta pe alţii, dar nu şi pe noi. Alegem să trăim în locaţii care sunt în mod inerent nesigure. Putem alege să trăim cu natura sau putem încerca să luptăm împotriva ei. Din păcate, oamenii care aleg să trăiască în locaţii periculoase tind să dea vina fie pe "natura dezlănţuită", fie pe alţii pentru că le-au permis să trăiască acolo.

Oamenii nu fac adesea astfel de alegeri proaste în mod voit, ci mai degrabă prin lipsa lor de conştientizare şi înţelegere a proceselor naturale. Chiar şi atunci când sunt conştienţi de un eveniment extraordinar care a afectat pe altcineva, ei cred cumva că „nu mi se va întâmpla mie". Oamenii decid adesea asupra reşedinţei sau locaţiei lor de afaceri pe baza dorinţei de a trăi şi de a lucra în medii pitoreşti, fără a înţelege pericolele din jurul lor. Odată ce îşi dau seama de riscuri, adesea sporesc pericolele încercând să modifice mediul. Cei care citesc această carte ar trebui să poată evita astfel de erori. Sperăm că, după ce studenţii vor termina de citit această lucrare, vor avea cunoştinţele de bază pentru a evalua critic riscurile pe care şi le asumă şi deciziile pe care le iau în calitate de cetăţeni ai unei ţări, de proprietari de case sau, pur şi simplu, de locuitori ai Pământului.



Efectele uraganului Michael. Mexico Beach, Florida, anul 2018

Sursa: https://media.cnn.com

INTRODUCERE ÎN STUDIUL RISCURILOR NATURALE

Rezultatele învățării:

La finalul acestei unități de învățare, studenții vor fi capabili să

- diferențieze noțiunile de hazard, risc și dezastru, evidențiind particularitățile fiecăreia;
- clasifice dezastrele naturale și catastrofele, recunoscând evenimentele de mare energie cauzate de procese naturale;
- utilizeze metoda științifică pentru analiza hazardurilor naturale, aplicând-o în studii de caz relevante;
- coreleze magnitudinea unui eveniment periculos cu frecvența acestuia, interpretând date statistice și grafice;
- explice modul în care hazardurile naturale sunt interconectate și relaționate cu mediul fizic, oferind exemple concrete;
- argumenteze modul în care creșterea populației și practicile inadecvate de utilizare a terenurilor pot exacerba efectele pericolelor naturale, transformând dezastrele în catastrofe;
- analizeze modul în care evenimentele considerate pericole pot genera și beneficii pentru mediul înconjurător, identificând exemple specifice.

Termeni cheie: risc, hazard, catastrofă, vulnerabilitate

De ce ar alege oamenii să-și pună în pericol viața și proprietatea? Un număr mare de oameni din întreaga lume trăiesc și lucrează în locuri periculoase - lângă vulcani, în câmpiile inundabile sau pe liniile de falie active. Unii sunt ignoranți, alții reconstruiesc case distruse anterior de dezastre. Uneori motivele sunt culturale sau economice. Pentru că cenușa vulcanică devine un sol bogat productiv, zonele din jurul vulcanilor sunt terenuri agricole bune. Câmpiile inundabile atrag oamenii pentru că oferă un sol agricol bun, teren ieftin și coridoare naturale de transport. Unii oameni trăiesc într-o zonă periculoasă din cauza locului de muncă. Marele dezastru de acum un secol este de mult uitat, astfel încât oamenii se mută în calea unei calamități care s-ar putea să nu se producă astăzi sau mâine, dar este doar o chestiune de timp

Ştiinţa este un „corp de cunoştinţe” care s-au acumulat din investigaţii şi experimente, ale căror rezultate sunt supuse verificării. Metoda ştiinţifică are o serie de paşi. Primul pas este formularea unei întrebări. În ceea ce priveşte un eveniment periculos, cercetătorii se pot întreba, de exemplu: de ce a avut loc o alunecare de teren care a distrus trei case? Pentru a răspunde la această întrebare, trebuie examinată panta pe care s-a produs alunecarea. Cercetătorii pot observa că la baza pantei şi a alunecării de teren iese o mare cantitate de apă. Dacă geologii ştiu, de asemenea, că prin pantă trece sistemul de alimentare cu apă, ei pot îmbunătăţi întrebarea pe care să o pună: apa din pantă a provocat alunecarea de teren? Această întrebare stă la baza unei ipoteze care poate fi precizată după cum urmează: alunecarea de teren a avut loc deoarece o magistrală de apă îngropată în pantă s-a rupt, determinând o cantitate mare de apă să intre în pantă, reducând rezistenţa materialelor pantei şi provocând alunecarea de teren. Adesea, o serie de întrebări sau ipoteze sunt testate. Ipoteza este, prin urmare, un posibil răspuns la întrebarea noastră şi este o idee care poate fi testată. În exemplul nostru, putem testa ipoteza că o reţea de apă s-a spart şi a provocat o alunecare de teren, prin excavarea pantei pentru a determina sursa apei. În ştiinţă, testăm ipoteze în încercarea de a le infirma. Adică, dacă am constata că nu conducta de apă este cauza care a provocat alunecarea de teren, am respinge ipoteza şi am dezvolta şi testa o altă ipoteză. Utilizarea metodei ştiinţifice a îmbunătăţit înţelegerea multor procese naturale ale pământului, inclusiv erupţii vulcanice, cutremure, uragane, inundaţii, şi eroziune costieră. În studiul nostru prezentăm unde apar majoritatea acestor procese, gama lor de magnitudine şi cât de des apar.

Toate aceste procese sunt determinate de energie, iar această energie este derivată din trei surse.

Prima sursă de energie este căldura internă a Pământului, care produce convecţie lentă în mantaua solidă, dar plastică. Procesele periculoase asociate cu această sursă de energie sunt cutremurele şi erupţiile vulcanice. După cum vom vedea, cutremurele şi erupţiile vulcanice sunt explicate prin teoria plăcilor tectonice, una dintre teoriile unificatoare de bază ale ştiinţei. Cei mai mulţi vulcani activi şi cele mai multe cutremure se înregistrează la graniţele plăcilor tectonice, care sunt blocuri mari ale scoarţei terestre.

A doua sursă de energie este soarele. Energia de la soare încălzeşte atmosfera şi suprafaţa Pământului, producând vânturi şi provocând evaporarea apei. Circulaţia atmosferei şi a oceanelor şi evaporarea apei determină clima Pământului şi controlează ciclul hidrologic. Aceste forţe sunt, la rândul lor,

direct legate de procese periculoase cum ar fi furtunile violente, inundaţiile şi eroziunea costieră. Energia solară este, de asemenea, responsabilă în cele din urmă, pentru incendii şi fulgere.

A treia sursă de energie este atracţia gravitaţională a Pământului. Gravitaţia este forţa care atrage un corp către altul – în acest caz, atracţia materialelor de la suprafaţă, spre centrul Pământului. Din cauza atracţiei gravitaţionale, rocile, solurile şi zăpada de pe versanţii munţilor şi apa care cade din precipitaţii se deplasează în jos pe pantă. Câmpul gravitaţional al Pământului atrage, de asemenea, obiecte din spaţiu care pot intra în atmosferă şi pot exploda sau lovi suprafaţa planetei.

Evenimente precum cutremurele, tsunami-urile, erupţiile vulcanice, inundaţiile şi incendiile sunt procese naturale care au loc pe suprafaţa Pământului de miliarde de ani. Ele devin periculoase numai atunci când ameninţă fiinţele umane. Folosim termenii *hazard*, *risc şi dezastru* (sau *catastrofă)* pentru a descrie interacţiunea noastră cu aceste procese naturale.

Desigur, nu toate pericolele sunt naturale. Multe pericole sunt cauzate de oameni; exemplele includ războaie şi dezastre tehnologice, cum ar fi penele de curent regionale. Accidentul nuclear de la Cernobîl din 1986, care a dus la eliberarea unor cantităţi mari de particule radioactive în atmosferă care s-au răspândit în mare parte din vestul Rusiei şi Europa, este un exemplu de dezastru tehnologic.

În ultimul secol, limita dintre pericolele naturale şi cele induse de om a devenit neclară, iar dezastrele tehnologice sunt în creştere pe măsură ce populaţia lumii creşte, iar economiile statelor devin din ce în ce mai conectate şi interdependente. Pericolele sociale şi tehnologice sunt importante şi interesante în sine, dar sunt în afara scopului acestei cărţi. Ne concentrăm asupra proceselor naturale de risc.

Această lucrare tratează hazardurile în contextul uman: se concentrează pe ştiinţa hazardurilor naturale şi explorează problemele sociale şi economice pe care le prezintă riscurile. Admitem că răspunsul uman la ameninţările reprezentate de hazardurile naturale este la fel de important ca ştiinţa hazardurilor în sine. Înainte de a discuta despre hazardurile naturale specifice, trebuie să definim mai mulţi termeni-cheie.

Hazardul este probabilitatea ca un anumit eveniment dăunător să se producă într-o anumită perioadă de timp. Această definiţie este comună atât ştiinţelor naturale, cât şi ştiinţelor sociale (Keller et al., 2015).

Evenimentele pe care le numim hazarduri naturale sunt procese naturale normale în istoria Pământului. Ele devin periculoase atunci când oamenii trăiesc sau lucrează în apropierea acestor procese şi când schimbările în modalitatea de utilizare a terenurilor, cum ar fi urbanizarea sau defrişările, le amplifică efectul. Pentru a reduce daunele şi pierderile de vieţi omeneşti, este imperativ să se identifice procesele potenţial periculoase şi să se pună aceste informaţii la dispoziţia planificatorilor şi a factorilor de decizie. Cu toate acestea, deoarece pericolele cu care ne confruntăm sunt de origine naturală şi nu rezultatul activităţilor umane, atunci când ne dăm seama că inundaţiile sunt o parte naturală a dinamicii râurilor, trebuie să ne întrebăm dacă este mai înţelept să încercăm să controlăm inundaţiile sau pur şi simplu să ne asigurăm că oamenii şi bunurile sunt în afara pericolului atunci când ele apar.

Vulnerabilitatea este un concept cheie în cercetarea hazardurilor naturale şi a dezastrelor. Este folosit pentru a descrie potenţialul de vătămare sau pierdere într-un sistem fizic (de exemplu, eroziunea plajelor, topirea glaciară); fragilitatea mediului construit şi a infrastructurii; sau susceptibilitatea la daune în sistemele sociale şi economice. Vulnerabilitatea poate fi studiată la nivel individual, de exemplu, o persoană, o casă, un pod etc. De asemenea, poate fi agregat la nivel de grup pentru a studia vulnerabilitatea populaţiilor cu venituri mici, a unităţilor comerciale şi a sistemelor de infrastructură, cum ar fi reţelele de transport. Vulnerabilitatea poate fi, de asemenea, examinată spaţial, cu accent pe anumite locuri, cum ar fi comunităţile, regiunile sau naţiunile. Din punct de vedere spaţial, vulnerabilitatea examinează potenţialul de vătămare la locul respectiv, în funcţie de intersecţia dintre mediul construit şi infrastructură, sistemele sociale şi economice şi sistemele fizice.

Evaluarea vulnerabilităţii începe cu o înţelegere a interacţiunilor dintre sistemele fizice, sistemele umane şi mediul construit şi a modului în care acestea variază la nivel local – expunerea diferenţiată a oamenilor şi a locurilor la pericole naturale. Valoarea evaluării cât mai exacte a vulnerabilităţii faţă de situaţiile de urgenţă este în creştere, pe măsură ce guvernele locale, regionale şi naţionale se concentrează mai mult pe reducerea riscurilor în ceea ce priveşte pregătirea şi planificarea. Delimitarea zonelor de expunere are o tradiţie îndelungată în cadrul comunităţii de cercetare şi, pe măsură ce ştiinţa hazardurilor şi a sistemelor informaţionale geografice (SIG) se îmbunătăţeşte, suntem puşi tot mai des în faţa necesităţii cartografierii unor astfel de zone cu risc ridicat. Astfel de informaţii sunt esenţiale, deoarece localităţile, regiunile

sau naţiunile nu pot dezvolta strategii de reducere a riscului de dezastre fără a şti cine şi ce este cel mai vulnerabil (Bobrowsky, 2013, p. 1133).

Deşi există numeroase definiţii, modele conceptuale şi tehnici de evaluare utilizate pentru înţelegerea vulnerabilităţii au apărut mai multe principii sau înţelegeri comune. În primul rând, vulnerabilitatea este examinată dintr-o perspectivă social-ecologică. Din acest punct de vedere, procesele naturale în sine nu creează pericole, ci mai degrabă intersecţia cu sistemul uman este cea care produce potenţialul de vătămare şi, în cele din urmă, vulnerabilitatea faţă de hazardul natural. Există diferenţe în literatura de specialitate cu privire la cauzele care stau la baza vulnerabilităţii. Pentru unii, structura cauzală este expunerea la pericol, care este adesea măsurată în termeni de proximitate . O perspectivă diferită sugerează că vulnerabilitatea este cauzată de condiţiile sociale subiacente care dau naştere unor condiţii nesigure. A treia perspectivă încorporează elemente din ambele. Acest punct de vedere sugerează că vulnerabilitatea include atât expunerea din sistemul fizic, cât şi răspunsul social şi modul în care acestea sunt produse local pentru a crea periculozitatea locurilor.

Susceptibilitatea înseamnă "starea de a fi susceptibil" sau "uşor de afectat". Din punct de vedere al fenomenelor şi proceselor naturale, susceptibilitatea este legată de aspectele spaţiale ale pericolului. Aceasta se referă la tendinţa unei zone de a suferi efectele unui anumit proces periculos (de exemplu, inundaţii, cutremure, tsunami etc.), fără a lua în considerare nici momentul apariţiei, nici potenţialele victime sau pierderile economice (Bobrowsky, 2013, p. 1031). Prin aplicarea diferitelor metode, inclusiv euristice, probabilistice sau metode de densitate, este posibil să se elaboreze hărţi de susceptibilitate care clasifică un teritoriu în clase în funcţie de probabilitatea de a trece prin evenimente periculoase viitoare.

Capacitatea de adaptare este capacitatea unui sistem (natural sau uman) de a răspunde şi de a se recupera de la efectele stresului sau perturbaţiilor care au potenţialul de a modifica structura sau funcţia sistemului.

IPCC (2007,p. 869) defineşte "capacitatea de adaptare" în legătură cu schimbările climatice ca "abilitatea unui sistem de a se adapta la schimbările climatice (inclusiv variabilitatea climatică şi extremele) pentru a modera daunele potenţiale, pentru a profita de oportunităţi sau pentru a face faţă consecinţelor".

Unele procese şi fenomene naturale sunt considerate "evenimente extreme", deoarece sunt asociate cu restructurarea rapidă a sistemelor fizice,

biologice şi/sau sociale. Furtunile, incendiile, erupţiile vulcanice, inundaţiile, alunecările de teren, avalanşele, tsunami-urile şi alte evenimente extreme sunt toate capabile să „streseze” sistemele până la un punct care duce la o trecere rapidă de la o stare la alta. Alte hazarduri naturale, cum ar fi tasarea şi eroziunea solului sau eroziunea costieră, apar şi se dezvoltă în perioade de timp mai îndelungate. Efectele cumulate ale unor astfel de evenimente la scară mică pot perturba sistemele naturale şi umane, în unele cazuri mai grav decât un "eveniment extrem", cum ar fi o furtună sau un cutremur

Capacitatea societăţii de a face faţă unui pericol natural depinde de multe variabile. Următorii factori sunt consideraţi determinanţi majori ai capacităţii de adaptare (Hyatt, 2004):

1. Expunerea şi sensibilitatea sistemului la impacturile directe sau indirecte ale hazardului natural şi vulnerabilitatea aferentă a sistemelor sociale şi a mediilor de care acestea depind.
2. Capacitatea factorilor de decizie de a gestiona informaţiile, acurateţea informaţiilor, procesele prin care factorii de decizie determină ce informaţii sunt credibile şi credibilitatea factorilor de decizie înşişi.
3. Varietatea şi disponibilitatea opţiunilor tehnologice.
4. Disponibilitatea resurselor şi distribuţia acestora în rândul populaţiei afectate.
5. Structura şi eficienţa instituţiilor critice şi a autorităţii decizionale.
6. Stocul de capital uman şi societal, inclusiv educaţia, securitatea personală, puterea mijloacelor de subzistenţă şi reţelele sociale.
7. Potenţialul de partajare sau răspândire a riscurilor (de exemplu, sistemele de asigurări).
8. Percepţia publicului cu privire la hazardul natural şi semnificaţia relativă a expunerii în comparaţie cu alte provocări societale.

Adaptarea este o capacitate comportamentală care poate reduce impactul negativ într-un sistem care este expus unui eveniment extrem sau unui pericol natural cronic. Capacitatea de a face faţă unui pericol natural este, în general, invers proporţională cu vulnerabilitatea – cu cât este mai mare capacitatea de adaptare, cu atât este mai mică vulnerabilitatea unui sistem, a unei regiuni, a unei comunităţi sau a unui individ. Cu toate acestea, în unele cazuri, chiar şi capacităţile puternice de adaptare nu reduc neapărat vulnerabilitatea. De exemplu, instalaţiile de transport şi de tratare a apelor uzate construite de către o comunitate cu resurse instituţionale şi financiare ridicate într-o zonă inundabilă pot fi la fel de vulnerabile fizic la impactul inundaţiilor ca şi

instalaţiile construite de o comunitate cu capacitate redusă de adaptare. Comportamentele de adaptare care se bazează pe o bună înţelegere atât a pericolului, cât şi a impactului acestuia pot creşte substanţial rezistenţa aşezărilor umane, a infrastructurii şi a economiilor.

Expunerea (sau elemente supuse riscului) cuprinde toate elementele, procesele şi subiecţii care ar putea fi afectaţi de un eveniment periculos. În consecinţă, expunerea reprezintă prezenţa bunurilor sociale, economice, de mediu sau culturale în zonele care pot fi afectate de un hazard.

Expunerea este cel mai frecvent înţeleasă, în cercetarea riscurilor şi a pericolelor naturale, ca fiind contextul social şi material reprezentat de persoane, resurse, infrastructură, producţie, bunuri, servicii şi ecosisteme care pot fi afectate de un eveniment periculos. Prin urmare, termenul este adesea folosit pentru a caracteriza, într-un sens mai general, componentele societăţii şi mediului şi procesele respective care sunt expuse unui pericol specific sau unei varietăţi de fenomene potenţial periculoase. Aspectele temporale ale expunerii se referă la întrebarea când şi cât timp un element expus riscului ar putea fi în faţa unui pericol sau unui factor de stres. Dimensiunea spaţială a expunerii indică proporţia teritoriului afectat de un fenomen periculos în raport cu suprafaţa totală a entităţii expuse, cum ar fi o comunitate, un oraş sau o ţară. Această expunere spaţială oferă o imagine de ansamblu asupra modului în care ar fi afectată o entitate expusă. Dacă o furtună de coastă loveşte o ţară mai mare, procesele de recuperare şi pierderile rămân adesea relativ mici, deoarece nivelul de expunere este lent în comparaţie cu populaţia şi valorile generale ale ţării.

În schimb, insulele mici, unde aproape 100% din teritoriu şi populaţie este expusă şi ar putea fi afectată de un val de furtună, ar fi, prin urmare, deja mai expuse riscului. Expunerea este văzută în unele concepte ca o componentă a vulnerabilităţii şi, respectiv, a riscului, deoarece contribuie la gradul de impact adus de un eveniment de pericol (Bobrowsky, 2013, p. 306).

Riscul şi analiza riscului constituie un domeniu de cercetare fundamental multidisciplinar, situat la intersecţia dintre ştiinţele naturale, ştiinţele sociale, inginerie şi politici publice. În accepţiunea cea mai frecvent utilizată, riscul este definit ca rezultatul interacţiunii dintre un pericol (hazard) - precum inundaţiile, uraganele, cutremurele sau alunecările de teren - şi vulnerabilitatea sistemului sau a elementului expus, incluzând probabilitatea de apariţie a fenomenelor periculoase şi posibilitatea materializării consecinţelor acestora (Figura 1.1).

Estimarea riscului impune combinarea probabilității producerii unui hazard cu evaluarea amplorii consecințelor potențiale asupra elementelor expuse. Spre exemplu, evaluarea riscului de inundație necesită atât determinarea probabilității unui eveniment cu o anumită intensitate, cât și analiza posibilelor pierderi umane, daune materiale sau impacte economice care pot rezulta în cazul unui impact asupra societății. Această abordare evidențiază faptul că analiza riscului nu se poate limita la caracterizarea hazardului; dimpotrivă, trebuie să includă evaluarea vulnerabilității sistemelor și comunităților expuse. Factorii esențiali care determină vulnerabilitatea includ expunerea, susceptibilitatea sau fragilitatea elementelor expuse și capacitatea de adaptare a acestora (Birkmann, 2006b).

Atât riscul, cât și vulnerabilitatea sunt dinamice, variind înainte, în timpul și după producerea unui dezastru (IPCC, 2012). Această dinamică explică diversitatea definițiilor și abordărilor existente în domeniu, care diferă în funcție de discipline – de la geografie și inginerie, la științe sociale, știința mediului, matematică sau medicină în situații de urgență – precum și în funcție de sectoarele de aplicare, cum ar fi gestionarea dezastrelor, asigurările, planificarea teritorială sau adaptarea la schimbările climatice.

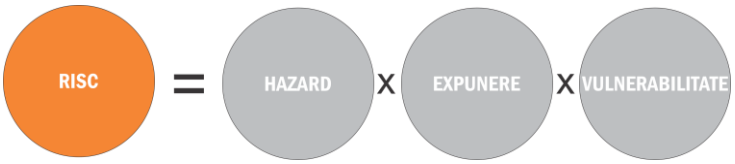


Figura 1.1 Definiția riscului (adaptată de autor după UNDRR Terminology, 2017)

Cele două școli majore de gândire privind riscul

În literatura de specialitate se disting două abordări conceptuale majore privind riscul:

Prima școală de gândire consideră riscul ca rezultat al interacțiunii dintre hazard și vulnerabilitate. Această perspectivă, predominantă în cercetările din domeniul reducerii riscului de dezastre (ONU/ISDR, 2004), pune accentul pe faptul că riscurile apar din întâlnirea dintre procesele naturale periculoase și sistemele umane susceptibile la impact.

Raportul UNDRO (1980) marchează un moment esențial în acest sens, definind riscul ca produs al hazardului (H) și vulnerabilității (V), care afectează diverse elemente expuse (E), precum populația, infrastructura, sectoarele economice sau serviciile publice. Această formulă conceptuală a fost ulterior reafirmată de raportul Living with Risk (ONU/ISDR, 2004), iar unii autori au extins-o incluzând expunerea ca variabilă distinctă. În același spirit, IPCC

(2012) subliniază că riscul rezultă din interacţiunea complexă dintre hazarduri climatice sau meteorologice şi vulnerabilitatea şi expunerea societăţilor afectate.

Deşi există diferenţe terminologice între formulele propuse, elementele fundamentale - hazard, vulnerabilitate şi expunere – sunt recunoscute ca fiind constante în definirea riscului. Cadrul de acţiune de la Hyogo (2005–2015) întăreşte această abordare, evidenţiind faptul că reducerea riscului de dezastru începe printr-o înţelegere aprofundată a pericolelor şi vulnerabilităţilor fizice, sociale, economice şi de mediu (ONU, 2015).

A doua şcoală de gândire, consolidată în cadrul sociologiei riscului, consideră riscul ca o caracteristică inerentă procesului decizional, asociată opţiunilor pe care indivizii sau colectivităţile le iau în condiţii de incertitudine. Luhmann (1991), unul dintre cei mai influenţi teoreticieni ai riscului social, defineşte riscul ca rezultând din decizia umană ce poate conduce la pierderi sau prejudicii atunci când această decizie este confruntată cu un hazard.

În această optică, riscul apare atunci când o persoană sau un grup are posibilitatea de a alege între diferite opţiuni care implică consecinţe potenţial negative. Luhmann distinge clar între risc – asociat deciziilor umane – şi ameninţare - asociată unor pierderi impuse din exterior, fără implicarea unei decizii.

Cele două şcoli de gândire nu sunt incompatibile; dimpotrivă, în contextul schimbărilor climatice, al adaptării la nivelul mării sau al hazardurilor extreme, ele se suprapun în mod semnificativ. Riscul devine astfel atât rezultatul interacţiunii dintre hazard şi vulnerabilitate, cât şi o consecinţă a deciziilor luate de societate în faţa acestora. Reducerea riscului necesită, în acest sens, o analiză integrată care să includă comportamentele umane, motivaţiile, constrângerile sociale şi procesele decizionale relevante.

Riscul ca fenomen social şi contextual

În ceea ce priveşte ecuaţiile de risc, ONU/ISDR subliniază importanţa analizei contextului social în care apar riscurile, având în vedere că percepţiile publicului asupra riscului, responsabilităţii şi cauzalităţii diferă între comunităţi şi societăţi. Prin urmare, gestionarea eficientă a riscurilor necesită colaborarea interdisciplinară între cercetători din domeniul ştiinţelor naturale şi experţi în ştiinţe sociale şi comportamentale, pentru a sprijini un proces decizional bine fundamentat şi sensibil la variaţiile sociale.

Acest cadru integrat de înţelegere a riscului permite o abordare mai realistă a modului în care hazardurile naturale se transformă în dezastre –

printr-o combinaţie de factori naturali, decizii umane şi vulnerabilităţi structurale – şi reprezintă fundamentul actual al politicilor moderne de reducere a riscurilor de dezastre.

Dezastrul. În romanul *Candide* de Voltaire (1759), autorul introduce, într-o formă alegorică, dezbaterea asupra cauzelor unui mare cutremur care a devastat Lisabona, unul dintre cele mai importante şi religioase oraşe europene ale epocii. Pentru personajul Candide, calamitatea produsă în Ziua Tuturor Sfinţilor* din 1755, când majoritatea credincioşilor se aflau în biserici, reprezintă manifestarea evidentă a unei judecăţi finale. În contrast, mentorul său Pangloss interpretează evenimentul doar ca pe o consecinţă a localizării Lisabonei deasupra unei falii active, tratându-l ca pe un fenomen natural lipsit de semnificaţie morală. Autorităţile oraşului, profund marcate de spiritul Inchiziţiei, nu tolerează însă această dispută de idei: Pangloss este executat prin spânzurare pentru „păcatul" de a nu recunoaşte o cauză divină, iar Candide este pedepsit corporal pentru simplul fapt că a asistat la discuţie.

Deşi Voltaire recurge la satiră pentru a critica optimismul religios şi filosofic al Iluminismului, cutremurul de la Lisabona devine, în plan istoric şi intelectual, un moment de cotitură în trecerea de la interpretarea teologică a dezastrelor la înţelegerea lor ca fenomene naturale. Pe fundalul controverselor teologice şi filosofice generate de acest eveniment, Jean-Jacques Rousseau atrage atenţia asupra dimensiunii antropice a catastrofei. El subliniază că „natura nu a construit acolo 20.000 de case cu şase–şapte etaje" şi că o distribuţie mai dispersată a populaţiei, precum şi posibilitatea unei evacuări rapide ar fi redus considerabil pagubele. Rousseau observă, de asemenea, că numeroase victime au pierit deoarece au ezitat să părăsească locuinţele, încercând să-şi salveze bunurile materiale – haine, documente, bani – ceea ce îl conduce la concluzia că fiinţele umane poartă o parte semnificativă a responsabilităţii pentru risc, prin propriile alegeri şi comportamente, mai degrabă decât prin voinţa unui „zeu nemilos".

În literatura de specialitate contemporană, cutremurul de la Lisabona din 1755 este adesea considerat primul dezastru natural „modern" (Dynes, 2000), întrucât a inaugurat o nouă paradigmă de interpretare a dezastrelor, la intersecţia dintre cauzele naturale şi cele sociale. După mai bine de două secole şi jumătate, întrebările privind „naturalitatea" dezastrelor şi ponderile relative ale determinanţilor fizici şi umani rămân centrale în cercetarea hazardurilor.

* Ziua Tuturor Sfinţilor în Portugalia se sărbătoreşte pe 1 noiembrie. Această zi este o sărbătoare legală, cunoscută sub numele de "Dia de Todos os Santos"

În nucleul dezbaterii actuale se află două mari şcoli de gândire. Prima îşi are originile în cercetările de pionierat asupra inundaţiilor realizate de Gilbert White în anii 1940, care au stat la baza aşa-numitei „Şcoli din Chicago". Această abordare, de orientare structuralistă şi tehnocrată, pleacă de la premisa că soluţiile ştiinţifice şi tehnologice - prin inginerie, planificare şi infrastructuri de protecţie - pot reduce semnificativ impactul dezastrelor naturale asupra societăţii. Convingerea că societatea se poate adapta la forţele naturale distructive a constituit unul dintre pilonii Deceniului Internaţional pentru Reducerea Dezastrelor Naturale (IDNDR). Strategia IDNDR, formulată în anii 1980, a urmărit transferul de cunoştinţe şi practici de reducere a dezastrelor din ţările dezvoltate către ţările în curs de dezvoltare, puternic expuse la hazarduri.

În aceeaşi perioadă, a câştigat însă teren o a doua şcoală de gândire, promovată în special de cercetători din ştiinţele sociale şi studiile de dezvoltare. Aceştia au criticat caracterul insuficient al abordărilor tehnocrate occidentale pentru înţelegerea şi tratarea cauzelor profunde ale dezastrelor, precum subdezvoltarea, inegalităţile structurale şi marginalizarea comunităţilor vulnerabile. Aşa-numiţii „critici radicali" au argumentat că, în contextul în care indivizii sau comunităţile sunt deja marginalizate economic sau ecologic, simplul transfer de tehnologie nu este suficient pentru a reduce riscul şi a preveni dezastrul.

În prezent, ştiinţa dezastrelor naturale se întemeiază pe o acceptare largă a paradoxului conform căruia, deşi evenimentele cauzatoare (hazardurile) sunt procese naturale, dezastrele rezultate sunt în primul rând construite social (Pelling, 2003; Wisner et al., 2004). Cu alte cuvinte, o bună cunoaştere a dinamicii mediului fizic este esenţială pentru anticiparea frecvenţei şi intensităţii fenomenelor periculoase, dar este la fel de importantă analiza dimensiunilor sociale, economice, politice şi culturale care transformă un anumit eveniment periculos într-un dezastru concret. După cum remarcă geograful Kenneth Hewitt, „societatea, mai degrabă decât natura, decide cine este mai probabil să fie expus la agenţi geofizici periculoşi".

Ştiinţa modernă a dezastrelor tinde, astfel, către o perspectivă interdisciplinară, în care specialiştii în geoştiinţe şi inginerie îşi concentrează demersurile asupra caracterizării frecvenţei şi severităţii hazardurilor, în timp ce cercetătorii din ştiinţele sociale investighează caracteristicile comunităţilor şi societăţilor – capacitatea de anticipare, de răspuns, de reziliență şi de recuperare. Analiza conjugată a pericolului fizic şi a vulnerabilităţii sociale

conduce la o evaluare comprehensivă a riscului, înţeles ca probabilitate de pierdere (umană, materială, economică sau de mediu) asociată impactului unui eveniment de pericol asupra unui anumit sistem sau obiectiv societal.

În acest cadru conceptual, transformarea unui „hazard natural" într-un „dezastru uman" depinde de gradul în care un eveniment perturbă funcţionarea normală a unei comunităţi sau societăţi, generând pierderi pe scară largă ce depăşesc capacitatea acesteia de a face faţă prin resurse proprii. Un astfel de eveniment este definit drept „dezastru" (Smith, 2001; ISDR, 2004).

Cele cinci concepte descrise în continuare sunt de bază pentru o înţelegere a hazardurilor naturale. Aceste concepte fundamentale servesc drept cadru conceptual pentru discutarea fiecărui hazard natural în capitolele ulterioare ale acestei cărţi.

1 Ştiinţa ne ajută să prezicem hazardurile. Hazardurile naturale, cum ar fi cutremurele, erupţiile vulcanice, alunecările de teren şi inundaţiile sunt procese naturale care pot fi identificate şi studiate folosind metoda ştiinţifică. Cele mai periculoase evenimente şi procese pot fi monitorizate şi cartografiate, iar activitatea lor viitoare poate fi prezisă, pe baza frecvenţei evenimentelor din trecut, a modelelor de apariţie a acestora şi a tipurilor de evenimente precursoare.

2 Cunoaşterea riscurilor poate ajuta oamenii să ia decizii. Procesele periculoase pot fi supuse analizei riscurilor, care estimează probabilitatea ca un eveniment să aibă loc şi consecinţele care rezultă din acel eveniment. De exemplu, dacă ar fi să estimăm că, într-un anumit an, oricare, în Republica Moldova este o şansă de 5% de cutremur moderat şi dacă ştim consecinţele acestei categorii de cutremur în ceea ce priveşte pierderile de vieţi omeneşti şi daunele, atunci putem calcula riscul potenţial pentru societate.

3 Există legături între hazardurile naturale. Procesele ;i fenomenele periculoase sunt legate în multe moduri. De exemplu, cutremurele pot produce alunecări de teren şi valuri uriaşe numite tsunami, iar uraganele cauzează adesea inundaţii şi eroziune costieră.

4 Oamenii pot transforma evenimentele periculoase în catastrofe. Magnitudinea sau mărimea unui eveniment periculos, precum şi frecvenţa acestuia sau cât de des apare pot fi influenţate de activitatea umană. Ca urmare a creşterii numărului populaţiei umane şi a practicilor precare de utilizare a terenurilor, evenimentele care provocau mici daune, cauzează acum adesea catastrofe.

5 Consecințele hazardurilor pot fi minimizate. Minimizarea consecinţelor negative generate de hazardurile naturale necesită o abordare integrată, multidisciplinară, care îmbină înţelegerea ştiinţifică a proceselor naturale, planificarea şi reglementarea utilizării terenurilor, soluţiile inginereşti şi pregătirea proactivă pentru situaţii de urgenţă. Deşi anumite hazarduri pot fi controlate parţial prin intervenţii specifice, numeroase procese naturale rămân complet în afara capacităţii umane de a fi prevenite. Spre exemplu, tehnicile de gestionare a incendiilor de vegetaţie - precum arderile controlate sau intervenţiile complexe de stingere - pot reduce temporar riscurile, însă cutremurele, ca procese geodinamice profunde, nu pot fi evitate în niciun fel.

În anumite situaţii, etichetarea unui proces natural drept „periculos" poate chiar amplifica efectele acestuia. Râurile vor continua să se reverse, întrucât inundaţiile reprezintă o componentă inerentă a dinamicii fluviale. Totuşi, prin decizia de a construi şi de a desfăşura activităţi economice în zone inundabile, societatea transformă un proces natural într-un hazard cu potenţial distructiv ridicat. Ca urmare, diverse măsuri de control al inundaţiilor - diguri, baraje, canale de derivare - pot accentua, în mod neaşteptat, vulnerabilitatea, crescând presiunea asupra albiei şi amplificând riscurile în aval. Astfel, intervenţiile tehnice menite să reducă riscul pot, în anumite contexte, să intensifice chiar pericolul pe care încearcă să îl prevină.

În această perspectivă, cea mai eficientă strategie de reducere a riscurilor constă în identificarea proceselor potenţial periculoase şi delimitarea zonelor geografice în care acestea se manifestă cu intensitate ridicată. Este esenţial ca dezvoltarea teritorială, infrastructurile şi activităţile economice să fie planificate astfel încât populaţia şi bunurile materiale să nu fie expuse hazardurilor care nu pot fi controlate, precum cutremurele (Keller & DeVecchio, 2016).

Hazardurile naturale sunt generate de interacţiuni complexe între procesele terestre, oceanice şi atmosferice, iar impactul lor asupra societăţilor umane este amplificat de dinamica modernă a mediului. În ultimele decenii, creşterea populaţiei, modificarea utilizării terenurilor, extinderea suprafeţelor impermeabile, defrişările şi exploatarea intensă a resurselor naturale au contribuit la accentuarea unor fenomene naturale periculoase. Dintre acestea se numără cutremurele, erupţiile vulcanice, alunecările de teren, tasările, deşertificarea şi seceta în mediul terestru; cicloanele, taifunurile, uraganele şi tsunami-urile în mediul oceanic; precum şi furtunile, vijeliile sau furtunile de praf în atmosferă. Toate aceste fenomene prezintă efecte marcante asupra vieţii

și sănătății umane, manifestându-se pe scări temporale și spațiale variabile și generând consecințe socioeconomice semnificative.

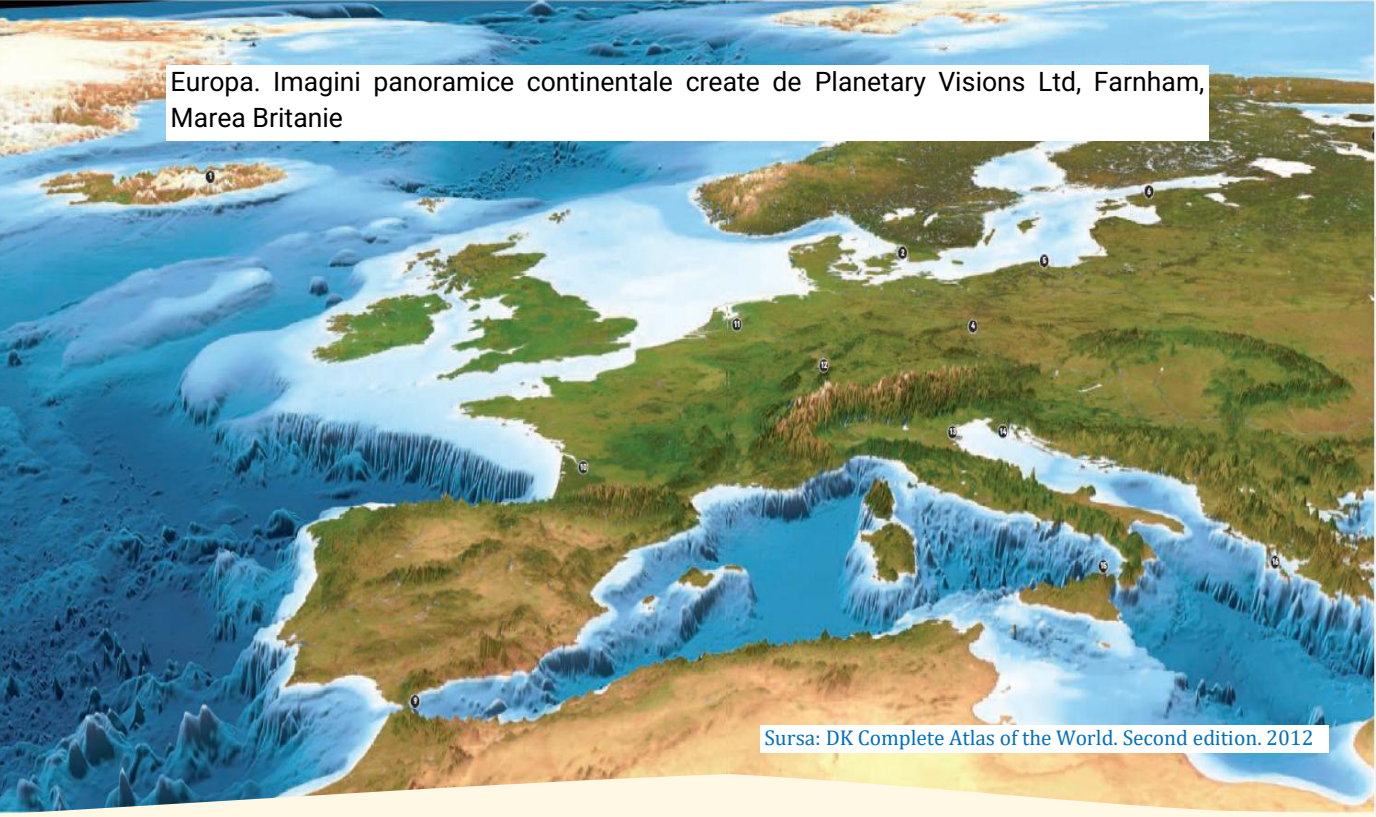
În contextul actual, tehnologiile de observație a Pământului joacă un rol fundamental în monitorizarea și evaluarea hazardurilor. În ultimii ani, datele satelitare au fost utilizate pe scară largă atât în țările dezvoltate, cât și în cele în curs de dezvoltare pentru a înțelege mai bine mecanismele proceselor naturale și pentru a realiza evaluări de impact mai riguroase. Totodată, au fost dezvoltate numeroase misiuni satelitare dedicate monitorizării hazardurilor și analizării schimbărilor în parametrii tereștri, oceanici și atmosferici. Teledetecția satelitară a devenit astfel un instrument indispensabil în analiza sistemului Terestru, oferind date esențiale privind caracteristicile suprafeței active, dinamica ecosistemelor, modificările climatice și compoziția atmosferică (Singh & Bartlett, 2018).

Autoevaluare

1. Explică, printr-un exemplu propriu, cum se aplică metoda științifică în studiul unui proces natural periculos.
2. Compară și comentează cei trei termeni: hazard, vulnerabilitate și expunere. Cum se definesc? Cum se leagă între ei în ecuația riscului și de ce nu este suficient să cunoaștem doar hazardul pentru a estima riscul?
3. Prezintă pe scurt cele trei surse principale de energie care controlează procesele naturale periculoase (căldura internă a Pământului, energia solară, gravitația). Asociază fiecărei surse cel puțin două tipuri de hazarduri naturale.
4. Descrie relația dintre vulnerabilitate, capacitate de adaptare și risc. De ce se spune că, în general, riscul scade atunci când capacitatea de adaptare crește, dar există situații în care chiar și capacități mari de adaptare nu reduc vulnerabilitatea?
5. Explică diferența dintre cele două „școli de gândire" în definirea riscului (riscul ca produs al hazardului și vulnerabilității vs. riscul ca rezultat al deciziilor umane). Dă un exemplu concret în care deciziile de utilizare a terenurilor influențează nivelul de risc.
6. Argumentează rolul teledetecției satelitare și al SIG în evaluarea hazardurilor și vulnerabilității. Ce tipuri de informații pot furniza aceste tehnologii și de ce sunt esențiale pentru delimitarea zonelor de susceptibilitate și expunere?

Bibliografie recomandată

- Bobrowsky, P., 2013. *Encyclopedia of natural hazards.* New York: Springer.
- Bogdan, O., 2007. *Hazarde meteo-climatice: geneză și vulnerabilitate cu aplicații la România.* Sibiu: Editura Universității „Lucian Blaga".
- Mac, I. & Petrea, D., 2003. Sisteme geografice la risc. *Riscuri și catastrofe,* pp. 13-26.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021. PreventionWeb. [Interactiv] Available at: https://www.preventionweb.net/



Europa. Imagini panoramice continentale create de Planetary Visions Ltd, Farnham, Marea Britanie

Sursa: DK Complete Atlas of the World. Second edition. 2012

TECTONICA PLĂCILOR ŞI RISCURILE GEOFIZICE

Rezultatele învăţării:

La finalul acestei unităţi de învăţare, studenţii vor fi capabili să

- descrie structura internă a Pământului şi să explice procesele geodinamice asociate fiecărui strat.
- explice teoria tectonicii plăcilor şi să argumenteze validitatea ei prin exemple şi dovezi ştiinţifice.
- distinge între tipurile de limite ale plăcilor tectonice, identificând fenomenele şi structurile asociate fiecăruia.
- analizeze mecanismele de mişcare a plăcilor şi relaţia lor cu procesele geologice majore (subducţie, orogeneză ş.a.).
- interpretezi hărţi şi modele geodinamice pentru a localiza zone active tectonic.
- coreleze procesele tectonice cu hazarduri naturale şi să explice modul în care acestea se transformă în riscuri pentru populaţie.
- aplica metode de evaluare a riscului geofizic în contexte reale sau simulate.
- elaboreze analize şi argumente coerente privind consecinţele tectonicii plăcilor asupra reliefului, climei şi societăţii.

Termeni cheie: tectonica plăcilor, zone de subducţie, risc geofizic, convergenţă tectonică

De ce sunt cei mai activi vulcani şi cutremure mari concentrate în jurul Pacificului? De ce sunt cele mai multe tsunami în Oceanul Pacific, şi nu în Atlantic? De ce par continentele de pe litoralul Atlantic să se potrivească, ca două piese de puzzle? Răspunsurile la toate acestea întrebări şi multe altele se află în teoria cunoscută sub numele de tectonica plăcilor. Blocurile uriaşe ale straturilor superioare ale Pământului se mişcă, se ciocnesc sau se scufundă în interiorul fierbinte al planetei, unde provoacă topirea rocilor şi formarea vulcanilor. Aceste ciocniri dintre plăcile tectonice ridică lanţuri muntoase înalte, chiar dacă alunecările de teren şi râurile le erodează.

Pentru a înţelege aceste procese şi pericolele asociate, trebuie să înţelegem forţele care le pun în mişcare. Hazarduri naturale de toate tipurile sunt, în cele din urmă, determinate de munţi, oceane, de vremea şi clima pe care acestea le influenţează.

Pământul este o planetă dinamică complexă care are o scoarţă exterioară rigidă, un centru solid şi un strat gros de fluide între cele două, care se mişcă ca urmare a proceselor interne dinamice. Procesele interne au un impact important asupra suprafeţei Pământului. Ele sunt responsabile pentru cele mai mari forme de relief de pe suprafaţă: continente şi bazine oceanice. Configuraţia continentelor şi bazinele oceanice controlează parţial curenţii oceanici şi distribuţia căldurii transportate de apa mării într-un sistem global care afectează clima, vremea şi răspândirea plantelor şi a animalelor pe Pământ. În cele din urmă, procesele interne ale Pământului sunt, de asemenea, responsabile pentru formele de relief regionale, inclusiv lanţuri muntoase, lanţuri de vulcani activi şi mari zone de topografie înaltă, cum ar fi Platoul Tibetan şi Munţii Stâncoşi. Topografia înaltă, care include munţi şi platouri, afectează semnificativ atât modelele globale de circulaţie a aerului în atmosfera inferioară (vremea), cât şi modelele climatice pe termen lung, influenţând astfel direct toată viaţa de pe Pământ. Astfel, înţelegerea proceselor interne ale Pământului este mult mai mult decât un simplu interes academic. Aceste procese stau la baza producerii multitudinii de medii împărtăşite de toate fiinţele vii de pe Pământ. De exemplu, mişcările din mantaua Pământului pot cauza cutremure şi erupţii vulcanice, iar interacţiunea dintre straturile interioare şi cele exterioare contribuie la formarea reliefului de la suprafaţă.

Structura internă a Pământului

Pământul are o rază de aproximativ 6300 km şi o circumferinţă de aproximativ 40000 km. Structura internă a Pământului este complexă şi se împarte în mai multe straturi, fiecare având caracteristici distincte (figura 2.1):

Crusta este stratul exterior al Pământului, care variază în grosime între aproximativ 5-70 km. Crusta continentală este mai groasă, compusă în principal din roci granitice, iar crusta oceanică, compusă în principal din roci bazaltice, este mai subţire.

Mantaua, situată sub crustă, se întinde până la adâncimi de aproximativ 2.900 km. Este alcătuită din rocă solidă, dar care se poate comporta ca un fluid pe termen lung datorită temperaturilor şi presiunilor ridicate. Mantaua este responsabilă pentru curenţii de convecţie care contribuie la mişcarea plăcilor tectonice.

Nucleul extern: Sub mantaua se află nucleul extern, care se extinde de la 2900 km până la aproximativ 5150 km adâncime. Acesta este compus din fier şi nichel lichid şi este responsabil pentru generarea câmpului magnetic al Pământului prin mişcarea sa.

Nucleul intern: În centrul Pământului se află nucleul intern, care este solid şi se extinde de la 5150 km până la 6371 km adâncime. Deşi este extrem de cald (temperaturi care pot atinge 5700°C), presiunea extrem de mare menţine fierul şi nichelul într-o stare solidă.

Alt mod de a lua în considerare structura internă a Pământului este puterea rocilor care îl formează. Din perspectiva rezistenţei, stratul exterior rece şi puternic al Pământului este numit *litosferă* (lithos înseamnă "rocă"). Se compune din crustă şi partea rigidă a mantalei. Litosfera are o grosime medie de aproximativ 100 km, dar variază de la câţiva kilometri grosime sub crestele dorsalelor oceanice până la aproximativ 120 km grosime sub bazinele oceanice şi 20 până la 400 km grosime sub continente. Litosfera este mult mai puternică şi mai rigidă decât materialul pe care „pluteşte" - *astenosfera* (astenos înseamnă "fără forţă"). Astenosfera este un corp în mişcare lentă, format din rocă relativ slabă şi fierbinte, care se comportă ca un material moale, plastic.

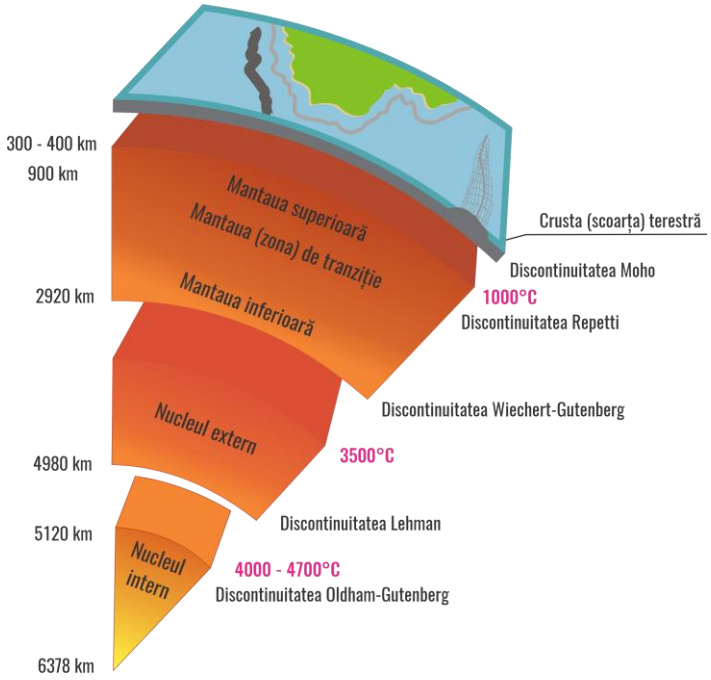


Figura 2.1 Structura internă a Pământului (după: Ene M)

Rocile crustale sunt mai puţin dense decât rocile mantalei de dedesubt, iar crusta continentală este uşor mai puţin densă decât crusta oceanică. Crusta oceanică este, pe de altă parte, mai subţire decât crusta continentală - grosimea crustei de sub fundul oceanului este de aproximativ şase până la şapte km, în timp ce grosimea crustei de sub continente este, în medie, de aproximativ 35

km şi poate ajunge până la 70 km sub regiunile montane. Crusta are, în medie, o grosime de mai puţin de 1% din raza totală a Pământului.

În plus faţă de diferenţele de densitate şi grosime, crusta continentală şi oceanică au istorii geologice foarte diferite. Crusta oceanică care stă la baza bazinelor oceanice de astăzi are o vechime mai mică de 200 de milioane de ani, în timp ce o crustă continentală are o vechime de până la câteva miliarde de ani.

La trei mii de kilometri sub noi, la limita nucleu-manta, pot avea loc procese care controlează ceea ce se întâmplă la suprafaţa planetei. Studiile ştiinţifice sugerează că cicluri gigantice de convecţie au loc în mantaua Pământului, urcând din adâncurile limitei dintre nucleu şi manta spre suprafaţă, înainte de a coborî din nou. Mantaua Pământului pare să conţină celule de convecţie care funcţionează într-un mod similar cu celulele de convecţie din atmosferă, dar care durează probabil până la 500 de milioane de ani. Convecţia în masa mantalei este alimentată de căldura internă a Pământului, care include căldura iniţială de formare a planetei, căldura generată de cristalizarea miezului şi căldura furnizată de dezintegrarea radioactivă a elementelor, cum ar fi uraniul din manta.

Cum ştim despre structura internă a Pământului? Cunoştinţele noastre despre structura interiorului Pământului provin în primul rând din seismologie, studiul cutremurelor şi undelor de cutremur. Când are loc un cutremur mare, energia seismică este eliberată şi se deplasează prin Pământ şi de-a lungul suprafeţei sale ca unde seismice. Proprietăţile acestor unde sunt discutate în capitolul 3, în care sunt descrise riscurile asociate cutremurelor de pământ.

Unele unde călătoresc atât prin materie solidă, cât şi prin lichide, în timp ce altele călătoresc numai prin mediul solid. Viteza undelor seismice diferă în funcţie de proprietăţile materialelor prin care se mişcă. Când undele seismice întâlnesc o limită, cum ar fi limita nucleu-manta, unele sunt reflectate înapoi, în timp ce altele traversează graniţa şi sunt refractate – adică îşi schimbă direcţia. Altele nu reuşesc să se propage prin miezul exterior lichid. Mii de seismografe – instrumente care înregistrează undele seismice – sunt situate la suprafaţa Pământului în întreaga lume. Când are loc un cutremur, undele reflectate şi refractate sunt înregistrate de aceste instrumente. Studiul înregistrărilor seismografice a permis oamenilor de ştiinţă să deducă structura interiorului Pământului şi proprietăţile straturilor sale.

Pe măsură ce seismologia a devenit mai sofisticată şi seismografele s-au îmbunătăţit, am aflat mai multe despre structura internă a Pământului şi am descoperit că este mai complexă decât se credea iniţial. De exemplu, acum ştim:

- că magma, care este material de rocă topită sub suprafaţa Pământului, este generată în astenosferă;
- despre existenţa plăcilor litosferice care se scufundă adânc în manta;
- că diferenţele mari în grosimea litosferei reflectă diferenţele de vârstă a plăcilor

Tectonica plăcilor. Definiţii şi mecanism de formare

Termenul tectonic se referă la procesele geologice la scară largă care deformează litosfera Pământului şi produc bazine oceanice, continente şi munţi. Procesele tectonice sunt conduse de forţe adânci în interiorul Pământului.

Ce este tectonica plăcilor? Tectonica plăcilor reprezintă ansamblul proceselor geodinamice care determină mişcarea fragmentelor rigide ale scoarţei terestre – plăcile litosferice – pe suprafaţa Pământului (figura 2.2). Aceste plăci plutesc pe astenosfera vâscoasă, deplasându-se lent datorită curenţilor de convecţie din manta, alimentaţi de căldura internă a planetei. O placă litosferică poate include un continent şi o parte dintr-un bazin oceanic sau poate fi limitată la un bazin oceanic. Procesele implicate în crearea, mişcarea şi distrugerea acestor plăci sunt cunoscute colectiv sub numele de tectonica plăcilor.

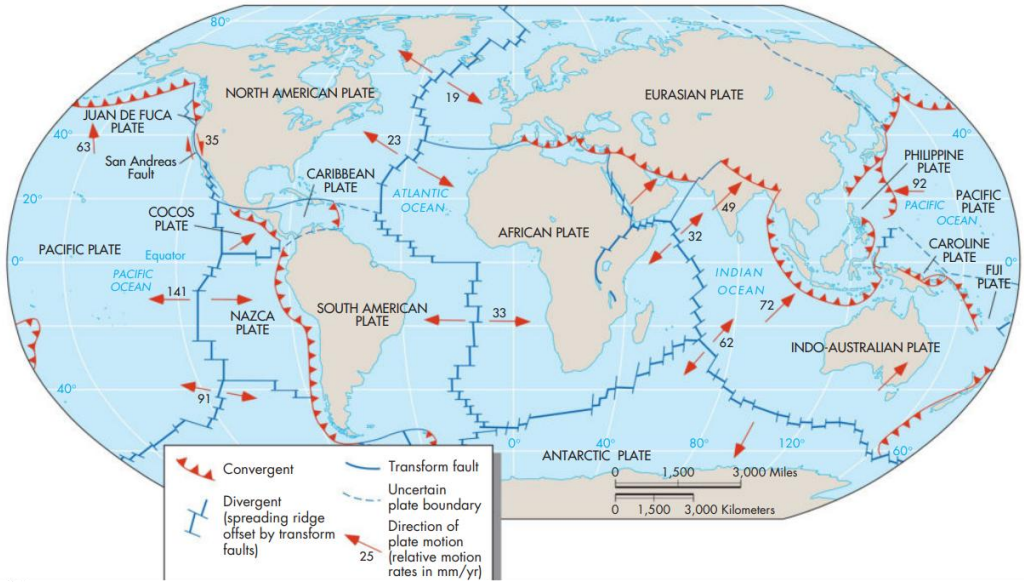


Figura 2.2. Plăcile tectonice, limitele şi direcţiile de mişcare a plăcilor (Keller, et al., 2015)

Mecanismele tectonice generează procesele endogene majore – orogeneza, vulcanismul, seismismul şi formarea bazinelor oceanice. Prin urmare, tectonica plăcilor constituie principala sursă a riscurilor geofizice de origine internă.

Limitele dintre plăcile litosferice sunt zone geologice active cu frecvente erupţii vulcanice şi cutremure. Majoritatea cutremurelor şi cei mai mulţi dintre vulcani sunt asociaţi cu limitele plăcilor tectonice. De-a lungul timpului geologic, plăcile s-au format şi au fost distruse, rulând materialele din interiorul Pământului la suprafaţă şi înapoi în manta.

Expansiunea fundului oceanic este un mecanism care se referă la tectonica plăcilor. Ideea derivei continentelor a fost sugerată pentru prima dată de omul de ştiinţă german Alfred Wegener în 1915. El a prezentat dovezi ale derivei continentale, inclusiv congruenţa formei continentelor, în special a celor care se învecinează cu Oceanul Atlantic şi similitudinea fosilelor găsite în America de Sud şi Africa. Ipoteza lui Wegener nu a fost luată în serios, deoarece oamenii de ştiinţă ai vremii nu şi-au putut imagina un mecanism capabil să mişte continentele. Acest mecanism a fost identificat în anii 1960, când a fost descoperită expansiunea fundului oceanelor.

Noi straturi de crustă sunt adăugate continuu la periferiile plăcilor litosferice; în zona dorsalelor medio-oceanice sau în aşa-numitele „puncte fierbinţi" ale Terrei. Litosfera oceanică se formează în centrele de răspândire, dar este distrusă acolo unde o placă se scufundă sub alta în locuri numite zone de subducţie (figura 2.3).

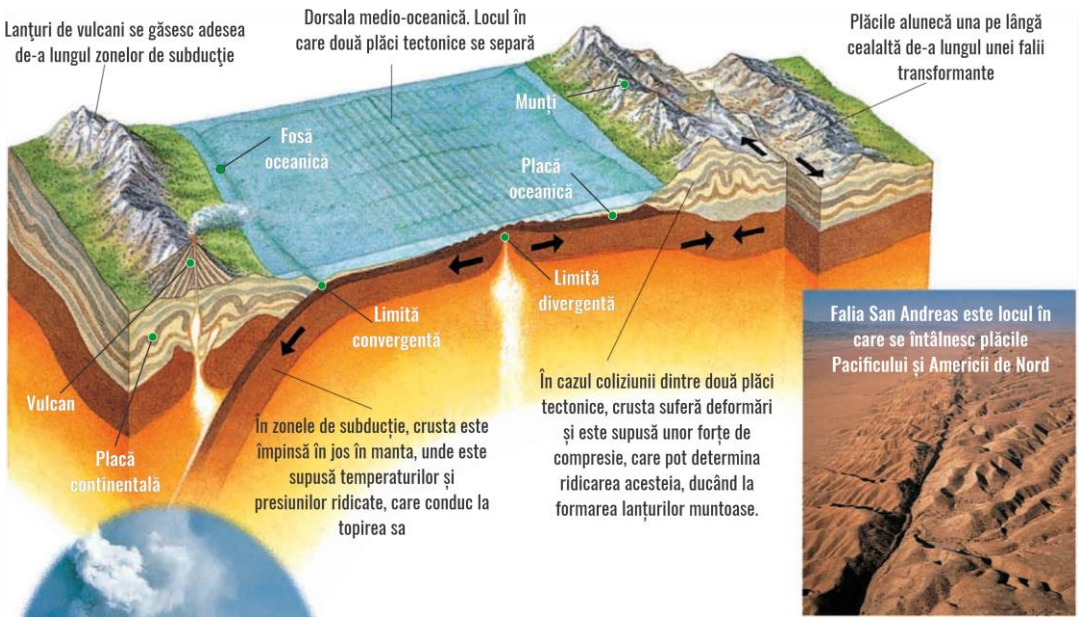


Figura 2.3. Dinamica plăcilor tectonice
(adaptată de autor după https://www.aquaportail.com/pictures2109/tectonique-des-plaques.jpg)

Deoarece rata de producţie a noii litosfere în centrele de răspândire este echilibrată de consumul litosferei în zonele de subducţie, Pământul rămâne constant în dimensiune.

Există trei tipuri principale de limite ale plăcilor tectonice: *divergente*, *convergente* şi *transformante* (figura 2.3). Aceste limite nu se prezintă ca simple fisuri înguste, aşa cum sunt ilustrate în hărţi şi diagrame, ci reprezintă, de fapt, zone extinse de deformare intensă, cu o lăţime variind de la câţiva kilometri până la sute de kilometri, care se extind prin întreaga scoarţă terestră.

Limitele divergente se formează atunci când două plăci tectonice se îndepărtează una de cealaltă, generând astfel o nouă litosferă. Acest proces se desfăşoară în mod obişnuit la nivelul dorsalelor oceanice (figura 2.4) şi este cunoscut sub denumirea de răspândire a fundului oceanic. Dorsalele oceanice se dezvoltă în regiunile unde materialul incandescent din manta se ridică, formând o structură extinsă, adesea caracterizată printr-o vale centrală de tip *rift* sau o fisură în care plăcile se separă şi se îndepărtează una de cealaltă. Multe dintre fisurile din zonele de rift subacvatic sunt umplute cu magmă provenită din adâncime. O nouă litosferă se dezvoltă pe măsură ce magma se solidifică, iar bazaltul rezultat este transportat lent, ca pe o bandă rulantă, dinspre creasta formată anterior.

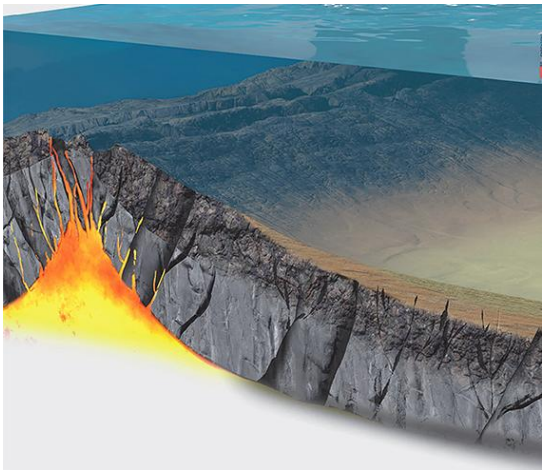


Figura 2.4. Dorsală oceanică

Plăcile tectonice se îndepărtează una de alta cu o rată care variază de la câţiva centimetri, la câteva zeci de centimetri pe an. Islanda se află pe o astfel de graniţă divergentă. Deşi dorsala Medio-Atlantică, este în principal o structură subacvatică, aceasta iese la suprafaţă în Islanda. O vale de rift, caracterizată prin activitate vulcanică frecventă, delimitează graniţa dintre placa Americii de Nord, pe care se află partea vestică a Islandei, şi placa eurasiatică, care include partea estică a ţării. Cele două plăci se îndepărtează una de cealaltă cu o viteză de aproximativ 19mm/an.

Limitele convergente se formează în regiunile în care două plăci tectonice se deplasează una spre cealaltă, determinând o ciocnire directă. În cazul convergenţei ocean–continent, placa oceanică – caracterizată printr-o densitate

mai mare - este subdusă sub marginea frontală a plăcii continentale, mult mai puţin densă. Acest tip de coliziune generează o compresie puternică, care conduce la ridicarea marginii continentale, la dezvoltarea sistemelor de falii şi la îngroşarea litosferei. Procesele de deformare rezultate favorizează formarea lanţurilor muntoase de tip andin, un exemplu clasic fiind Munţii Anzi din America de Sud.

Pe măsură ce placa oceanică pătrunde în manta, temperatura acesteia creşte gradual. La adâncimi de aproximativ 100-120 km, ea atinge temperaturi de peste 700°C, determinând eliberarea apei, dioxidului de carbon şi a altor fluide volatile. Aceste fluide urcă spre baza litosferei continentale, unde contribuie la reducerea punctului de topire al rocilor din manta şi din litosferă, favorizând generarea magmei. Magma astfel formată migrează lent către suprafaţă prin reţele de fracturi intralitosferice. O parte ajunge la suprafaţă, unde produce erupţii vulcanice repetate şi conduce la formarea unui lanţ de vulcani activi care marchează marginea internă a zonei de subducţie.

Convergenţa ocean–ocean se produce atunci când ambele plăci care intră în coliziune au natură oceanică. Una dintre plăci este subdusă sub cealaltă, generând o zonă de subducţie asociată cu un lanţ vulcanic în arc, cunoscut sub denumirea de arc insular. Un exemplu reprezentativ este sistemul de subducţie care separă plăcile Pacificului şi Filipinelor în vestul Oceanului Pacific. În aceste regiuni se dezvoltă fose oceanice - depresiuni submarine profunde, alungite şi înguste - care constituie trăsături geomorfologice distinctive ale zonelor de subducţie. Acestea pot depăşi mii de kilometri în lungime şi pot atinge adâncimi extreme, dintre care cea mai adâncă este Groapa Marianelor, situată la limita plăcii Filipinelor, cu o adâncime de aproximativ 11 km. Alte exemple relevante includ Groapa Aleutinelor, la sud de Alaska, şi Groapa Peru-Chile, la vest de America de Sud.

În cazul coliziunii dintre două plăci continentale, subducţia este extrem de dificilă, deoarece ambele plăci au densităţi similare. În asemenea situaţii, coliziunea se produce de-a lungul unei graniţe continent–continent caracterizate prin ridicări tectonice extinse, sisteme de falii, procese de încreţire şi îngroşarea considerabilă a litosferei. Această graniţă tectonică este cunoscută sub numele de zonă de sutură. Coliziunile continent–continent sunt responsabile pentru formarea unora dintre cele mai înalte lanţuri muntoase de pe Terra, inclusiv Himalaya. În ultimele aproximativ 13 milioane de ani, coliziunea subcontinentului indian cu masa continentală asiatică a determinat ridicarea Platoului Tibetan la altitudini de până la 5 km.

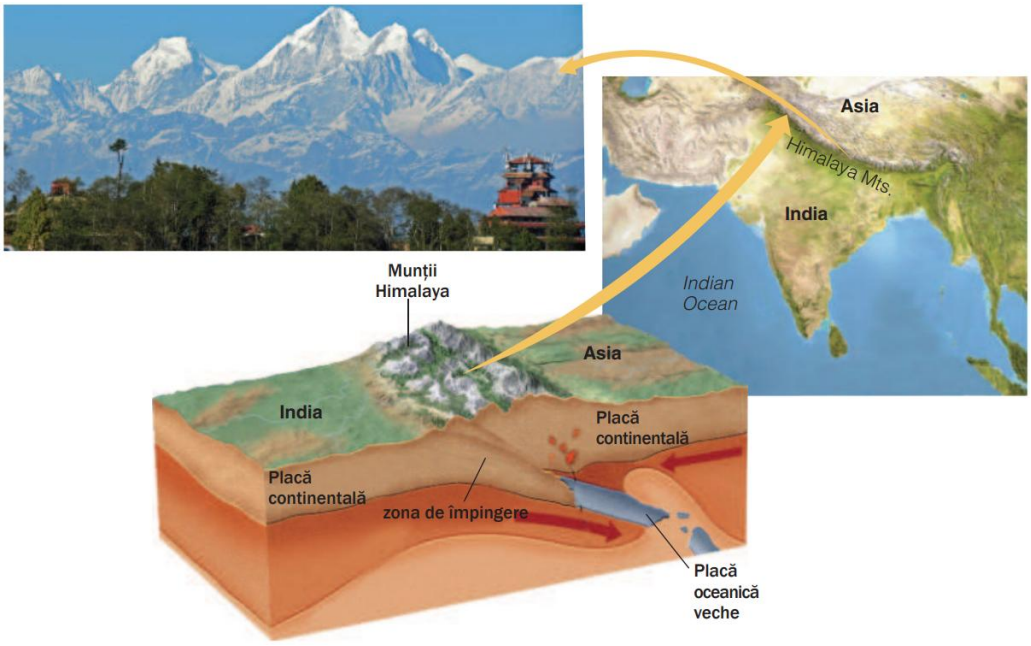


Figura 2.4. Himalaya cei mai înalţi munţi de pe Terra, au fost creaţi prin coliziunea dintre plăcile Indiană şi Eurasiatică. Coliziunea a două plăci continentale are loc în general după subducţia scoarţei oceanice (Hyndman & Hyndman, 2017).

Limitele transformante reprezintă zonele de contact dintre două plăci tectonice în care mişcarea dominantă este alunecarea orizontală a marginilor acestora una pe lângă cealaltă. Dacă examinezi Figura 2.2, vei observa că o zonă de expansiune nu este o singură dorsală continuă, ci mai degrabă o serie de creste dislocate între ele de-a lungul faliei de transformare.

Deşi faliile de transformare sunt cele mai frecvente pe fundul oceanului, unele apar şi în interiorul continentelor. O falie transformantă continentală bine cunoscută este falia San Andreas din California, unde placa Pacificului alunecă orizontal pe lângă placa Nord-Americană spre est. Alte falii transformante continentale notabile sunt falia Nord-Anatoliană din Turcia şi falia Alpine din Noua Zeelandă. În unele locuri de pe Pământ, trei plăci se învecinează una cu cealaltă. Aceste locuri sunt cunoscute sub numele de *joncţiuni triple*. Două exemple sunt:

- punctul de întâlnire al plăcilor Juan de Fuca, nord-americană şi Pacifică în colţul de nord-vest al insulei Vancouver şi
- joncţiunea zonelor de expansiune asociate cu plăcile Pacific, Cocos şi Nazca la vest de America de Sud.

În general, porţiunile centrale ale plăcilor se mişcă într-un ritm lent constant, dar plăcile interacţionează la limitele lor, unde au loc coliziuni sau / şi subducţii sau ambele, iar mişcarea poate să nu fie lină sau constantă.

Regiunile cu cea mai mare activitate tectonică sunt cunoscute sub numele de centuri seismovulcanice, dintre care cea mai extinsă este Cercul de Foc al Pacificului, unde se înregistrează peste 80% din cutremurele şi vulcanii activi ai planetei.

Impact asupra mediului şi societăţii.

Mişcările tectonice exercită un impact profund asupra mediului şi societăţii, manifestând efecte atât constructive, cât şi distructive.

Efectele asupra mediului sunt multiple şi se exprimă prin:

- formarea lanţurilor muntoase, a bazinelor oceanice şi a arcurilor vulcanice;
- remodelarea permanentă a reliefului şi redistribuirea maselor terestre;
- declanşarea proceselor geodinamice secundare, precum alunecări de teren, tsunami sau erupţii vulcanice;
- modificarea reţelelor hidrografice şi influenţarea dinamicii ecosistemelor.

Efectele asupra societăţii includ consecinţe semnificative precum:

- pierderi de vieţi omeneşti şi distrugeri materiale generate de cutremure, tsunami sau erupţii vulcanice;
- afectarea infrastructurii esenţiale (transport, energie, comunicaţii, utilităţi);
- deplasarea populaţiei şi amplificarea vulnerabilităţii socio-economice;
- producerea unor efecte în lanţ, precum incendii, scurgeri de substanţe toxice sau întreruperi ale alimentării cu energie.

Aceste efecte sunt rezultatul direct al interacţiunilor dintre plăcile tectonice. În funcţie de modul în care acestea se deplasează – divergenţă, convergenţă sau alunecare laterală – iau naştere structuri şi fenomene geologice distincte, sintetizate în tabelul 2.1.

În analiza proceselor şi fenomenelor naturale de risc, o înţelegere integrată a mecanismelor, cauzelor şi consecinţelor este esenţială pentru evaluarea adecvată a vulnerabilităţii şi identificarea măsurilor eficiente de reducere a riscurilor. Un cadru analitic util îl constituie cele cinci concepte fundamentale ale ştiinţei hazardurilor, prin care pot fi explicate relaţiile dintre procesele naturale, activităţile umane şi strategiile de adaptare.

Tabel 2.1. Tipuri de limite ale plăcilor tectonice, mişcări, rezultate şi exemple

Tipul de limită a plăcilor tectonice	Plăci implicate	Dinamica	Rezultat	Exemple	Hazarduri naturale
Divergentă	De obicei, plăci oceanice	Extindere. Cele două plăci se îndepărtează una de alta, iar roca topită, urcă pentru a umple golul lăsat de plăci	Se formează dorsalele medio-oceanice şi se creează o nouă litosferă oceanică care se adaugă la fiecare dintre cele două plăci	Dorsala Medio-Atlantică; Dorsala Juan de Fuca; Dorsala Central-Indiană; Pacific-Antarctică	Erupţii vulcanice non-explozive şi cutremure slabe sau moderate
Convergentă (subducţie)	Ocean - Continent	Placa oceanică se scufundă sub placa continentală	Se formează un arc vulcanic pe continent şi o fosă oceanică adâncă la contactul dintre cele două plăci. Se produc erupţii vulcanice şi cutremure	Munţii Anzi - la limita dintre placa Sud Americană şi Nazca (fig. 2.2.)	Cutremure puternice; Erupţii vulcanice explozive, Tsunami, Inundaţii, Alunecări de teren
Convergentă (subducţie)	Ocean - Ocean	Placa oceanică mai veche şi cu densitatea mai mare se scufundă sub o placă oceanică mai tânără şi mai puţin densă	Se formează arcuri vulcanice insulare şi fose oceanice adânci. Se produc erupţii vulcanice şi cutremure	Insulele Caraibe - la limita dintre placa Caraibelor şi placa Sud-Americană (fig. 2.2.)	Cutremure puternice; Erupţii vulcanice explozive, Tsunami, Inundaţii, Alunecări de teren
Convergentă (subducţie)	Continent - Continent	Niciuna dintre plăci nu este suficient de densă ca să se poată scufunda în astenosferă într-un proces de subducţie. Rezultă mişcări de compresie şi de încreţire a scoarţei continentale	Se formează lanţuri muntoase de mari dimensiuni. Sunt frecvente cutremurele	Munţii Himalaya – la contactul dintre placa Indo-Australiană şi cea Eurasiatică (fig. 2.5.)	Cutremure majore, inundaţii; alunecări de teren
Transformantă	Ocean – Ocean sau Continent - Continent	Plăcile lunecă una pe lângă cealaltă	Cutremurele sunt frecvente şi pot provoca unele modificări topografice.	Falia San Andreas – la limita dintre placa Nord-Americană şi cea Pacifică	Cutremure puternice şi foarte puternice

Exemplul interacţiunii dintre oraşele San Francisco şi Los Angeles, situate la contactul dintre plăcile Pacificului şi Americii de Nord, oferă un cadru ilustrativ pentru aplicarea celor cinci concepte fundamentale în analiza hazardurilor generate de tectonica plăcilor.

1. Știința ne ajută să anticipăm hazardurile. Investigațiile științifice realizate după cutremurul din San Francisco (1906) au reprezentat un moment esențial în înțelegerea comportamentului faliei San Andreas și, implicit, a hazardului seismic specific Californiei. În mod similar, formularea teoriei tectonicii plăcilor în anii 1960 a oferit un cadru conceptual verificabil care explică distribuția globală a cutremurelor, erupțiilor vulcanice, zonelor de subducție, lanțurilor muntoase și altor procese geodinamice. Prin această teorie, cercetătorii pot anticipa unde este probabil să se producă hazarduri geologice majore, stabilind regiuni cu potențial ridicat de risc și identificând tipurile de fenomene ce pot apărea în aceste zone.

2. Cunoașterea riscurilor ajută la luarea deciziilor. Deși structura internă a Pământului și mecanismele tectonice nu constituie, în sine, hazarduri naturale, ele generează majoritatea proceselor geofizice distructive. O înțelegere solidă a acestor procese permite formularea unor strategii informate pentru reducerea expunerii și vulnerabilității. Când decidenții cunosc localizarea faliilor active, frecvența cutremurelor sau posibilitatea existenței unor vulcani activi, pot adopta politici adecvate privind utilizarea terenurilor, amplasarea infrastructurilor critice, aplicarea codurilor de construcție și dezvoltarea sistemelor de avertizare timpurie.

3. Între hazardurile naturale există interconexiuni. Mișcarea plăcilor tectonice produce direct cutremure și activitate vulcanică, iar aceste fenomene pot declanșa, la rândul lor, tsunami-uri, alunecări de teren sau instabilitate versanților. Într-o perspectivă mai largă, tectonica plăcilor a modelat marile structuri ale reliefului – lanțuri muntoase, bazine oceanice, platouri înălțate – influențând indirect circulația atmosferică, regimul precipitațiilor, intensitatea fenomenelor meteorologice, distribuția ecosistemelor și chiar dinamica climatică pe termen geologic. Prin urmare, hazardurile tectonice se integrează într-o rețea complexă de procese fizice interdependente.

4. Oamenii pot transforma evenimentele periculoase în catastrofe. În 1906, zona urbană cumulată San Francisco - Los Angeles adăpostea mai puțin de un milion de locuitori. În prezent, peste 17 milioane de oameni trăiesc în aceste două metropole situate chiar la contactul dintre plăcile Pacificului și Americii de Nord, într-unul dintre cele mai active sisteme tectonice ale lumii. Această creștere demografică explozivă, alături de dezvoltarea urbană pe terenuri vulnerabile, înmulțește dramatic consecințele potențiale ale unui viitor cutremur major. Astfel, factorii antropici – densitatea populației, calitatea

construcţiilor, modul de utilizare a terenurilor - pot transforma un hazard natural într-o catastrofă de mari proporţii.

5. Consecinţele hazardurilor pot fi diminuate. Experienţa Californiei demonstrează că aplicarea riguroasă a normelor de construcţie antiseismică şi investiţiile continue în educaţie, planificare şi monitorizare reduc substanţial pierderile asociate cutremurelor. În acelaşi mod, şi alte fenomene generate de tectonica plăcilor - erupţii vulcanice, alunecări de teren, tsunami-uri - pot avea impacturi diminuate prin aplicarea măsurilor preventive adecvate, precum delimitarea zonelor de risc, dezvoltarea sistemelor de avertizare, consolidarea infrastructurilor critice şi instruirea comunităţilor. În capitolele următoare sunt analizate în detaliu exemple şi strategii care ilustrează modul în care cunoaşterea ştiinţifică şi managementul riscului pot reduce vulnerabilitatea societăţilor la procesele geofizice extreme.

Prevenirea şi reducerea riscurilor geofizice

Măsuri structurale*. Reducerea riscurilor geofizice generate de procesele tectonice presupune implementarea unor măsuri structurale care să consolideze rezistenţa sistemelor fizice la impactul hazardurilor majore. Printre acestea se numără:

- proiectarea şi construirea clădirilor conform normelor antiseismice actualizate;
- consolidarea infrastructurilor vulnerabile, precum şcoli, spitale, poduri, baraje şi alte structuri critice;
- instalarea unor reţele moderne seismice şi geofizice pentru detectarea şi monitorizarea mişcărilor tectonice;
- menajarea zonelor tampon, delimitarea faliilor active şi reglementarea strictă a construcţiilor în proximitatea lor;
- dezvoltarea şi operaţionalizarea centrelor de monitorizare geodinamică şi avertizare timpurie.

Măsuri non-structurale†. Acţiunile non-structurale joacă un rol crucial în reducerea vulnerabilităţii şi îmbunătăţirea capacităţii de răspuns la hazardurile tectonice:

---

* acţiuni fizice, tehnice sau inginereşti care urmăresc protejarea populaţiei, a infrastructurii şi a bunurilor materiale împotriva efectelor unui hazard. Ele implică construcţii sau amenajări menite să reducă expunerea sau vulnerabilitatea

† măsuri organizatorice, legislative, educative sau economice care nu implică construcţii, dar care reduc riscurile prin planificare, informare şi pregătire. Ele sporesc capacitatea de adaptare şi reacţie a comunităţilor

- elaborarea, actualizarea și diseminarea hărților de hazard tectonic, seismic și seismovulcanic;
- implementarea planurilor naționale și regionale de gestionare a dezastrelor, în conformitate cu directivele europene și internaționale;
- utilizarea datelor satelitare (Sentinel, Copernicus, InSAR) pentru monitorizarea deformărilor crustale și detectarea anomaliilor precursoare;
- dezvoltarea cooperării transfrontaliere în cadrul programelor europene și ONU privind reducerea riscurilor de dezastre.

Educație și conștientizare publică. Diminuarea efectelor evenimentelor geofizice depinde în mod esențial de nivelul de pregătire al populației:

- promovarea unei culturi a siguranței seismice și geofizice prin educație formală, non-formală și informală;
- organizarea periodică de simulări și exerciții de pregătire în școli, instituții și comunități;
- diseminarea materialelor educative privind comportamentul adecvat în timpul cutremurelor, erupțiilor vulcanice sau tsunami-urilor;
- stimularea turismului științific și dezvoltarea geoparcurilor educative ca modalități de popularizare a geologiei.

Măsuri instituționale și politice. Un cadru instituțional solid este indispensabil pentru o gestionare eficientă a riscurilor:

- implementarea Strategiei Naționale pentru Reducerea Riscurilor de Dezastre 2023–2030;
- consolidarea colaborării dintre Serviciul Hidrometeorologic de Stat, Institutul de Geologie și Seismologie, IGSU;
- integrarea riscurilor geofizice în documentele de planificare urbanistică și strategiile de dezvoltare durabilă;
- susținerea cercetării aplicate în domeniul geodinamicii, teledetecției și rezilienței teritoriale.

Rolul tectonicii plăcilor în generarea hazardurilor. Teoria plăcilor tectonice constituie unul dintre conceptele unificatoare ale științelor geologice, comparabil ca impact explicativ cu rolul „originii speciilor” în biologie. Deși mecanismul complet al tectonicii plăcilor este încă sub investigare, cercetările actuale indică faptul că procesele de convecție din mantaua terestră - ascensiunea rocilor încălzite și scufundarea celor răcite - sunt responsabile pentru mișcarea plăcilor litosferice. În centrele de expansiune, magma ascendentă generează crustă nouă, care se îndepărtează treptat, se răcește și se scufundă ulterior în zonele de subducție.

Acest ciclu tectonic este fundamental pentru generarea hazardurilor naturale. Majoritatea cutremurelor, erupţiilor vulcanice şi a tsunami-urilor se produc în proximitatea limitelor de placă, iar alunecările de teren sunt frecvente în regiunile montane rezultate din coliziunea continentală. De asemenea, distribuţia resurselor minerale, a zăcămintelor de petrol şi gaze este strâns legată de istoria tectonică a planetei.

Gestionarea riscurilor geofizice asociate proceselor tectonice necesită un efort coordonat, multidimensional, care să combine:

- monitorizarea geofizică continuă şi schimbul rapid de date între instituţii,
- planificarea teritorială bazată pe hărţi de hazard actualizate,
- educaţia preventivă la toate nivelurile societăţii,
- dezvoltarea unei culturi a rezilienţei şi responsabilităţii colective.

Prin integrarea cunoştinţelor ştiinţifice actuale, utilizarea tehnologiilor moderne de observare (in situ şi satelitare) şi aplicarea unor politici eficiente de prevenire, este posibilă reducerea semnificativă a vulnerabilităţii populaţiei şi infrastructurilor în faţa riscurilor tectonice.

Autoevaluare

1. Descrie diferenţele dintre scoarţa terestră, litosferă, astenosferă şi mantaua.
2. Denumeşte cele trei tipuri majore de limite ale plăcilor tectonice.
3. De ce litosfera oceanică se scufundă aproape întotdeauna sub litosfera continentală în zonele convergente?
4. Ce tipuri de limite ale plăcilor litosferice sunt asociate cu cea mai mare frecvenţă a apariţiei vulcanilor mari? Oferiţi un exemplu.
5. Descrie modul în care teoria plăcilor tectonice explică distribuţia cutremurelor şi vulcanilor pe Pământ.
6. Comunitatea ştiinţifică a respins iniţial ipoteza lui Wegener despre deriva continentală şi a rămas sceptică timp de decenii. Scepticismul ajută sau împiedică progresul ştiinţific?

Bibliografie recomandată

- Bobrowsky, P., 2013. *Encyclopedia of natural hazards.* New York: Springer.
- Hyndman, D. & Hyndman, D., 2017. *Natural Hazards and Disasters, Fifth Edition*. Boston, USA: Cengage Learning.
- Keller, E. & DeVecchio, D., 2016. *Natural hazards : earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes*. Fourth Edition. University of California, Santa Barbara: Routledge.
- Sorocovschi, V., 2008. *Gestiunea riscurilor şi catastrofelor. Un punct de vedere*. Riscuri şi Catastrofe, VII(5), pp. 32-42.



Erupția vulcanului Fagradalsfjal. Peninsula Reykjanes, Islanda

Sursa: https://www.mountainguides.is

VULCANISMUL ŞI ERUPŢIILE VULCANICE

Rezultatele învăţării:
la finalul acestei unităţi de învăţare, studenţii vor fi capabili să

- explice mecanismele de formare a magmei şi modul în care compoziţia, vâscozitatea şi conţinutul de gaze influenţează stilul eruptiv;
- distingă principalele tipuri de erupţii vulcanice (hawaiiene, stromboliene, vulcaniene, peléene, pliniene etc.) şi să analizeze caracteristicile lor dinamice;
- identifice şi explice principalele hazarduri directe şi indirecte asociate erupţiilor (curgeri piroclastice, lahar-uri, tsunami vulcanice, cutremure asociate);
- compare efectele directe şi indirecte ale vulcanismului asupra societăţii şi mediului natural, inclusiv impactul climatic;
- analizeze modul în care educaţia, legislaţia şi colaborarea internaţională contribuie la reducerea riscurilor vulcanice;
- coreleze procesele vulcanice cu dinamica tectonică globală şi cu celelalte tipuri de hazarduri naturale.

Termeni cheie: vulcanism, erupţii explozive şi efuzive, hazarduri vulcanice, lahar-uri, curenţi piroclastici

Se estimează că, în prezent, aproximativ 800 de milioane de oameni (distribuiţi în 86 de ţări), trăiesc în zone situate la mai puţin de 100 km de un vulcan activ. Din cei aproximativ 1500 de vulcani activi de pe Pământ, aproape 400 au erupt în ultimul secol. Activitatea vulcanică, sau vulcanismul, este direct legată de tectonica plăcilor şi cei mai activi vulcani sunt situaţi în apropierea limitelor plăcilor.

Numărul mare de locuitori din preajma vulcanilor poate fi explicat şi prin beneficiile oferite de către aceştia şi anume: erupţiile fertilizează solurile în permanenţă; topografia ridicată oferă condiţii prielnice lucrărilor de infrastructură; resursele de apă sunt, în mod obişnuit, abundente; existenţa unor surse de energie ieftine – energia geotermală.

La 8:32 a.m., Dr. David Johnston, de pe un vârf aflat vis-à-vis de St. Helens, a transmis prin radio Observatorului Vulcanic Cascades din Vancouver, Washington: "Vancouver, Vancouver - asta este!" Cu o seară înainte, el a acceptat fără tragere de inimă să înlocuiască pe altcineva la acel post...

Riscurile de origine geologică reprezintă o categorie majoră de procese periculoase, generate de modificări profunde în structura internă și dinamica scoarței terestre. Printre acestea se numără cutremurele, erupțiile vulcanice terestre sau submarine și tsunami-urile, produse fie de seisme, fie de activitatea eruptivă. Aceste fenomene sunt caracterizate de eliberarea bruscă sau progresivă a unor cantități foarte mari de energie, ceea ce determină un impact direct, adesea sever, asupra populației, infrastructurii și mediului înconjurător.

Riscurile geologice primare pot declanșa, la rândul lor, o serie de procese secundare, care amplifică efectele inițiale. Printre acestea se numără:

- alunecările de teren, căderile de blocuri și avalanșele,
- emisiile masive de particule și gaze în atmosferă,
- perturbări semnificative ale ecosistemelor, cu efecte asupra faunei și florei,
- modificări ale rețelei hidrografice, ale nivelului pânzei freatice,
- precum și poluarea aerului, a apei și a solului.

Vulcanii sunt localizați în acele zone unde magma generată în interiorul Pământului reușește să ajungă la suprafață. Formele de relief vulcanic sunt variate și reflectă particularitățile proceselor eruptive. O singură cupolă, un con de zgură sau un con de tuf pot constitui un vulcan în sine, însă astfel de edificii sunt cunoscuți ca vulcani monogenetici, deoarece se formează în urma unei singure erupții.

Aceștia pot apărea:

- pe flancurile ori în proximitatea unor vulcani mari și activi,
- pe vârfurile edificiilor vulcanice complexe, sau
- în cadrul unor câmpuri vulcanice extinse, rezultate din numeroase episoade eruptive desfășurate de-a lungul unui interval mare de timp.

În opoziție, vulcanii mari, cu durată lungă de evoluție și numeroase episoade eruptive succesive, sunt cunoscuți ca vulcani poligenetici.

Definiții și mecanism de formare

Vulcanismul reprezintă totalitatea proceselor prin care magma, gazele și materialele piroclastice sunt generate în interiorul Pământului, transportate prin crusta terestră și emise la suprafață prin fisuri, crăpături sau orificii vulcanice. Acest fenomen este strâns legat de energia internă a Terrei și de mișcarea plăcilor tectonice, care controlează zonele de ascensiune a magmei și localizarea edificiilor vulcanice.

Magma este un amestec complex de minerale silicatice topite și gaze dizolvate, în special vapori de apă, dioxid de carbon și dioxid de sulf.

Proprietăţile sale fizico-chimice - compoziţia, vâscozitatea şi conţinutul de gaze - determină tipul, intensitatea şi stilul erupţiilor.

Vulcanii pot apărea în orice zonă în care magma reuşeşte să străbată litosfera şi să ajungă la suprafaţă. Unele edificii, precum conurile de zgură, cupolele de lavă sau conurile de tuf, se formează în urma unei singure erupţii şi sunt denumiţi vulcani monogenetici. Ei pot apărea izolat sau pe flancurile unor vulcani mari, de lungă durată („vulcani poligenetici"), sau pot face parte din câmpuri vulcanice extinse, marcate de activitate eruptivă repetată..

Proprietăţile magmei

Compoziţia. Magma conţine în principal oxigen (O), siliciu (Si), aluminiu (Al), fier (Fe), magneziu (Mg), calciu (Ca), sodiu (Na) şi potasiu (K). Cele mai abundente elemente sunt siliciul şi oxigenul, care formează silicea (SiO_2) - componentul definitoriu în clasificarea rocilor vulcanice (figura 3.1).

- Bazaltul (45-52% SiO_2) este cea mai comună rocă vulcanică.
- Andezitul (52-63% SiO_2) are un conţinut intermediar de silice şi proprietăţi diferite de curgere şi eruptivitate.

Rocile bogate în silice (ex. riolit) sunt asociate cu erupţii extrem de violente. Compoziţia chimică influenţează comportamentul magmei în subteran şi la suprafaţă, în special prin efectul asupra vâscozităţii.

Unul dintre cele mai importante aspecte ale magmei este *vâscozitatea*, adică gradul ei de „rezistenţă la curgere". De la acest comportament aparent simplu depind forma vulcanilor, stilul erupţiilor şi chiar distanţa pe care lava o poate parcurge la suprafaţă.

O magmă bogată în silice este groasă, greoaie, curge lent şi „închide" în interior gazele dizolvate. Acest amestec tensionat poate deveni extrem de periculos: presiunea gazelor captive creşte, iar erupţiile tind să fie violente, fragmentând magma şi proiectând în aer cenuşă, blocuri şi nori fierbinţi.

În schimb, magmele sărace în silice, cum sunt cele bazaltice, sunt fluide, aproape ca un ulei încins. Ele curg uşor, se revarsă pe distanţe mari şi dau naştere unor erupţii efuzive, în care lava se scurge în valuri continue, rareori explozive. Pe măsură ce această lavă se îndepărtează de crăpătura de erupţie şi se răceşte, vâscozitatea ei creşte, iar fluxul devine tot mai lent, schimbându-şi treptat forma.

Această diferenţă fundamentală în „temperamentul" magmelor modelează peisajele vulcanice:

- lava foarte vâscoasă construieşte cupole abrupte, aproape lipite de orificiul eruptiv, în timp ce

• cea fluidă poate forma câmpuri de lavă care se întind pe zeci de kilometri, sculptând peisaje întregi într-o singură erupție.

Gazele din magmă și violența erupțiilor. Dacă vâscozitatea dictează modul în care curge lava, conținutul de gaze determină modul în care ea erupe.

Pentru a înțelege acest mecanism, imaginează-ți o sticlă de șampanie care a fost agitată. Când o deschizi, presiunea scade brusc, iar gazele dizolvate se transformă instantaneu în bule care expandează violent, aruncând lichidul în afară. Exact același principiu stă la baza celor mai dramatice erupții vulcanice.

Pe măsură ce magma încărcată cu gaze urcă spre suprafață, presiunea scade. Gazele, care înainte erau „captive" în magma topită, încep să se separe, formând bule ce cresc rapid în volum. Această expansiune brutală poate rupe magma în fragmente fine, transformând-o într-o suspensie de cenușă și gaze, care este expulzată violent în atmosferă.

Astfel iau naștere erupțiile explozive - uneori pliniene sau subpliniene - care trimit coloane înalte de cenușă în aer, formează nori piroclastici și pot rescrie peisajul în doar câteva minute.

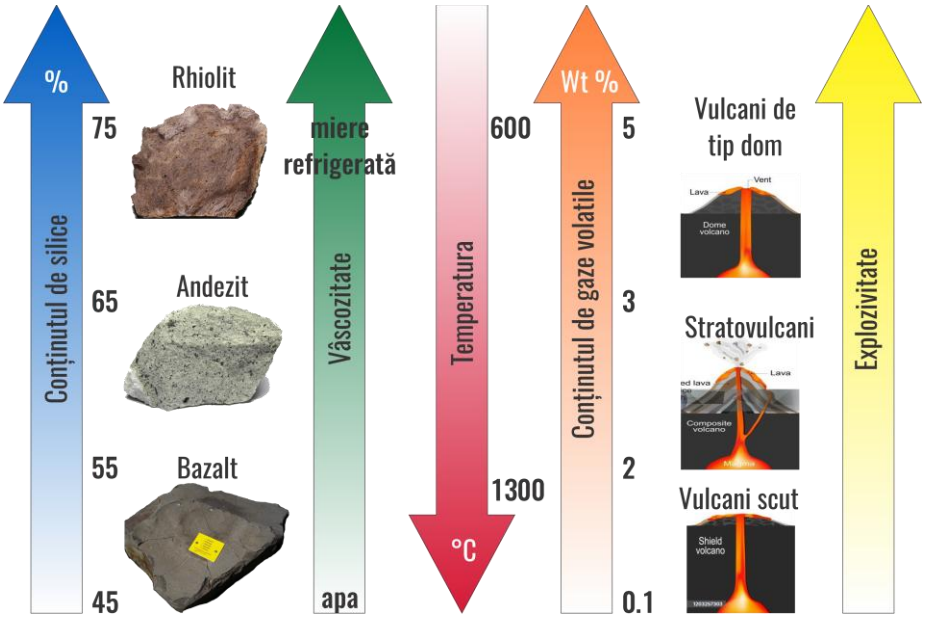


Figura 3.1. Caracteristicile vulcanului. Conținutul de silice și vâscozitatea magmei sunt legate între ele. Conținutul de silice al magmei definește, de asemenea, tipul de rocă vulcanică rezultată, precum și forma și tipul vulcanului asociat. Magmele cu conținut ridicat de silice au, în general, un conținut mai mare de substanțe volatile decât magmele cu conținut scăzut de silice și generează erupții explozive atunci când ajung la suprafață

Pe măsură ce crește conținutul de silice din magmă, crește și cantitatea de gaze pe care aceasta le poate „ascunde" în interiorul ei. Magmele andezitice și riolitice, mai bogate în silice, transportă cantități semnificative de substanțe

volatile - în special vapori de apă şi dioxid de carbon - uneori ajungând la 2-5% din greutate. În comparaţie, magmele bazaltice conţin de obicei mai puţin de 1% gaze dizolvate.

Această diferenţă aparent modestă are consecinţe majore asupra modului în care vulcanii erup. Magmele mai acide şi mai vâscoase sunt asemenea unor recipiente sub presiune: reţin gaze, le permit să se acumuleze, iar atunci când presiunea se eliberează brusc, erupţia poate deveni violentă, explozivă, devastatoare.

În astfel de situaţii, formarea rapidă a bulelor de gaz fragmentează magma în particule de toate dimensiunile - de la praf fin, până la bolovani de zeci de centimetri. Întreg acest amestec fragmentar este cunoscut sub numele de *tephra*, iar atunci când se acumulează în straturi, formează depozite piroclastice, care, în timp, se pot cimenta devenind *roci piroclastice*. *Lapili*, particulele de mărimea pietrişului (2-65 mm), sunt doar una dintre formele pe care le poate lua acest material pulverizat.

Erupţiile pot dura câteva ore sau se pot prelungi zile, ani sau chiar mai mult. Unii vulcani, precum Stromboli din Italia, pot repeta mici explozii regulate vreme de mii de ani, într-un „ritm" eruptiv aproape constant. Conform criteriilor moderne, o pauză mai mare de trei luni marchează sfârşitul unei erupţii (Singh & Bartlett, 2018).

Procesele interne ale Pământului se manifestă în două moduri distincte. O parte dintre ele evoluează încet, aproape imperceptibil, remodelând planeta de-a lungul milioanelor de ani - acestea sunt *procesele diastrofice*, precum mişcările tectonice. Alte procese sunt rapide, bruşte şi spectaculoase, precum erupţiile vulcanice şi cutremurele, care pot provoca deplasări majore de materie în doar câteva secunde.

Aceste procese rapide constituie fenomene de risc major, tocmai prin impactul lor direct asupra vieţii şi activităţilor umane. Fiind legate de structura internă a Pământului, ele sunt încadrate în categoria fenomenelor geologice generatoare de hazard şi risc.

Analiza ritmului de sedimentare la scară geologică oferă o perspectivă interesantă asupra activităţii planetei: înainte de Mezozoic se depuneau aproximativ 100 m de sedimente pe milion de ani; în Mezozoic, 200 m; iar în Cenozoic, aproape 300 m. Creşterea acestei rate, coroborată cu observaţiile geofizicienilor privind intensificarea activităţii seismice şi vulcanice, dar şi cu expansiunea demografică şi urbană, sugerează un viitor în care expunerea la

riscuri geologice va continua să crească, dacă nu sunt adoptate măsuri adecvate de protecţie şi planificare.

Vulcanii funcţionează asemenea unor „guri de aerisire" ale planetei, locuri în care roca topită şi gazele din adâncime reuşesc să iasă la suprafaţă. Erupţiile pot transforma dramatic peisajul: uneori sunt violente, cu explozii care aruncă blocuri de rocă şi nori de cenuşă pe distanţe mari; alteori sunt liniştite, lăsând lava să curgă lent şi continuu, asemenea unui râu incandescent.

Indiferent de forma lor, erupţiile vulcanice reprezintă evenimente cu impact major. Pot acoperi regiuni întregi cu cenuşă, pot declanşa alunecări de teren, pot contamina apa şi aerul sau pot modifica traiectele râurilor. Compoziţia fluxurilor eruptive poate varia mult, în funcţie de structura internă a vulcanului şi de sursa magmei.

Chiar şi în forma lor „blândă", erupţiile liniştite pot construi în timp peisaje vulcanice impresionante, dând naştere câmpiilor de lavă, ţărmurilor noi şi chiar insulelor proaspăt formate.

Distribuţie spaţială şi tipuri de vulcani

Vulcanii nu sunt distribuiţi întâmplător pe suprafaţa Pământului. Prezenţa lor reflectă fidel dinamica internă a planetei şi locul în care energia, magma şi tensiunile tectonice găsesc căi de eliberare spre suprafaţă. Cele mai multe edificii vulcanice apar acolo unde scoarţa terestră se fragmentează, se îndepărtează sau se ciocneşte - adică la marginile plăcilor litosferice - sau în zone izolate în care jeturi de magmă fierbinte străbat mantaua, cunoscute sub numele de puncte fierbinţi (hot spots) (figura 3.2)

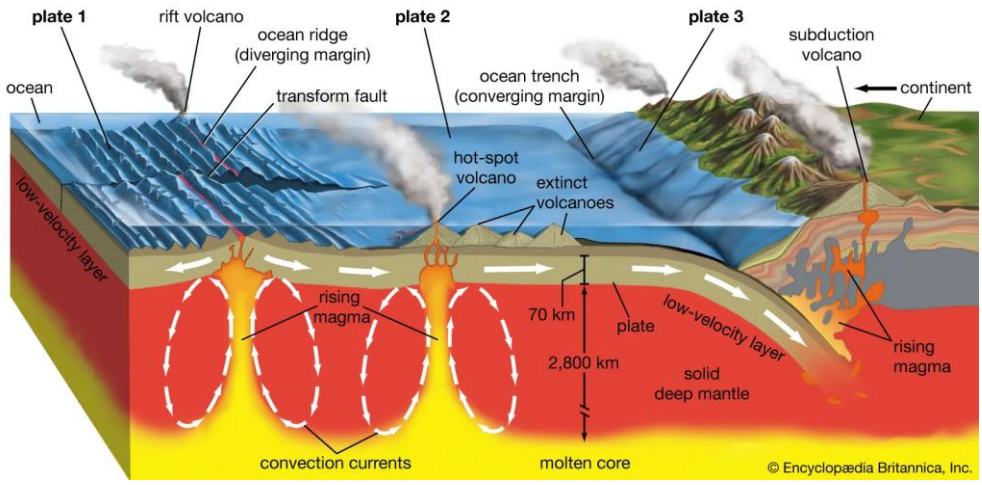


Figura 3.2. Principalele zone de manifestare a vulcanismului (https://cdn.britannica.com/53/4953-050-E6291658/subduction-zones-Stratovolcanoes-Earth-plate-margins-activity.jpg)

Astfel, activitatea vulcanică globală se organizează în câteva mari centuri tectonice active:

- *cercul de Foc al Pacificului*, cea mai impresionantă zonă vulcanică de pe Pământ, adună peste 60% din vulcanii activi ai lumii (figura 3.3). De-a lungul marginilor convergente ale Oceanului Pacific, arcuri insulare şi munţi vulcanici se succed în lanţuri continue, marcând unele dintre cele mai violente erupţii şi dintre cele mai puternice cutremure înregistrate.
- *lanţul Alpino-Himalayan*, o vastă zonă tectonică ce se întinde de la Atlanticul de Est până în Asia de Sud, include şi vulcanii celebri ai bazinului mediteranean - Etna, Vezuviu, Santorini - creaţi prin subducţia plăcii africane sub marginea sudică a Europei.
- *dorsalele medio-oceanice*, imense creste submarine din Oceanele Atlantic, Pacific şi Indian, unde Pământul „se deschide" continuu. Aici, magmele bazaltice sunt împinse spre suprafaţă de curenţii de convecţie din manta, generând un vulcanism liniştit, dar extrem de extins în spaţiu.

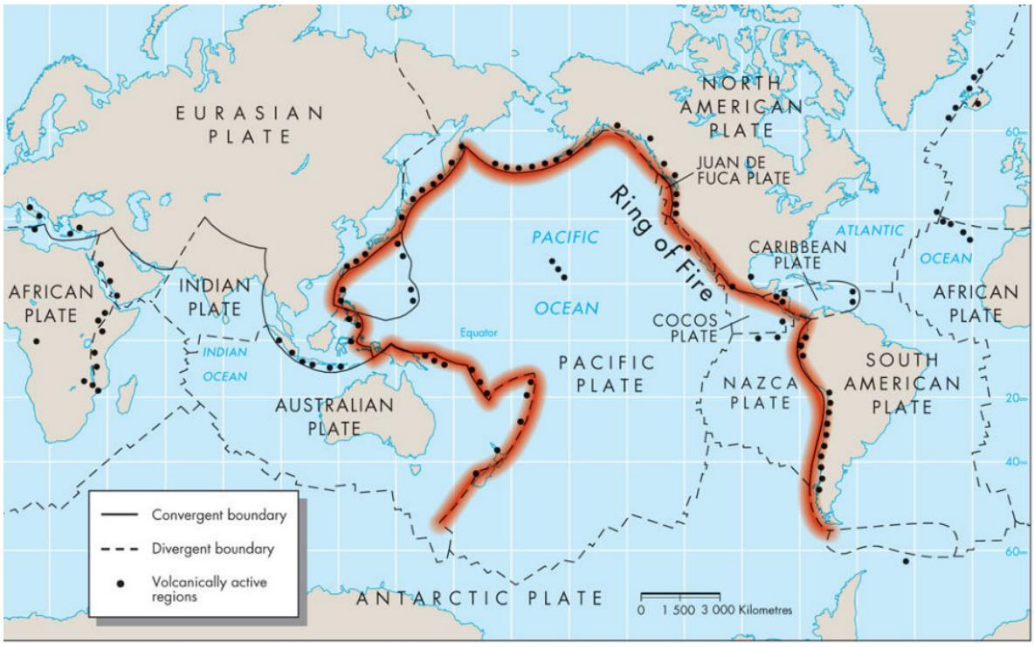


Figura 3.3. Cercul de foc al Pacificului - o centură de vulcani activi şi cutremure frecvente care mărgineşte placa Pacificului. Cercul de Foc include majoritatea vulcanilor activi de pe uscat (Keller & DeVecchio, 2016)

Dintre toate aceste contexte geodinamice, zonele de subducţie sunt cele mai active. Aproximativ 350 de vulcani activi (circa 62% la scară globală) sunt asociaţi acestor margini convergente, iar două treimi dintre ei aparţin Cercului de Foc al Pacificului. Aici, erupţiile sunt adesea violente, caracterizate prin

expulzarea de lave andezitice şi dacitice, nori de cenuşă, gaze fierbinţi şi piroclastite. Activitatea vulcanică intensă este strâns legată de o seismicitate ridicată, specifică acestor regiuni.

În contrast, *vulcanismul de hot-spot* reprezintă un fenomen aparte. În adâncurile mantalei se pot forma coloane de materie topită - *mantle plumes* - care se ridică lent spre astenosferă, perforând apoi placa litosferică de deasupra. Astfel iau naştere lanţuri vulcanice izolate, precum arhipelagul Hawaii, unde vulcanii nu sunt controlaţi de mişcarea plăcilor, ci de „respiraţia" internă a mantalei.

Distribuţia globală a vulcanilor reflectă, aşadar, o hartă a proceselor profunde care modelează planeta. De la fosele oceanice până la lanţurile muntoase active, de la dorsalele submarine la insulele vulcanice izolate, vulcanismul marchează locurile în care Pământul este cel mai viu, cel mai activ şi, uneori, cel mai periculos.

Tipuri de vulcani şi particularităţile lor eruptive. Vulcanii Pământului apar într-o gamă variată de forme, dimensiuni şi comportamente eruptive. Această diversitate reflectă, în esenţă, proprietăţile magmei care îi alimentează - compoziţia chimică, temperatura şi vâscozitatea - factori ce modelează modul în care vulcanul creşte, cum erupţiile se desfăşoară şi ce tip de relief rezultă.

Unii dintre cei mai mari vulcani de pe Terra sunt *vulcanii scut*, impunători prin lăţimea lor şi prin pantele extrem de line. În secţiune transversală seamănă cu un scut aşezat pe sol - o structură vastă, rotunjită, fără pante abrupte. Exemple impresionante se găsesc în Hawaii, Islanda sau în unele regiuni ale Oceanului Indian (figura 3.4).

Aceşti vulcani iau naştere din erupţii lente, neexplozive, alimentate de magme bazaltice extrem de fluide, provenite direct din manta. Fluiditatea lavei face ca aceasta să curgă pe distanţe foarte mari, extinzând treptat profilul vulcanului.

Deşi par „domoli", vulcanii scut sunt, în realitate, printre cei mai înalţi munţi de pe Pământ, dacă le este măsurată înălţimea de la bază - care, adesea, se află pe fundul oceanului.

Când cineva îşi imaginează forma „tipică" a unui vulcan, aproape sigur vizualizează un *stratovulcan*: un munte înalt, cu pante abrupte, care domină peisajul. Aceşti vulcani se ridică lent, strat după strat, deoarece fiecare erupţie depune alternativ lave vâscoase, cenuşă şi materiale piroclastice, construind în timp o structură conică impunătoare (figura 3.5).

Stratovulcanii sunt prezenţi mai ales în zonele de subducţie, de-a lungul marilor arcuri vulcanice ale planetei, inclusiv celebrul Cerc de Foc al Pacificului. Există peste 700 de stratovulcani cunoscuţi - mai mulţi decât toate celelalte tipuri vulcanice la un loc.

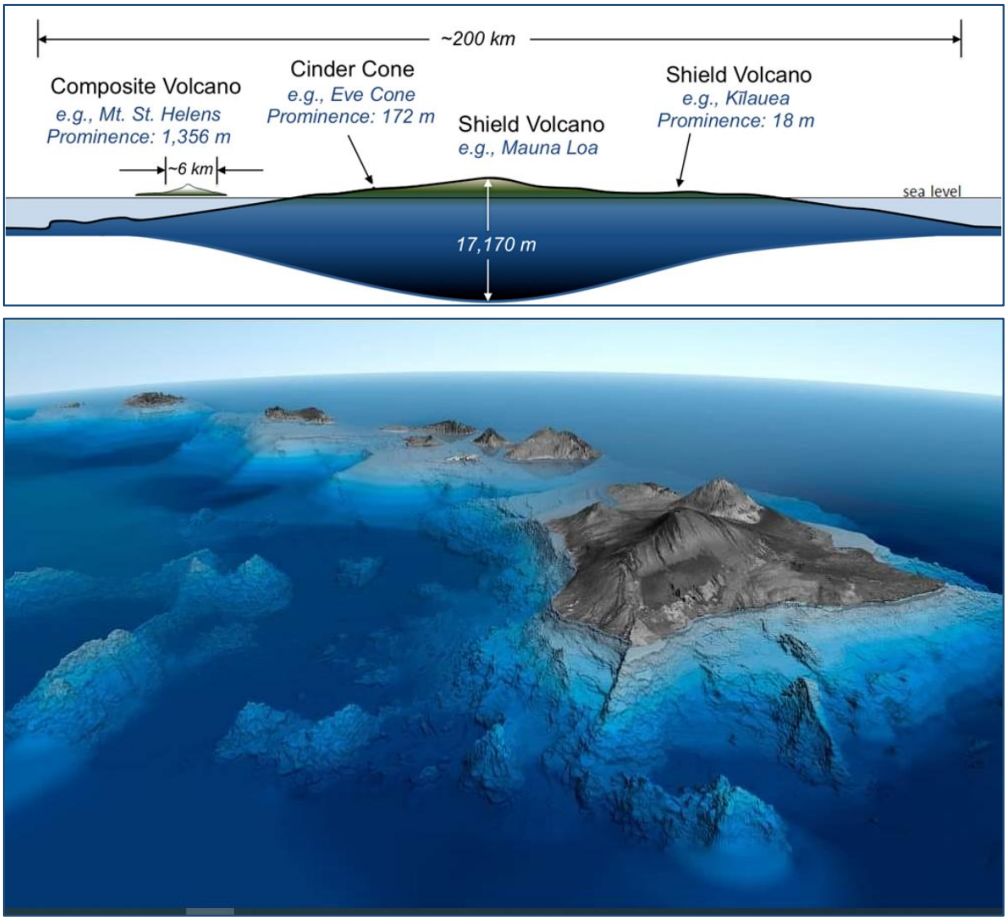


Figura 3.4. Mauna Loa este un exemplu clasic de vulcan scut, format prin acumularea succesivă a fluxurilor de lavă bazaltică. Profilul său prezintă o curbură uşoară, specifică acestei forme vulcanice şi asemănătoare scutului unui războinic. Vulcanul are un diametru de peste 200 km, evidenţiind dimensiunile impresionante caracteristice acestui tip de edificiu vulcanic.

Această categorie de vulcani a modelat unele dintre cele mai iconice peisaje ale lumii. Silueta perfect conică a Muntelui Fuji, care se ridică deasupra câmpiilor japoneze, este poate cea mai cunoscută imagine a unui vulcan. În America de Nord, masivul Munte Rainier domină orizontul statului Washington, iar în sudul continentului, Osorno, cu flancurile sale acoperite de zăpadă, pare desprins dintr-o ilustraţie clasică despre vulcani.

Însă frumuseţea acestor edificii ascunde o natură capricioasă şi periculoasă. Stratovulcanii erup mai rar decât vulcanii scut, dar atunci când o

fac, izbucnirile sunt adesea violente. Magma lor bogată în siliciu este densă şi vâscoasă, capabilă să reţină cantităţi mari de gaze. Această combinaţie creează „cazanul sub presiune" perfect, din care pot rezulta explozii de o forţă uriaşă.

Istoria recentă confirmă potenţialul lor distructiv. În 1980, Muntele St. Helens a arătat lumii cât de rapid se poate transforma un peisaj: o explozie laterală şi o alunecare de teren masivă au distrus păduri întregi şi au curmat 57 de vieţi. Cu aproape două milenii mai devreme, în anul 79 d.Hr., Vezuviul a îngropat oraşele Pompei şi Herculaneum sub nori piroclastici incandescenţi, într-unul dintre cele mai tragice episoade vulcanice documentate. Astăzi, aproape 3 milioane de oameni trăiesc în vecinătatea aceluiaşi Vezuviu, făcând din el unul dintre cei mai atent supravegheaţi vulcani din Europa.

Astfel, stratovulcanii rămân monumente ale contradicţiilor geologice: forme impresionante, aproape perfecte, dar alimentate din interior de forţe enorme. Ei sunt simboluri ale frumuseţii şi ale pericolului, ale creaţiei şi distrugerii, reamintindu-ne în permanenţă cât de complexă şi dinamică este planeta pe care trăim.



Figura 3.5. Stratovulcan. Vulcanul Osorno, situat în Chile, este un vulcan compozit impresionant, care a înregistrat ultima erupţie în anul 1869.

Conurile de cenuşă reprezintă unul dintre cele mai simple şi, în acelaşi timp, fascinante tipuri de edificii vulcanice (figura 3.6). Ele se formează în jurul unui orificiu eruptiv, acolo unde fragmente de rocă pulverizată - piroclastite - şi

cenuşă vulcanică sunt aruncate în aer şi cad înapoi, acumulându-se treptat. Prin depuneri succesive, se construieşte încet un deal conic, având în vârf un crater în formă de castron. De la distanţă, aceste structuri par fragile, dar ele surprind prin rezistenţa lor în timp.

În mod obişnuit, conurile de cenuşă iau naştere în urma erupţiilor explozive de lavă şi pot apărea izolat sau pe flancurile unor vulcani mai mari, cum sunt vulcanii scut. Pantele lor exterioare ating adesea un unghi de aproximativ 30°, valoare care corespunde „unghiului de repaus" - panta maximă la care particulele libere de cenuşă pot rămâne stabile fără să alunece.

Dimensiunile acestor conuri variază mult: unele abia depăşesc câteva zeci de metri, în timp ce altele pot atinge câteva sute de metri înălţime. Un exemplu celebru este Paricutín, din Mexic, un con de cenuşă care s-a înălţat spectaculos în doar câteva zile, devenind în scurt timp o prezenţă dominantă în peisajul rural.

Deşi sunt alcătuite din materiale slabe, neconsolidate, multe conuri de cenuşă sunt surprinzător de durabile. Secretul rezistenţei lor stă în permeabilitatea ridicată a cenuşii: apa de ploaie se infiltrează rapid în interior, fără să se scurgă pe versanţi, ceea ce limitează procesele de eroziune. În plus, fluxurile de lavă pot perfora sau pot ieşi de sub con, creând structuri complexe şi uneori tuneluri subterane.



Figura 3.6. Sunset Crater este un con de cenuşă situat în câmpul vulcanic San Francisco

Paricutín – o lecție vie despre nașterea unui vulcan. Nașterea vulcanului Paricutín reprezintă unul dintre cele mai bine documentate exemple de apariție și evoluție rapidă a unui con de cenușă. Evenimentul a avut loc în Valea Itzicuaro, în centrul Mexicului, într-o regiune unde nu se mai înregistrase activitate vulcanică de secole.

Totul a început pe 20 februarie 1943, după câteva săptămâni de cutremure ușoare și sunete misterioase care păreau să vină din adâncuri. În acea dimineață, Dionisio Pulido, un fermier local, pregătea terenul pentru plantarea porumbului. În timp ce lucra, a observat cum o veche deschizătură din sol - o fisură pe care încercase în trecut să o astupe - s-a redeschis brusc. Pământul a început să se ridice și să se umfle, iar gaze sulfuroase și cenușă fierbinte au început să iasă printre crăpături.

Câteva ore mai târziu, fenomenul a escaladat. Din fisura deschisă au început să fie proiectate fragmente de rocă incandescentă, ca niște jerbe roșii care luminau cerul serii. În doar cinci zile, un con de cenușă de peste 100 de metri s-a ridicat acolo unde, până atunci, fusese un câmp de porumb. Activitatea a continuat fără întrerupere, iar timp de nouă ani, vulcanul a erupt, ridicând în final o structură impresionantă, de 424 metri înălțime.

Paricutín este considerat un vulcan monogenetic, deoarece a erupt o singură dată în istorie. Totuși, evenimentul rămâne unul dintre cele mai spectaculoase exemple ale felului în care Pământul își poate remodela suprafața în doar câteva zile - o lecție vie despre dinamismul proceselor endogene.

Domurile de lavă reprezintă una dintre cele mai interesante și imprevizibile forme de vulcanism (figura 3.7). Deși seamănă la prima vedere cu stratovulcanii - acele structuri conice, înalte, care domină peisajul - domurile sunt mai mici, mai compacte și adesea mult mai instabile. Ele se formează din magmă felsică, bogată în siliciu, extrem de vâscoasă, care urcă din adâncuri asemenea unui material gros și lipicios. Acest tip de magmă este caracteristic zonelor tectonice active, iar domurile sunt frecvent întâlnite de-a lungul Inelului de Foc al Pacificului, cea mai intensă regiune vulcanică de pe planetă.

Chiar dacă magma care le alimentează conține, în general, cantități reduse sau moderate de gaze, vâscozitatea ei foarte mare face ca erupțiile să fie deseori explozive. Lava înaintează lent, aproape cu încăpățânare, formând un dop solid peste orificiul vulcanic. Această acumulare poate împinge versanții domului în sus, îi poate fractura sau poate provoca prăbușiri bruște care declanșează explozii laterale. Din acest motiv, domurile de lavă - deși aparent modeste ca dimensiuni - pot fi pericole majore pentru regiunile populate din apropiere.



Figura 3.7. Lava strălucitoare de înaltă vâscozitate se acumulează în gura de ventilație a Muntelui Unzen din Japonia. Periodic, blocurile mari de magmă solidificată se prăbușesc, eliberând substanțele volatile reținute în interiorul acestora, ceea ce duce la producerea unor erupții de tip Peléan. (Keller & DeVecchio, 2016)

Un aspect fascinant al acestor structuri este faptul că stilul eruptiv se poate schimba într-un timp extrem de scurt. În doar câteva minute sau ore, un dom relativ liniştit poate deveni scena unei activităţi intense. În alte cazuri, modificările se întind pe zile sau luni, pe măsură ce magmele nou venite interacţionează cu lava deja răcită sau degazată.

Aceste schimbări rapide depind de: compoziţia magmei, cantitatea şi comportamentul volatilelor, gradul de cristalizare al materialului, forma şi deschiderea canalelor de ventilaţie. Orice perioadă în care vulcanul îşi menţine un stil eruptiv constant - indiferent dacă este slab sau energic - poartă numele de fază eruptivă.

Domurile de lavă se formează adesea în interiorul craterului unui stratovulcan, la câteva zile, luni sau chiar ani după o erupţie explozivă. În astfel de situaţii, magma rămasă după erupţie şi-a pierdut o mare parte din gaze, ceea ce o face să urce lent şi să se răcească rapid. Rezultatul este un „dop" abrupt şi solid care blochează orificiul de ventilaţie.

Dimensiunile acestor structuri sunt modeste, în general de câteva sute de metri în înălţime şi aproximativ un kilometru în diametru. Unele cupole se pot forma într-o singură secvenţă eruptivă, imediat după explozie; altele se dezvoltă lent, episodic, pe parcursul mai multor ani sau chiar decenii. Un

exemplu remarcabil îl reprezintă cupola post-eruptivă de la Muntele St. Helens, care a început să crească după erupția devastatoare din 1980 și a continuat să evolueze în etape succesive.

Pe măsură ce domul se înalță și blochează orificiul, gazele din magmă încep din nou să se acumuleze sub presiune. Dacă presiunea devine prea mare, cupola poate ceda: se poate crăpa, se poate prăbuși sau poate declanșa erupții laterale neașteptate. Acest ciclu - creștere, blocare, presurizare și prăbușire - definește viața unui dom de lavă și îl transformă într-unul dintre cele mai imprevizibile și periculoase elemente ale unui peisaj vulcanic.

Tipuri de erupții vulcanice. Erupțiile vulcanice sunt manifestări extrem de variate, asemenea unei palete largi de comportamente prin care Pământul își eliberează energia internă. Mulți vulcani nu se limitează la un singur stil eruptiv: pot alterna între episoade liniștite și momente explozive, pot trece brusc de la un tip de activitate la altul sau pot combina fenomene aparent opuse în același eveniment. Erupțiile explozive apar atunci când gazele dizolvate în magmă se eliberează violent, asemenea unei sticle agitate care este deschisă brusc. În alte cazuri, explozia este provocată de contactul dintre magma fierbinte și apa subterană sau de suprafață, generând aburi, presiune și izbucniri dramatice.

Lava - magmă care și-a pierdut mare parte din gaze - curge diferit în funcție de compoziția chimică. Lavele bazaltice, sărace în silice, sunt fluide și formează pânze subțiri ce se întind pe kilometri, în timp ce lavele andezitice și riolitice, bogate în silice, sunt vâscoase și tind să se acumuleze în cupole groase și instabile. Cele mai violente episoade, în care se formează nori piroclastici, explozii bruște și coloane de cenușă ce pătrund în atmosferă, sunt legate de aceste magme acide și de comportamentul lor exploziv.

Erupțiile pliniene – coloane uriașe de cenușă și violență extremă. Sunt printre cele mai impresionante și devastatoare forme de activitate vulcanică. Ele produc coloane eruptive înalte de zeci de kilometri, asemenea unor furtuni verticale care injectează cenușă și particule în atmosferă. Materialul fin este purtat apoi de vânt pe distanțe uriașe, acoperind regiuni întregi cu un strat de cenușă.

Numele acestor erupții amintește de erupția celebră a Vezuviului din anul 79 d.Hr., descrisă în detaliu de Pliniu cel Tânăr, în care un nor piroclastic a distrus Pompei și Herculaneum și i-a curmat viața lui Pliniu cel Bătrân. Această erupție rămâne până astăzi modelul clasic pentru înțelegerea fenomenelor pliniene.

Erupţiile peléene - fluxuri piroclastice ce se revarsă ca nişte avalanşe de foc. Sunt renumite pentru producerea unor fluxuri piroclastice devastatoare: amestecuri de gaze supraîncălzite şi fragmente fine de rocă ce curg cu viteze enorme pe versanţii vulcanului. Aceste avalanşe incandescente sunt mai grele decât aerul şi se deplasează prin văi şi depresiuni, distrugând tot ce întâlnesc în cale.

Tipul poartă numele Muntelui Pelée din Martinica, a cărui erupţie din 1902 a distrus oraşul Saint-Pierre în câteva minute. Evenimentul a rămas în istorie ca una dintre cele mai mortale erupţii ale secolului al XX-lea

Erupţiile vulcaniene - explozii scurte, violente, zgomotoase. Acest tip de erupţii este caracterizat de explozii puternice, de scurtă durată, care aruncă în aer fragmente de lavă solidificată, cenuşă şi gaze. Coloanele pot ajunge la 10-20 km în atmosferă. Erupţiile vulcaniene apar frecvent la stratovulcani, mai ales atunci când domurile de lavă blochează parţial orificiul eruptiv. Ele au fost studiate pentru prima dată în detaliu pe Insula Vulcano din arhipelagul Eolian, loc considerat „casa zeului Vulcan" în mitologia romană. Erupţiile din 1888-1890 au oferit o ocazie unică pentru clasificarea modernă a tipurilor de erupţii.

Erupţiile islandeze - fisuri de lavă şi câmpuri bazaltice. În contrast cu violenţa tipurilor anterioare, erupţiile islandeze sunt liniştite, dominând prin curgeri lungi şi fluide de lavă bazaltică. Magma erupe prin fisuri întinse, aproape paralele, construind în timp platouri vaste de rocă solidificată. Vulcanismul Islandei este un exemplu clasic al interacţiunii dintre o dorsală medio-oceanică şi un hot-spot.

Erupţiile hawaiene şi stromboliene - focuri de artificii naturale Acestea sunt cele mai spectaculoase şi mai plăcute pentru observatori, întrucât au un caracter mai puţin violent şi sunt relativ previzibile.

- Erupţiile hawaiene sunt caracterizate prin fântâni de lavă înalte, susţinute, formate prin eliberarea ritmică a gazelor. Exemple celebre provin de la Kilauea şi Mauna Loa, vulcani care au modelat peisajul insulelor Hawaii.
- Erupţiile stromboliene apar sub forma unor explozii discrete, regulate, care proiectează bucăţi de lavă incandescentă ca nişte artificii naturale. Vulcanul Stromboli, din Insulele Eoliene, este activ de mii de ani şi este considerat „farul Mediteranei" datorită activităţii sale aproape continue.

O bază globală a cunoaşterii vulcanice. Din anul 1960, Smithsonian Institution a început să colecteze date sistematice despre vulcanii activi ai lumii. Astăzi, baza de date Volcanoes of the World (VOTW 4.0) este cea mai importantă sursă globală de informaţii despre vulcanism:

- 1551 vulcani monitorizaţi
- 596 vulcani cu erupţii documentate după anul 1500
- 866 vulcani cu activitate în Holocen (ultimii 10000 ani)
- 9444 erupţii înregistrate

Mii de vulcani submarini şi numeroase edificii monogenetice rămân încă insuficient studiate, ceea ce subliniază caracterul parţial al cunoaşterii noastre geologice actuale.

Despre frecvenţa erupţiilor şi probabilitatea supererupţiilor

În general, cu cât o erupţie este mai puternică, cu atât este mai rară. Erupţiile de magnitudine foarte mare au perioade de recurenţă impresionante.

Un exemplu sunt supererupţiile de la Yellowstone, cu magnitudini ≥ 8, care se produc o dată la peste 120000 de ani.

După 1950, în medie:

- 57 de vulcani au erupt anual
- 63 erupţii au fost înregistrate în fiecare an

Deşi multe dintre ele sunt minore, fiecare eveniment vulcanic are potenţialul de a afecta comunităţile umane, direct sau indirect. (Dumitriu, 2021).

Impact asupra mediului și societății

Pe măsură ce oraşele lumii cresc, iar populaţia se concentrează în regiuni urbane din ce în ce mai dense, relaţia dintre oameni şi vulcani devine tot mai fragilă. Sunt locuri pe glob unde viaţa de zi cu zi se desfăşoară la umbra unor forţe geologice uriaşe, tăcute, dar permanent prezente. Unul dintre cele mai elocvente exemple este Napoli, un oraş viu, aglomerat şi plin de istorie, care trăieşte cotidian între frumuseţe şi pericol.

Aici, milioane de oameni îşi duc existenţa în proximitatea a trei vulcani activi. Vezuviul se ridică impozant deasupra Golfului, amintind trecătorilor de momentul în care a schimbat pentru totdeauna destinele Pompeiului şi Herculaneumului. La câţiva kilometri distanţă, Campi Flegrei respiră lent sub asfaltul oraşului modern, iar departe, peste ape, insula Ischia îşi maschează originea vulcanică sub vegetaţia mediteraneană. În spatele imaginilor pitoreşti se află însă o muncă continuă: echipe de specialişti care monitorizează zi şi noapte vibraţiile solului, gazele ce ies prin fisuri, deformările terenului, temperatura apelor subterane. Fiecare schimbare, oricât de mică, este analizată, transmisă şi interpretată pentru a anticipa o eventuală trezire a unuia dintre aceşti titani geologici.

Dar uneori, oricât de vigilentă ar fi observarea, natura reuşeşte să surprindă. Pe insula Montserrat din Caraibe, liniştea care domnise vreme de secole a fost spulberată în doar câteva luni. Oamenii trăiseră generaţii întregi sub un vulcan adormit, fără să-şi imagineze că, într-o zi, dealurile verzi şi culturile de trestie de zahăr vor fi acoperite de nori de cenuşă fierbinte.

Primele semne au fost abia percepute: cutremure mici, zgomote înfundate care păreau să vină din adâncurile pământului. Apoi, în 1995, o coloană de cenuşă s-a ridicat în atmosferă, anunţând începutul unei perioade eruptive care avea să dureze aproape două decenii. Soufrière Hills a transformat radical insula. Case, şcoli, drumuri şi întreaga capitală Plymouth au fost îngropate sub straturi groase de materiale vulcanice. Locuri în care odinioară se auzeau vocile copiilor au devenit spaţii pustii, acoperite de cenuşă. Mii de oameni au fost obligaţi să plece, unii pentru totdeauna, iar insula şi-a pierdut mai mult de jumătate din populaţie.

În iunie 1997, un flux piroclastic a coborât cu o viteză inimaginabilă pe versanţii vulcanului, răpind vieţile a 19 persoane şi lăsând în urmă o rană adâncă în memoria comunităţii. Montserrat a devenit, astfel, nu doar un studiu ştiinţific, ci şi un simbol al rezistenţei umane în faţa fenomenelor naturale imprevizibile.

Astfel de poveşti arată că vulcanii nu influenţează doar peisajul, ci şi destinele oamenilor. Ei pot crea insule, munţi şi soluri fertile, dar pot şi distruge comunităţi într-o singură zi. În faţa lor, societăţile moderne trebuie să îmbine ştiinţa, tehnologia şi solidaritatea, pentru a înţelege, anticipa şi, pe cât posibil, a conviețui cu o planetă aflată într-o continuă transformare.

Erupţia vulcanului Pinatubo (1991) - una dintre cele mai mari explozii ale secolului XX. Timp de peste jumătate de mileniu, vulcanul Pinatubo din insula Luzon părea să fi intrat într-un somn adânc. Versanţii lui erau acoperiţi de vegetaţie tropicală, iar comunităţile locale trăiau în apropierea sa fără teamă, considerându-l un munte liniştit, parte a peisajului lor de zi cu zi. Peste un milion de filipinezi îşi construiseră case, culturi şi drumuri la poalele sale, iar aproximativ 20.000 de indigeni Aeta îşi aveau chiar aşezările pe conul vulcanic - o legătură directă între om şi munte, veche de secole.

Totul s-a schimbat în martie 1991, când Pinatubo a început să dea primele semne că liniştea lui era înşelătoare. Cutremurele repetate, mirosul de sulf şi mici explozii care ridicau coloane de fum au trezit atenţia vulcanologilor filipinezi. În doar câteva săptămâni, activitatea s-a intensificat într-un ritm

îngrijorător. Gazele bogate în dioxid de sulf erau eliberate din ce în ce mai abundent, iar pământul vibra aproape continuu.

La 15 iunie 1991, Pinatubo a erupt cu o forță uriașă, într-un eveniment care avea să fie catalogat drept cea de-a doua cea mai mare erupție a secolului XX, depășită doar de erupția Novarupta din Alaska (Dumitriu, 2021). Coloana de materiale aruncate în atmosferă a ajuns la zeci de kilometri înălțime, iar cerul de deasupra Filipinelor a devenit întunecat în plină zi.

Impactul asupra atmosferei a fost colosal. Cantități enorme de particule de aerosoli - picături și fragmente solide suspendate în aer - au fost injectate în stratosferă. Spre deosebire de gazele obișnuite, acești aerosoli au capacitatea de a reflecta lumina solară înapoi în spațiu și de a absorbi radiația. În doar trei săptămâni, un văl fin de dioxid de sulf și acid sulfuric a înconjurat zona ecuatorială, iar efectele climatice s-au resimțit ani la rând.

Pentru scurt timp, creșterea concentrației de CO_2 în atmosferă a încetinit. Temperaturile globale au înregistrat o scădere semnificativă, iar în nordul Europei a fost observată o diminuare accentuată a stratului de ozon. Deși erupția a durat doar câteva ore, consecințele sale s-au întins pe o întreagă decadă.

În mijlocul acestui haos, intervenția oamenilor de știință a făcut diferența. Monitorizarea atentă a vulcanului și interpretarea corectă a semnalelor pre-eruptive au permis emiterea unor avertizări clare și la timp. Peste 85 000 de persoane au fost evacuate înainte ca explozia să atingă apogeul. Se estimează că mai mult de 20 000 de vieți au fost salvate datorită acestor măsuri rapide - un exemplu remarcabil al modului în care știința poate transforma un dezastru inevitabil într-un eveniment cu vieți salvate.

Totuși, efectele secundare ale erupției au continuat mult timp după aceea. Curgerile noroioase - numite lahar-uri - au transformat văile într-o rețea de torente gri, dense, care au distrus terenuri agricole, poduri și sate întregi. Unele dintre aceste fluxuri au continuat ani la rând, fiind reactivate ori de câte ori ploile musonice aduceau apă peste depozitele imense de cenușă. Aproximativ 200.000 de oameni au fost afectați de lahar-uri, însă numărul victimelor a rămas relativ redus (circa 400 de persoane), tocmai datorită monitorizării continue și a avertizărilor emise în timp util.

Erupția Pinatubo a demonstrat, poate mai clar decât orice alt eveniment din epoca modernă, cât de fragilă este legătura dintre om și planeta în mișcare. Dar a arătat și altceva: că atunci când știința este ascultată și aplicată, chiar și cele mai mari pericole pot fi gestionate, iar viețile oamenilor pot fi protejate.

Nu toate poveştile despre vulcani vorbesc despre erupţii devastatoare. Uneori, adevărata dramă se desfăşoară înainte ca vulcanul să erupă - în lupta dintre prudenţă şi neîncredere, dintre ştiinţă şi speranţa că „nu se va întâmpla nimic". Un astfel de episod a avut loc în 1976, pe insula Guadelupa, când vulcanul *La Soufrière* a început să dea semne neliniştitoare după mai bine de patru secole fără o erupţie majoră. Trecutul său nu fusese complet tăcut – de-a lungul secolelor, mai multe episoade de „neliniște" vulcanică fuseseră raportate: scurte explozii, degajări de gaze, cutremure locale. Dar niciodată ceva cu adevărat devastator.

În primăvara anului 1976, activitatea vulcanului s-a intensificat: tremurături frecvente, fum sulfuriu care se ridica de pe versanţi, mici explozii. Comunităţile locale, obişnuite cu un vulcan aparent „blând", au privit iniţial cu scepticism aceste semne. Totuşi, pentru vulcanologi, tabloul era îngrijorător.

Temându-se de un scenariu în care o erupţie majoră ar putea surprinde populaţia, autorităţile au decis evacuarea unui număr impresionant: aproximativ 73 000 de oameni au părăsit casele, şcolile, afacerile şi comunităţile în care trăiau de generaţii.

Evacuarea a durat luni întregi. Oamenii trăiau între teamă şi frustrare, între recunoştinţă pentru măsurile de siguranţă şi neliniştea unui exil forţat. Iar vulcanul, tăcut şi impasibil, părea să-şi oprească orice încercare de reluare a activităţii.

Trei luni mai târziu, în lipsa unei erupţii majore, mulţi s-au întors acasă. Pentru unii, evacuarea devenise o dovadă că ştiinţa exagerează, că riscurile sunt uneori supraestimate. Pentru alţii, a fost o lecţie amară despre cât de greu este să gestionezi incertitudinea într-o lume în care hazardurile naturale nu vin cu promisiuni sau claritate.

Experienţa de la La Soufrière a subliniat un adevăr esenţial pentru toţi cei implicaţi în gestionarea riscurilor vulcanice: în lipsa monitorizării continue şi a interpretării precise a datelor, oamenii pot fi fie evacuaţi inutil, fie surprinşi de dezastre reale.

Cazul rămâne un reper în istoria vulcanologiei moderne - un episod în care ştiinţa a acţionat preventiv, dar natura a ales să rămână tăcută. Şi totuşi, tocmai aceste situaţii demonstrează cât de vitală este monitorizarea minuţioasă şi permanentă a vulcanilor, pentru a reduce atât riscurile reale, cât şi pe cele ale alarmelor false.

Spre deosebire de vulcanii care rămân adormiţi timp de generaţii şi ale căror izbucniri surprind populaţia, există şi vulcani care îşi fac simţită prezenţa

atât de des, încât oamenii ajung să le integreze ritmul în viaţa lor de zi cu zi. Un astfel de exemplu este *Merapi*, impunătorul stratovulcan andezitic din insula Java (Indonezia), considerat de secole un „vecin incomod", dar familiar.

În ultimele două sute de ani, Merapi a alternat perioadele de linişte cu episoade eruptive de intensitate variabilă. Pentru comunităţile care trăiesc pe versanţii săi fertili, ritmul vulcanului a devenit aproape o parte firească a vieţii. Oamenii au învăţat să-şi adapteze locuinţele, culturile şi ritualurile la acest gigant neliniştit. Cu fiecare erupţie minoră, siguranţa părea un lucru gestionabil; cu fiecare revenire la calm, memoria colectivă se liniştea.

Dar vulcanii, chiar şi cei „bine cunoscuţi", pot schimba regulile în orice moment. Erupţia din 2010 avea să demonstreze acest lucru. În dimineaţa zilei de 26 octombrie, Merapi a erupt într-un mod neaşteptat de violent. Prima zi a crizei s-a soldat cu 38 de victime - un bilanţ tragic pentru un vulcan cu care oamenii se obişnuiseră, în mod periculos, să convieţuiască.

Pe măsură ce activitatea vulcanică a continuat, comportamentul craterului a devenit tot mai atipic. Vulcanologii au observat semnale neobişnuite: degajări de gaze mai intense, deformarea accelerată a versantului, tremurături profunde care anunţau acumularea unei presiuni imense. Pe 5 noiembrie, Merapi a intrat în faza cea mai explozivă – curgerile piroclastice au avansat pe distanţe de două ori mai mari decât în orice altă erupţie istorică documentată. A fost o manifestare fără precedent în epoca modernă.

Alertată de aceste semnale, echipa de vulcanologi indonezieni a recomandat evacuarea masivă a populaţiei. Într-un efort logistic impresionant, peste 400 000 de oameni au fost evacuaţi în timp util. Deşi 367 de persoane şi-au pierdut viaţa, se estimează că intervenţia rapidă a salvat între 10.000 şi 20 000 de oameni, evitând una dintre cele mai mari tragedii vulcanice ale secolului XXI.

Erupţia Merapi din 2010 a devenit un studiu de caz emblematic pentru vulcanologi: un vulcan nu se comportă la fel de la o erupţie la alta, iar perioada istorică - oricât de bine documentată – nu este suficientă pentru a anticipa magnitudinea unui nou eveniment.

Merapi ne aminteşte că dinamica vulcanilor este vie, schimbătoare, iar momentul cel mai violent al unei erupţii nu survine, obligatoriu, la debutul procesului eruptiv. Înţelegerea completă a unui vulcan necesită privirea întregului său trecut geologic, nu doar a secolelor recente.

Există momente în care vulcanii nu au nevoie de explozii uriaşe pentru a produce tragedii. Uneori, erupţiile mici, aparent modeste pe scara vulcanică, pot

declanșa catastrofe de proporții. Așa s-a întâmplat în Columbia, în noiembrie 1985, când vulcanul Nevado del Ruiz, un stratovulcan tăcut și acoperit de o cupolă groasă de gheață, s-a trezit brusc la viață.

Erupția din 13 noiembrie a fost clasificată doar VEI 3 - o magnitudine moderată în termeni vulcanologici (tabel 3.1). N-a fost o coloană explozivă uriașă, nici o ploaie de lavă incandescentă. Dar ceea ce a urmat s-a transformat într-una dintre cele mai tragice catastrofe vulcanice ale secolului XX.

Căldura erupției a topit masiv calota glaciară care acoperea vârful vulcanului. Apa rezultată s-a amestecat cu cenușă, fragmente de rocă și sedimente acumulare pe versanți, formând laharuri – curgeri noroioase rapide, dense și imposibil de oprit. Aceste torente devastatoare au pornit în întunericul nopții pe văile înguste, accelerând pe măsură ce coborau spre zonele locuite.

La peste 45 de kilometri distanță, orașul Armero dormea. Nimeni nu se aștepta la un dezastru. Când laharurile au lovit orașul, grosimea lor a atins câțiva metri - suficient pentru a îngropa, într-o singură noapte, clădiri, străzi și vieți omenești. 23 000 de persoane au murit în Armero, iar alte aproape 2 000 în Chinchiná, un sat aflat mai departe în aval.

Tragedia Nevado del Ruiz nu a fost doar consecința vulcanului. A fost, în mare parte, o tragedie a necomunicării. Oamenii de știință avertizaseră autoritățile asupra riscului de laharuri. Hărțile de hazard existau. Pericolul era cunoscut. Dar mesajul nu a ajuns la timp la comunități. Ordinele de evacuare au fost confuze sau au întârziat, iar unii localnici nici măcar nu au fost informați că un vulcan aflat la zeci de kilometri poate transforma noaptea într-un torent mortal.

Armero rămâne, astfel, un exemplu dureros al faptului că, în gestionarea riscurilor vulcanice, comunicarea poate salva la fel de multe vieți ca tehnologia. Chiar și o erupție mică poate deveni devastatoare atunci când avertizările nu sunt înțelese, respectate sau transmise corect.

Unele dintre cele mai dramatice episoade din istoria umanității nu au avut loc în jurul unor vulcani impozanți sau a unor erupții spectaculoase, ci în urma unor procese geologice ale căror efecte au depășit granițele insulelor sau continentelor. Două astfel de evenimente – erupția bazaltică Laki (Islanda, 1783) și erupția explozivă a vulcanului Tambora (Indonezia, 1815) – au modelat nu doar peisaje vulcanice, ci și destinele a milioane de oameni din întreaga lume.

Tabel 3.1. Indicele de Explozivitate Vulcanică (Volcanic Explosivity Index – VEI) (sursa: (Keller & DeVecchio, 2016)

VEI	Tipul erupției	Tipul de vulcan	Tip de manifestare	Înălțimea coloanei de erupție	Volumul ejectat	Frecvența	Exemple
0	Hawaiian	Scut	Efuziv (neexploziv)	< 100 m	< 10 000 m^3	Constant	Kilauea (1983 - prezent)
1	Hawaiian/ Strombolian	Scut, Con de cenușă	Slab exploziv	100–1000 m	> 10 000 m^3	Zilnic	Stromboli, Eldfell (1973)
2	Strombolian/ Vulacanian	Con de cenușă, Stratovulcan	Exploziv	1-5 km	> 1 000 000 m^3	Săptămânal	Galeras (1993) Mount Sinabung (2010)
3	Vulcanian/ Pelean	Stratovulcan, Dom de lavă	Puternic exploziv	3-15 km	> 10 000 000 m^3	Câteva luni	Nevada del Ruiz (1985), Mount Uzen (1995)
4	Pelean/ Plinian	Stratovulcan	Cataclismic (catastrofal)	10-25 m	> 0.1 km^3	> 1 an	Mount Pelee (1902) Eyjafjallajökull (2010)
5	Plinian	Stratovulcan	Cataclismic (catastrofal)	20-35 km	> 1.0 km^3	≥ 50 ani	Mount Vesuvius (79 AD) Mount St Helens (1980)
6	Plinian/ Ultra-Plinian	Stratovulcan, Calderă continentală	Colosal	> 30 km	> 10 km^3	≥ 100 ani	Krakatoa (1983) Mount Pinatubo (1991)
7	Ultra-Plinian	Calderă continentală	Super-colosal	> 40 km	> 100 km^3	≥ 1 000 ani	Mazama (5600 B.C.) Tambora (1815)
8	Super-vulcan	Calderă continentală	Mega-colosal	> 50 km	> 1000 km^3	≥ 10 000 ani	Yellowstone (640 000 B.C.; Toba (74 000 B.C.)

Laki (1783–1784): când cerul Europei s-a acoperit de ceață toxică. Pe 8 iunie 1783, în sudul Islandei, Pământul a început să se deschidă de-a lungul unei fisuri lungi de 27 de kilometri. În doar câteva luni, din această rană a Terrei au erupt fluxuri uriașe de lavă bazaltică și cantități colosale de gaze vulcanice. Deși erupția a continuat până în februarie 1784, cea mai mare parte a lavei s-a scurs în primele cinci luni, transformând câmpurile fertile într-un peisaj negru, sufocat de fum și cenușă. *Dar adevărata catastrofă nu a fost lava. A fost cerul*.

Erupția a trimis în atmosferă aproximativ 8 milioane de tone de fluorură de hidrogen și 120 de milioane de tone de dioxid de sulf, care s-au combinat cu vaporii și au format un nor dens, uscat și toxic, cunoscut sub numele de „Ceața Laki". Această ceață galben-cenușie a fost purtată de vânturi peste toată Europa, provocând iritații respiratorii, intoxicații și, în multe regiuni, moartea animalelor și a oamenilor.

În Islanda, consecinţele au fost devastatoare: un sfert din populaţie - aproximativ 10 000 de oameni - a murit, în principal din cauza foametei şi a intoxicaţiilor generate de fluorurile acumulate în apă şi sol.

În Anglia şi Franţa, zeci de mii de oameni au murit în perioada verii lui 1783, sufocaţi de aerul otrăvit. Recoltele au fost compromise, preţurile au explodat, iar sărăcia a cuprins Europa. Unii istorici sugerează că această criză alimentară a contribuit la tensiunile sociale care au culminat în Revoluţia Franceză din 1789.

Tambora (1815): anul în care vara n-a mai venit. În aprilie 1815, pe insula Sumbawa din Indonezia, vulcanul Tambora a erupt cu o violenţă fără egal în timpurile moderne, atingând un indice de explozivitate VEI 7. Explozia a îndepărtat 1 500 de metri din vârful muntelui şi a trimis în atmosferă un volum uriaş de cenuşă şi gaze.

Peste 70 000 de oameni au murit, însă majoritatea victimelor nu au fost ucise direct de erupţie, ci de foametea care a urmat. Recoltele au fost distruse, iar regiunile din jurul vulcanului s-au transformat în câmpuri pustii.

La scară globală, efectele au fost şi mai dramatice. Dioxidul de sulf emis a format în stratosferă particule de acid sulfuric, capabile să reflecte radiaţia solară şi să răcească atmosfera inferioară. Rezultatul?

Anul 1816, cunoscut drept „Anul fără vară”.

În Europa şi America de Nord au avut loc îngheţuri în plină vară, zăpezi în iunie, furtuni violente şi recolte distruse. Foametea s-a instalat pe scară largă, iar istoria culturală a lumii a fost afectată – scriitoarea Mary Shelley, aflată în Elveţia în acel an întunecat şi rece, avea să scrie romanul Frankenstein, inspirată de atmosfera apocaliptică a vremii.

Hazarduri vulcanice. În mod obişnuit, vulcanii nu sunt o ameninţare constantă pentru societate. Mulţi dintre ei erup atât de rar, încât o comunitate poate trăi secole întregi fără să vadă o singură manifestare explozivă. În alte cazuri, acolo unde activitatea vulcanică este frecventă, oamenii au învăţat să conviețuiască cu vulcanul, să-şi adapteze locuinţele, agricultura şi chiar tradiţiile la ritmul şi particularităţile acestuia.

Cu toate acestea, chiar şi un vulcan aparent liniştit poate reveni brusc la viaţă după perioade lungi de inactivitate. Iar un vulcan cunoscut pentru erupţii moderate poate produce, uneori, un eveniment mult mai mare decât cel aşteptat. Această imprevizibilitate transformă vulcanii în surse permanente de hazard, capabile să afecteze atât comunităţile din apropiere, cât şi zone aflate la sute sau chiar mii de kilometri distanţă.

Efectele erupţiilor pot varia considerabil. Unele sunt imediate - fluxuri piroclastice, curgeri de lavă, explozii, laharuri sau emisii de gaze toxice - şi pot produce pierderi de vieţi omeneşti şi distrugeri materiale într-un timp foarte scurt. Altele au un impact pe termen lung: relocarea permanentă a populaţiei, pierderea terenurilor agricole, distrugerea infrastructurii sau modificări ale ecosistemelor. Există şi efecte la scară largă, cum ar fi transportul norilor de cenuşă pe distanţe mari, care pot paraliza traficul aerian sau pot afecta sănătatea populaţiei din alte regiuni.

Erupţiile de mare magnitudine ocupă un loc aparte în categoria hazardurilor naturale, fiind singurul fenomen capabil – alături de impactul meteoriţilor – să declanşeze dezastre cu impact global. Istoria planetei include astfel de momente: răciri climatice bruşte, recolte compromise pe continente întregi sau poluări atmosferice care au durat ani la rând. Din acest motiv, gestionarea riscului vulcanic este astăzi o preocupare mondială majoră.

Cu toate acestea, dacă privim statisticile globale, numărul total al victimelor provocate de erupţiile vulcanice între anii 1500 şi 2020 (aprox. 280.000 de persoane) este mult mai mic comparativ cu pierderile asociate altor tipuri de dezastre. Asta nu înseamnă însă că riscul este neglijabil. Dimpotrivă, multe dintre aceste decese s-au produs în cadrul unor comunităţi relativ mici, pentru care erupţia a reprezentat un eveniment devastator, cu impact ireversibil (Dumitriu, 2021).

Fiecare vulcan produce un ansamblu propriu de hazarduri, iar acestea depind de o serie de factori: tipul vulcanului, compoziţia magmei, cantitatea de gaze, modul de fracturare al edificiului şi intensitatea erupţiei. De aceea, nu două erupţii sunt identice şi nu toate hazardurile apar simultan. O erupţie poate genera doar curgeri de lavă, în timp ce alta poate combina explozii violente, fluxuri piroclastice, gaze toxice, căderi masive de cenuşă şi lahar-uri.

Înţelegerea acestor fenomene este esenţială pentru orice strategie de reducere a riscului. Cu cât cunoaştem mai bine comportamentul unui vulcan, cu atât putem anticipa mai corect posibilele scenarii, putem elabora planuri realiste de evacuare şi putem preveni transformarea unui eveniment natural într-o catastrofă umană.

Deşi mulţi vulcani rămân tăcuţi decenii sau chiar secole, erupţiile lor pot declanşa o gamă largă de fenomene periculoase, fiecare cu propriile mecanisme şi „amprente” asupra peisajului şi comunităţilor. Pentru a înţelege riscul vulcanic, este esenţial să cunoaştem modul în care aceste hazarduri se formează şi acţionează.

Căderile de piroclastite de dimensiuni mari. În timpul erupţiilor explozive, bucăţi de lavă incandescentă sau fragmente de rocă solidă sunt aruncate în aer asemenea unor proiectile. Dimensiunile lor pot varia de la câţiva centimetri la obiecte de mărimea unei maşini, iar traiectoriile pot depăşi uneori 4-5 km. Aceste fragmente reprezintă un pericol major pentru persoanele aflate în apropierea craterului, provocând răni grave, incendii şi distrugeri locale. De cele mai multe ori, victimele sunt turişti sau cercetători care se apropie prea mult de zona activă.

Căderile de cenuşă vulcanică. Cenuşa vulcanică este unul dintre cele mai frecvente şi mai extinse hazarduri. Deşi granulele au sub 2 mm, acestea pot fi transportate de vânt pe distanţe de mii de kilometri. Cenuşa este abrazivă, corozivă şi devine conductor electric atunci când este umedă. În apropierea vulcanului, acumulările groase pot prăbuşi acoperişuri - cum s-a întâmplat în 1991 la Pinatubo, unde aproximativ 300 de persoane au murit după cedarea locuinţelor sub greutatea cenuşii ude. La scară largă, norii de cenuşă pot afecta sănătatea oamenilor, pot paraliza transportul aerian şi pot deteriora culturile agricole.

Curgerile de piroclastite şi suflurile vulcanice. Printre cele mai devastatoare fenomene vulcanice se numără curgerile piroclastice – avalanşe de gaze fierbinţi, cenuşă şi blocuri de rocă, care se deplasează cu viteze enorme, uneori de peste 100 m/s. Acestea urmează de obicei văile, în timp ce valurile piroclastice, mai uşoare şi turbulente, pot depăşi obstacolele topografice şi se pot revărsa peste dealuri. Exemple celebre includ erupţiile de la Mont Pelée, Unzen sau Colima. „Nourii de foc" (nuée ardente) au ucis mii de oameni în trecut, iar distanţele parcurse pot depăşi zeci de kilometri în cazul erupţiilor mari.

Laharurile – torenţi noroioşi vulcanici. Lahar-urile sunt amestecuri dense de apă şi materiale piroclastice, care curg asemenea unor torenţi noroioşi cu o forţă uriaşă. Ele pot fi generate de topirea gheţii vulcanice, de ploi intense care mobilizează depunerile de cenuşă sau de revărsarea lacurilor de crater. Laharurile pot continua să afecteze zonele din jurul vulcanilor ani la rând după erupţie, deplasându-se cu peste 100 km/h şi transportând blocuri uriaşe. Tragedia de la Nevado del Ruiz (1985), când oraşul Armero a fost distrus şi 23.000 de oameni au murit, rămâne cel mai cunoscut exemplu al acestui tip de hazard.

Avalanşele de debris şi instabilitatea conurilor vulcanice. Conurile vulcanice sunt structuri fragile prin natura lor: sunt alcătuite din materiale

vulcanice slab consolidate, adesea alterate, depuse în straturi succesive şi dispuse pe versanţi abrupţi. Din acest motiv, instabilitatea lor este o caracteristică constantă, iar deplasările în masă – mai ales avalanşele de debris - sunt fenomene comune, indiferent dacă vulcanul este activ sau aparent „adormit”.

Avalanşele de debris sunt mişcări rapide ale unor cantităţi mari de rocă şi piroclastite, puse în mişcare de gravitaţie. Ele pot fi declanşate de erupţii, cutremure sau intruziuni magmatice care deformează şi slăbesc versanţii vulcanici. Un exemplu emblematic îl oferă Mount St. Helens (1980), unde ridicarea unui corp magmatic a împins versantul nordic cu aproape 2 metri pe zi, timp de şase săptămâni, până când acesta s-a prăbuşit, generând o avalanşă uriaşă de debris (figura 3.8).



Figura 3.8. Muntele Saint Helens, SUA (Mount St. Helens - WorldAtlas)

Nu doar vulcanismul activ poate declanşa astfel de fenomene. Ploile intense pot destabiliza depozitele friabile, aşa cum s-a întâmplat în 1998, când uraganul Mitch a provocat o alunecare masivă pe vulcanul Casita (Nicaragua), soldată cu aproximativ 3.800 de victime.

Avalanşele de debris pot fi „reci” – atunci când sunt determinate de instabilitatea structurală a versanţilor, sau „fierbinţi”, atunci când sunt generate direct de activitatea vulcanică. În funcţie de cantitatea de apă, ele pot evolua în curgeri noroioase de tip lahar, capabile să mobilizeze materiale de dimensiunea unei case şi să parcurgă distanţe mari cu viteze care pot depăşi 300 km/h.

Pe traseul lor, aceste fenomene pot distruge complet construcţii, infrastructuri sau zone locuite. Totuşi, poate cel mai periculos efect secundar îl reprezintă tsunami-urile produse atunci când avalanşele de debris sau curgerile piroclastice ajung în ocean. Aceste valuri, cu lungimi de undă mari şi un imens

18 mai 1980 a început ca o zi obişnuită de primăvară în Pacificul de Nord-Vest. Cerul era senin, aerul limpede, iar lumina dimineţii se aşternea pe pădurile dese care înconjoară masivul St. Helens, un vulcan aparent adormit, dar supravegheat cu atenţie.
La primele ore, câţiva oameni – turişti, localnici sau pur şi simplu curioşi – campau ori tăiau lemne în zona forestieră din apropiere. Unii trecuseră deliberat de baricadele ridicate de autorităţi după două luni de activitate seismică şi freatică. Atracţia era prea puternică: o umflătură uriaşă, anormală, crescuse pe flancul nordic al vulcanului, semn că magma împingea din interior cu forţă tot mai mare.
În acel moment, nimeni nu ştia că istoria urma să se scrie în doar câteva clipe.
La ora 8:32 dimineaţa, pe un vârf aflat vis-à-vis de St. Helens, vulcanologul Dr. David Johnston – tânăr, dedicat şi conştient de pericolul locului – monitoriza atent muntele. Era singurul specialist al USGS aflat în teren la acea oră. Observase de săptămâni întregi deformările vulcanului, iar acea dimineaţă avea să confirme temerile comunităţii ştiinţifice.
În fracţiunea de secundă în care flancul nordic al muntelui a explodat lateral, el a transmis prin radio către Observatorul Vulcanului Cascade un mesaj scurt, devenit istorie: *„Vancouver, Vancouver… acesta este momentul!"* . A fost ultimul său apel. Unda piroclastică l-a atins în doar câteva secunde. Cu o seară înainte, acceptase cu ezitare să înlocuiască un coleg în tură, fără să ştie că sacrificiul său avea să rămână unul dintre cele mai simbolice acte de devotament din vulcanologie.

potenţial distructiv, pot afecta regiuni aflate la sute de kilometri distanţă de locul colapsului. Se estimează că aproximativ 5% dintre tsunami-urile istorice au origine vulcanică.

Erupţiile de la Santorini (1400 î.Hr.), Krakatau (1883 şi 2018), Komagatake (1640), Unzen (1792) sau Ritter Island (1888) sunt doar câteva exemple care ilustrează forţa devastatoare a acestor procese.

Gazele vulcanice, curgerile de lavă şi cutremurele asociate: hazarduri mai puţin spectaculoase, dar cu impact real. Deşi adesea trecute în plan secundar faţă de erupţiile explozive sau de curgerile piroclastice, *gazele vulcanice* pot afecta profund mediul şi societatea. Ele sunt dizolvate în magma din adâncime şi sunt eliberate treptat pe măsură ce aceasta urcă spre suprafaţă şi presiunea scade. În funcţie de toxicitate, concentraţie şi persistenţa emisiilor, gazele pot provoca probleme de sănătate, mortalitate în rândul oamenilor şi animalelor, deteriorarea vegetaţiei sau afectarea unor activităţi economice sensibile.

Gazele ajung în atmosferă prin *fumarole*, orificii sau fisuri din scoarţă care pot rămâne active de la câteva săptămâni la secole întregi, în funcţie de sursa de

căldură din subsol. Ele pot apărea pe pante vulcanice, pe curgeri de lavă recent solidificate sau în zone unde depozitele piroclastice sunt încă fierbinți.

În comparație cu alte fenomene vulcanice, *curgerile de lavă* sunt considerate relativ previzibile și mai puțin periculoase pentru oameni, deoarece viteza lor este de regulă redusă. Totuși, impactul lor asupra terenurilor, infrastructurii și locuințelor este adesea ireversibil. Distanța pe care o parcurge lava depinde de compoziția chimică, temperatura ei și înclinarea terenului. Lavele bogate în siliciu sunt vâscoase și avansează lent, formând mase groase, pe când lavele bazaltice – precum cele din Hawaii – sunt fluide și pot curge pe distanțe de câțiva kilometri, mai ales dacă sunt canalizate sau circulă prin tuburi subterane.

În zonele acoperite de zăpadă sau gheață, lava și piroclastitele fierbinți pot provoca *topiri bruște*, generând inundații rapide și uneori catastrofale. Cele mai dramatice exemple sunt *jökulhlaup*-urile*, „izbucnirile glaciare" specifice Islandei, unde topirea gheții bazale poate elibera în câteva ore volume uriașe de apă.

Un alt efect mai puțin evident îl reprezintă cutremurele declanșate de activitatea vulcanică. De regulă au magnitudini mici, dar pot produce fisuri în sol, deformări locale ale reliefului sau deteriorarea structurilor vulnerabile. Totuși, există și situații în care erupțiile sunt precedate sau însoțite de cutremure puternice. Acest lucru nu surprinde, având în vedere că cei mai mulți vulcani se află în zone tectonice active, unde convergența sau divergența plăcilor generează oricum seismicități ridicate.

În multe cazuri, cutremurele au reprezentat semnale timpurii ale unor erupții iminente, cum s-a întâmplat la Nevado del Ruiz (1985), Pinatubo (1991), Unzen (1990) sau Cotopaxi (2002). Sincronizarea dintre activitatea tectonică intensă și ascensiunea magmei din adâncime oferă indicii esențiale pentru monitorizare și avertizare timpurie, contribuind la evitarea unor dezastre majore.

Impactul hazardurilor vulcanice. Deși imaginile spectaculoase ale erupțiilor domină percepția publicului, impactul real al hazardurilor vulcanice asupra societății este mult mai complex și se manifestă atât direct, cât și indirect. În mod direct, unele fenomene - precum curgerile piroclastice, lahar-urile, tsunami-urile vulcanice sau emisiile de gaze toxice - pot provoca victime,

* termen specific pentru inundații glaciare, care sunt un fenomen natural asociat cu erupțiile vulcanice subglaciare. Dacă îl adaptăm pentru limba română, pronunția ar suna, aproximativ, astfel:"iö-cuhl-laup"

răniți și distrugeri materiale severe. În mod indirect însă, vulcanismul poate declanșa schimbări de mediu care, în timp, afectează întreaga structură socio-economică a unei regiuni: foamete, migrații, colaps agricol sau perturbări climatice (tabel 3.2).

Tabelul 3.2. Impactul hazardurilor vulcanice (după Dumitriu, 2021)

Tipul hazardului	Descrierea hazardului	Riscuri
Expulzarea cenușii vulcanice	Particule de dimensiuni reduse de piroclastite expulzate în atmosferă	Probleme de respirație pentru unele persoane Răcire climatică semnificativă și foamete Avarii ale aeronavelor
Emisia de gaze vulcanice	Emisia de gaze înainte, în timpul și după o erupție vulcanică	Răcirea climatului duce la compromiterea culturilor agricole și mai apoi, la foamete În unele cazuri, otrăvire pe scară largă sau asfixierea oamenilor și a animalelor
Curgeri piroclastice	Amestecuri foarte fierbinți (> 100°C) de piroclastite de diferite dimensiuni și de gaze care se deplasează foarte repede (până la 100 km/h) pe versanții conului vulcanic	Hazard extrem – distrug totul în cale lor
Căderi de piroclastite de dimensiuni mari	Căderea verticală a bombelor și blocurilor vulcanice în zonele imediat limitrofe punctelor de erupție	Acoperirea cu piroclastite a zonelor apropiate de erupție Prăbușirea acoperișurilor
Curgeri noroioase (lahar)	Curgeri de noroi și debris pe un traseu de tip vale, pe distanțe mari față de locul erupției. Aceste curgeri pot să fie declanșate fie de o erupție vulcanică, fie de un eveniment extrem de precipitații	Risc sever de distrugere în cadrul traseelor de transport, deoarece aceste curgeri au viteze foarte mari de deplasare
Colapsul (prăbușirea) unor părți ale aparatului vulcanic/avalanșe de debris	Distrugerea unei părți din aparatul vulcanic, fie din cauza unei erupții, fie din alte motive. Materialele rezultate sunt puse în mișcare de către procese de mișcare în masă	Risc sever de distrugere pentru tot ce se află în calea avalanșelor de debris
Curgerile de lavă	Curgerile de lavă la anumite distanțe față de locul de emisie	Oamenii și infrastructura sunt expuse riscului, însă curgerile de lavă se deplasează, în general, cu viteze reduse (km h), astfel încât sunt relativ ușor de evitat

Analiza statistică a ultimelor secole arată un contrast semnificativ între aceste două tipuri de impact. Hazardurile directe sunt responsabile pentru mai puțin de 2.5% din totalul efectelor letale ale vulcanismului, în timp ce consecințele indirecte – precum foametea instalată după erupțiile Laki (1783) sau Tambora (1815) – au generat majoritatea victimelor din istoria înregistrată.

În total, erupțiile vulcanice au provocat aproximativ 280.000 de decese în perioada istorică. Raportat la alte hazarduri naturale, acest număr este relativ

redus, însă distribuţia lui este extrem de dezechilibrată: 70% dintre victime provin din doar zece erupţii, iar peste jumătate – din cinci evenimente majore. Astfel, riscul vulcanic este concentrat în câteva episoade extreme, rare, dar devastatoare.

Un alt aspect important este relaţia dintre severitatea erupţiei şi numărul victimelor. Paradoxal, erupţiile cu VEI 4 sunt responsabile pentru cele mai multe decese, în timp ce mega-erupţiile, deşi extrem de puternice, sunt mult mai rare. Majoritatea erupţiilor care au produs victime au cauzat, de fapt, sub 100 de decese fiecare, însumând mai puţin de 10% din totalul global.

Distribuţia geografică a victimelor evidenţiază un model clar: 85% dintre decese au avut loc în regiuni tropicale, acolo unde densitatea populaţiei este ridicată, iar vulcanii activi sunt numeroşi. State precum Indonezia, Filipine, Mexic, ţările din America Centrală şi din arhipelagurile Caraibe au înregistrat cele mai mari pierderi de vieţi omeneşti, adesea din cauza combinării activităţii vulcanice cu precipitaţiile abundente, care favorizează formarea lahar-urilor.

În ceea ce priveşte tipurile de hazard, curgerile piroclastice sunt cele mai letale, urmate de tsunami-urile vulcanice şi de lahar-uri. Ele acţionează rapid, cu o energie enormă şi pe distanţe mari, surprinzând comunităţile situate pe versanţi sau în văi.

La toate acestea se adaugă efectele indirecte - greu de cuantificat, dar adesea devastatoare. Foametea post-erupţie, colapsul producţiei agricole, contaminarea apei sau modificările climatice locale şi globale pot afecta milioane de oameni, mult după ce erupţia s-a încheiat. De aceea, evaluarea riscului vulcanic nu trebuie să se limiteze la momentul erupţiei, ci să includă şi transformările profunde pe care activitatea vulcanică le poate induce în mediile umane şi naturale.

Studiu de caz: Erupţia vulcanului Eyjafjajökll, 2010

Islanda este una dintre puţinele regiuni ale planetei unde poţi simţi că Pământul respiră prin crăpături. Aşezată exact pe Dorsala Medio-Atlantică, insula este literalmente ruptă în două, separându-se cu câţiva centimetri în fiecare an, ca un continent în miniatură care se reconfigurează permanent. Aici, magma urcă la suprafaţă aproape ca într-un laborator geologic natural, iar erupţiile - dese, de obicei blânde - sunt parte din viaţa locuitorilor. Islandezii sunt obişnuiţi cu ele, le privesc uneori de pe marginea drumului, alteori de pe verandă. Majoritatea acestor erupţii efuzive nici măcar nu atrag atenţia lumii.

Dar în 2010, un vulcan cu nume aproape imposibil de pronunţat, Eyjafjallajökull, avea să schimbe regulile jocului. Anii de dinaintea erupţiei fuseseră marcaţi de o activitate seismică discretă, dar persistentă. "Ceva" se întâmpla sub gheţar. Din ianuarie

2010, cutremurele au început să se concentreze chiar sub vârful Eyjafjallajökull, coborând în adâncime ca niște pași grăbiți ai magmei care se pregătea să iasă la lumină. În martie, numărul lor depășea o mie. Vulcanologii islandezi știau că urmează un moment important - dar cât de important, nimeni nu bănuia.

Faza 1: un spectacol de foc

Pe 20 martie, o fisură lungă de jumătate de kilometru s-a deschis pe flancul estic al vulcanului. Liniștea nopții a fost ruptă de lumina roșie a lavei care țâșnea în cascade de sute de metri. A fost începutul unei faze efuzive spectaculoase, în stil clasic islandez: cortine de foc, râuri de lavă, miros de sulf și un cer portocaliu. O erupție suficient de impresionantă încât să atragă peste 25 000 de turiști, dar prea blândă ca să pară periculoasă. În trei săptămâni, câmpurile de lavă au acoperit peste 1.5 km². Totul părea sub control. Apoi, brusc, lava s-a oprit.

Faza 2: gheață, foc și o surpriză neplăcută

Pe 13 aprilie, Islanda s-a trezit sub un alt tip de erupție: una explozivă, pornită de sub calota glaciară groasă de 200 de metri care acoperea craterul central. În câteva ore, apa topită a declanșat jökulhlaups - inundații bruște și violente care au forțat evacuarea rapidă a sute de oameni. De data aceasta, spectacolul de foc s-a transformat în tensiune.

Dar adevărata problemă abia urma. Când cenușa a oprit cerul.

În mai puțin de o zi, o coloană uriașă de cenușă de 9 km înălțime se ridica deasupra vulcanului. Vânturile puternice de la altitudine au împins norul direct spre Europa, iar autoritățile aviatice au intrat în alertă maximă: chiar și câțiva miligrame de cenușă pe metru cub puteau bloca motoarele aeronavelor.

Rezultatul? Cel mai mare blocaj aerian din istorie în timp de pace

Mii de zboruri au fost anulate, milioane de călători au rămas blocați, iar economia europeană pierdea zilnic sute de milioane de euro. O insulă mică, cu o populație mai mică decât a unui sector din București, paralizase traficul aerian al unui continent.

Impact local: cer întunecat, animale în pericol, decizii dificile

În Islanda, vânturile au purtat o mare parte din cenușă spre mare, dar sud-estul țării a fost acoperit de straturi de câțiva centimetri. Zile întregi, unele regiuni au rămas în întuneric complet. Nivelurile ridicate de fluorură din cenușă amenințau animalele; fermierilor li s-a spus să le adăpostească în grajduri - în contradicție cu protocolul de evacuare Katla practicat cu doar câțiva ani înainte, care prevedea eliberarea animalelor.

Confuzie, improvizație, decizii rapide. Islanda a simțit pe pielea ei cât de complicată poate fi gestionarea unui hazard într-o societate care trăiește "pe marginea vulcanilor".

Finalul erupției și o teamă persistentă: Katla

Erupția Eyjafjallajökull a durat șase luni. Niciun deces direct nu a fost înregistrat - o realizare remarcabilă, considerând amploarea fenomenului. Dar vulcanul a ridicat o întrebare mult mai apăsătoare: Ce se întâmplă dacă Katla, "gigantul adormit" din est, se trezește?

Katla a erupt de 20 de ori în ultima mie de ani, iar fiecare episod a fost mai mare decât ceea ce a produs Eyjafjallajökull în 2010. Iar o parte dintre erupțiile Eyjafjallajökull

din trecut au coincis cu cele ale Katla. Coincidență? Sau legătură fizică între cele două sisteme? De atunci, activitatea seismică de sub Katla crește încet. Nimeni nu știe dacă este preludiul unei noi erupții sau doar o pulsație obișnuită a Pământului în această regiune neliniștită.

Analiza prin prisma celor cinci concepte:

1. Știința ne ajută să prezicem hazardurile. Înțelegând relația dintre activitatea seismică și activitatea vulcanică, oamenii de știință au reușit să prognozeze erupția vulcanului Eyjafjallajökull din 2010.

2. Cunoașterea riscurilor poate ajuta oamenii să ia decizii. Deși vulcanii sunt prezenți pe toate continentele, în oceane și pe insule precum Islanda, poziționarea lor nu este întâmplătoare, ci se află în strânsă legătură cu anumite contexte geologice specifice - vulcanii se formează în zone cu activitate tectonică intensă, cum ar fi limitele dintre plăcile tectonice (zone de subducție, rift-uri) Dacă locuiți într-o regiune activă vulcanic, există o anumită probabilitate de a experimenta o erupție, în funcție de frecvența cu care vulcanii din zonă erup.

3. Există legături între hazardurile naturale. Confluența dintre "foc" (activitatea vulcanică) și "gheață" (ghețarii) pe insula Islanda reprezintă un exemplu remarcabil de interconectare a hazardurilor naturale. În Islanda, erupțiile vulcanice pot interacționa cu ghețarii în moduri complexe. De exemplu:

- Jökulhlaups (inundații glaciare): Când lava intră în contact cu gheața, se produce o topire rapidă, rezultând inundații catastrofale.
- Lahars (fluxuri de noroi): Amestecul de cenușă vulcanică cu apa topită de la ghețari formează fluxuri de noroi dense și distructive.

Adesea, nu doar riscul individual al fiecărui fenomen natural în parte, ci interacțiunea dintre acestea conduce la cele mai grave consecințe. Riscul nu este doar de la erupția vulcanică în sine sau de la inundațiile glaciare izolate, ci de la combinația acestor fenomene, care poate amplifica considerabil impactul asupra mediului și a comunităților umane.

4. Oamenii pot transforma evenimentele periculoase în catastrofe. Așa cum au demonstrat închiderile spațiului aerian din 2010, în lumea noastră modernă, extrem de interconectată, un hazard natural perceput ca fiind local poate avea implicații globale. Deși erupția a avut loc într-o zonă relativ izolată, impactul său s-a resimțit pe tot globul. Particulele de cenușă au determinat suspendarea zborurilor în întreaga Europă, afectând sute de mii de pasageri și perturbând lanțurile globale de aprovizionare. Acest exemplu subliniază interdependența lumii moderne, în care infrastructura economică, transportul internațional și mobilitatea globală pot fi afectate de evenimente naturale care, la prima vedere,

par a fi izolate sau locale. Astfel, hazardurile naturale locale nu mai pot fi privite izolat, ci în contextul impactului lor asupra unui sistem globalizat.

5. Consecințele hazardurilor pot fi minimizate. Monitorizarea vulcanologică și hidrologică din jurul vulcanului Eyjafjallajökull a permis emiterea unor avertismente timpurii și evacuarea cu succes a locuitorilor islandezi aflați în zonele de risc.

Această situație subliniază importanța sistemelor eficiente de monitorizare și gestionare a hazardurilor naturale. Prin intermediul tehnologiei avansate, cum ar fi seismografele, senzori de gaz și imagini satelitare, oamenii de știință au reușit să detecteze activitatea tectonică și semnele premergătoare erupției. Aceasta a oferit autorităților timpul necesar pentru a pregăti populația și a coordona evacuările înainte ca erupția să își facă simțite efectele.

Un alt aspect esențial este cooperarea dintre specialiști și comunitățile locale. Prin educație și comunicare eficientă, locuitorii au fost pregătiți să reacționeze prompt la avertismentele emise, reducând astfel semnificativ riscurile pierderilor de vieți omenești. Exemplul oferit de erupția Eyjafjallajökull ilustrează modul în care știința și tehnologia pot contribui la protejarea vieții umane în fața hazardurilor naturale, mai ales în regiunile vulcanic active.

Prevenirea și reducerea riscurilor vulcanice

Trăirea în apropierea unui vulcan presupune o combinație subtilă între respect, vigilență și adaptare. Comunitățile expuse știu că o erupție nu poate fi oprită, însă impactul ei poate fi redus considerabil prin pregătire, informare și reacție rapidă. Gestionarea riscului vulcanic începe mult înainte ca magma să ajungă la suprafață.

Informare și prevenție

Primul pas este cunoașterea vulcanului. Fiecare edificiu vulcanic are propria semnătură de risc: unii emit lavă fluidă, alții generează curgeri piroclastice mortale, alții sunt periculoși prin lahari sau prin căderi masive de cenușă. Relieful dictează adesea direcția acestor fenomene, astfel că valea care drenează vulcanul poate deveni, în câteva minute, o autostradă pentru lavă sau pentru torenți noroioși.

Instituțiile locale, serviciile de urgență și centrele de monitorizare reprezintă sursa cea mai sigură de informații. Comunicarea cu acestea și urmărirea periodică a buletinelor de activitate vulcanică sunt esențiale, mai ales în zonele active.

Kitul de supraviețuire: pregătirea pentru câteva zile critice

În situaţii de criză, accesul la apă, hrană, energie şi informaţie devine vital. De aceea, un kit de supravieţuire adaptat riscurilor vulcanice trebuie să includă apă potabilă pentru trei zile, alimente neperisabile, trusă medicală, lanternă, baterii, radio portabil, mască de praf, ochelari de protecţie, haine călduroase, documente importante şi o sumă mică de bani cash. Foliile de plastic şi banda adezivă pot proteja locuinţa de intrarea cenuşii, iar o lopată devine indispensabilă atunci când acoperişul este încărcat de depuneri. În regiuni reci sau glaciare este necesar şi echipament pentru temperaturi scăzute; în zone tropicale poate fi nevoie de protecţie împotriva ploilor intense care declanşează lahari.

Planul de evacuare: paşii gândiţi din timp salvează vieţi

Familia trebuie să ştie unde se întâlneşte, pe cine contactează şi pe ce rută se evacuează. În timpul unei erupţii nu mai există timp pentru dezbateri — acţiunile trebuie executate, nu negociate. Stabilirea unei persoane de contact aflate într-o altă localitate este o regulă utilă, mai ales când reţelele locale devin suprasolicitate.

Semne de avertizare: când Pământul trimite semnale

Cutremure repetate şi superficiale, emisii noi de aburi sau gaze, deformarea vizibilă a flancului vulcanic şi intensificarea mirosului de sulf sunt doar câteva dintre semnalele care anunţă ascensiunea magmei. În astfel de momente, populaţia trebuie să urmărească notificările oficiale — monitorizarea ştiinţifică este singurul „ochi" care vede în interiorul vulcanului.

În timpul erupţiei: reacţii rapide în funcţie de hazard

- Laharii apar brusc, cu viteze ce pot depăşi 50-60 km/h. Sunetul lor seamănă cu un tren greu în viteză. Singura măsură eficientă este urcarea pe teren înalt, cât mai departe de albia văii.
- Curenţii piroclastici sunt aproape imposibil de evitat dacă te afli în proximitatea vulcanului: se deplasează cu sute de km/h şi sunt letali. Distanţa şi altitudinea sunt singurele măsuri de protecţie.
- Căderile de cenuşă necesită adăpost în clădiri solide, evitarea zonelor expuse la vânt şi protejarea căilor respiratorii. Cenuşa umedă devine grea, astfel că acoperişurile plate pot ceda după doar câţiva centimetri.
- Curgerea de lavă este, paradoxal, cel mai puţin periculos fenomen: lentoarea sa permite evacuarea; totuşi, poate distruge infrastructura şi bloca drumurile.

După erupţie: perioada în care pericolul persistă

Chiar și după ce presiunea eruptivă a scăzut, regiunile vulcanice rămân instabile. Laharurile pot continua luni sau chiar ani, mai ales după episoade de ploi abundente care remobilizează cenușa depusă. Locuințele pot fi afectate de coroziunea cenușii, iar drumurile, podurile și rețelele de apă pot rămâne inutilizabile.

De aceea, oamenii trebuie să rămână în case până la diminuarea prafului, să poarte măști, să evite utilizarea mașinii și să respecte cu strictețe instrucțiunile autorităților. Revenirea prematură în zone periculoase a provocat numeroase victime în trecut.

Măsuri de prevenire și reducere a riscurilor vulcanice

Gestionarea riscurilor vulcanice reprezintă un efort complex, în care știința, infrastructura, educația și politicile publice se împletesc pentru a proteja viețile oamenilor și a reduce impactul asupra mediului. În zonele afectate de activitate vulcanică, prevenția nu este un lux, ci o necesitate zilnică. Măsurile adoptate se împart, în general, în intervenții structurale, acțiuni non-structurale, educație publică și acțiuni instituționale, toate având același obiectiv: crearea unor comunități reziliente.

a) Măsuri structurale

Pentru a înțelege și anticipa comportamentul unui vulcan, infrastructura de monitorizare este esențială. Rețelele de seismografe, senzorii de gaz, stațiile GPS și imaginile satelitare permit detectarea celor mai fine deformări ale solului sau creșteri ale degajărilor de gaze - indicatori care anunță ascensiunea magmei. În același timp, planificarea teritorială trebuie să țină cont de zonele de risc, astfel încât locuințele, școlile și drumurile să nu fie amplasate în calea laharelor, curgerilor de lavă sau a curenților piroclastici.

În unele regiuni, comunitățile au construit canale sau diguri menite să devieze fluxurile de lavă, reducând astfel pagubele potențiale. Pe versanții instabili, împădurirea controlată și refacerea vegetației reduc riscul de alunecări de teren și diminuează formarea torenților noroioși post-eruptivi.

b) Măsuri non-structurale

Pe lângă infrastructura fizică, există măsuri la fel de importante care țin de organizare, planificare și informare. Hărțile de hazard și risc vulcanic sunt instrumente fundamentale, deoarece arată comunităților cât de expuse sunt diferitelor tipuri de fenomene și unde ar trebui amplasate eventualele rute de evacuare.

În zonele cu activitate intensă, autoritățile pot institui zone de excludere - spații în care locuirea, agricultura sau turismul sunt restricționate. Tot aici se

încadrează şi planurile de evacuare, care trebuie actualizate periodic şi corelate cu sistemele de avertizare timpurie. Monitorizarea prin telemetrie, completată de observaţii satelitare, poate trimite alerte cu ore sau chiar zile înaintea unei erupţii majore.

De asemenea, colaborarea internaţională este crucială. Reţele precum Global Volcanism Program (Smithsonian) sau observatoarele vulcanice europene facilitează schimbul de date, bune practici şi expertiză între specialişti din întreaga lume.

c) Educaţie şi conştientizare publică

Nicio măsură tehnică nu poate avea efect dacă populaţia nu ştie cum să reacţioneze. Educaţia pentru risc vulcanic urmăreşte să îi înveţe pe oameni să recunoască semnele premergătoare erupţiilor - cutremure mici şi dese, emisii noi de gaze, modificări ale apei din izvoare sau umflarea flancurilor vulcanice.

Exerciţiile periodice de evacuare, campaniile publice şi materialele educative contribuie la formarea unei culturi a siguranţei. Scopul este ca reacţia oamenilor în timpul unei erupţii să fie instinctivă, bine antrenată şi lipsită de ezitare. În comunităţile care trăiesc de secole alături de vulcani activi, aceste practici au demonstrat că pot salva mii de vieţi.

d) Măsuri instituţionale şi politice

Reducerea riscului vulcanic este şi responsabilitatea statului. Consolidarea legislaţiei privind gestionarea riscurilor geologice, inclusiv standarde stricte pentru construcţii şi planificare teritorială, reprezintă un pas esenţial. În paralel, centrele naţionale de monitorizare – integrate în reţelele de protecţie civilă – trebuie să funcţioneze permanent şi să aibă acces la cele mai moderne tehnologii.

Schimbul de date între institutele vulcanologice şi colaborarea la nivel internaţional sunt indispensabile pentru înţelegerea fenomenelor complexe. Totodată, sprijinirea cercetării în vulcanologie, geotermie şi geofizică permite dezvoltarea unor noi metode de predicţie şi intervenţie, contribuind la o gestionare mai eficientă a pericolului.

Gestionarea riscurilor vulcanice devine cu adevărat eficientă doar atunci când toate aceste componente - infrastructură, planificare, educaţie şi politici publice - funcţionează integrat, într-un sistem în care fiecare verigă întăreşte reziliența comunităţilor expuse. De la cercetarea avansată care descifrează mecanismele erupţiilor, până la exerciţiile periodice de evacuare şi reglementările stricte privind utilizarea terenurilor, toate contribuie la un acelaşi obiectiv: reducerea vulnerabilităţii umane şi economice în faţa unui

pericol natural imposibil de eliminat, dar perfect gestionabil. În final, succesul depinde nu doar de tehnologia disponibilă, ci mai ales de capacitatea societății de a învăța, de a se adapta și de a acționa concertat înainte ca o erupție să transforme un risc în dezastru.

Autoevaluare

1. Explică modul în care chimia magmei, conținutul de gaz și vâscozitatea contribuie la explozivitatea vulcanului.
2. Enumeră principalele tipuri de vulcani și caracteristicile magmei asociate fiecăruia.
3. Descrie stilurile de erupție ale diferitelor tipuri de vulcani.
4. Explică relația dintre plăcile tectonice și vulcani.
5. Enumeră efectele primare și secundare ale erupțiilor vulcanice.
6. Muntele Vezuviu, lângă Napoli, Italia, este considerat a fi un vulcan activ care reprezintă un pericol pentru orașele din apropiere. Dacă ați fi responsabil de apărarea civilă din Napoli și vulcanologul șef responsabil cu monitorizarea Vezuviului v-ar fi informat că Vezuviul are o șansă de 60% de a avea o erupție majoră în două săptămâni, ce ați face? Luați în considerare evacuarea unui număr mare de persoane, cum ați face acest lucru și când ați face-o?

Bibliografie recomandată

- Bobrowsky, P., 2013. *Encyclopedia of natural hazards.* New York: Springer.
- Dumitriu, D., 2021. Hazarduri vulcanice. În: *Riscuri geomorfologice.* Iași: Universitatea „Alexandru Ioan Cuza", Iași.
- Hyndman, D. & Hyndman, D., 2017. *Natural Hazards and Disasters, Fifth Edition*. Boston, USA: Cengage Learning.
- Keller, E. & DeVecchio, D., 2016. *Natural hazards : earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes*. Fourth Edition. University of California, Santa Barbara: Routledge.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021. *PreventionWeb.* [Interactiv] Available at: https://www.preventionweb.net/



Clădiri distruse în Kahramanmaras, Turcia după cutremurele din 6 februarie 2023

Sursa: https://worldview.stratfor.com

CUTREMURELE DE PĂMÂNT: CAUZE ȘI EFECTE

Rezultatele învățării:
la finalul acestei unități de învățare, studenții vor fi capabili să

- explice mecanismele de formare a cutremurelor, rolul plăcilor tectonice și modul în care energia seismică se eliberează și se propagă prin scoarță;
- distingă între conceptele de intensitate și magnitudine, descriind modul în care acestea sunt măsurate și utilizate în evaluarea unui seism;
- analizeze tipurile principale de seisme și să argumenteze diferențele dintre ele prin exemple relevante;
- evalueze efectele cutremurelor asupra mediului natural și asupra societății;
- identifice măsuri structurale și non-structurale de reducere a riscului seismic, argumentând importanța planificării urbane și a educației populației;
- aplice cele cinci concepte fundamentale pentru a analiza un eveniment seismic major;

Termeni cheie: hazard seismic, magnitudine, intensitate, reducerea riscului seismic

Cutremurele sunt un fenomen natural mortal și distructiv. Nu putem prezice încă cutremurele: acestea apar frecvent fără avertisment, nelăsând timp pentru evacuare sau pentru a lua măsuri de precauție pentru a limita daunele materiale.

Cutremurele reprezintă unul dintre cele mai mari pericole naturale: numai în secolul al XX-lea, peste 2 milioane de oameni au murit în cutremure și din cauza cutremurelor, tsunami-urilor și alunecărilor de teren declanșate de cutremure. Secolul XXI promite să fie și mai devastator: cutremurul din Turcia din 2023, cutremurele mari din Japonia în 2011, Chile și Haiti în 2010, sud-vestul Chinei în 2008, nordul Pakistanului în 2005 și Iranul în 2003 au ucis peste 460 000 de persoane.

...cu doar câteva clipe înainte ca pământul să înceapă să se cutremure, un băiețel de doi ani se juca voios în curtea casei. Descoperise cu mândrie cum să pornească aspersoarele... Când și-a văzut tatăl, primele cuvinte ale copilului au fost emoționante: "Tati, nu porni aspersoarele!"

Planeta noastră se află într-o permanentă transformare, chiar dacă uneori ritmul acestor schimbări ne scapă privirii. Cele mai multe procese geologice se desfășoară extrem de lent, pe scări de timp care depășesc cu mult experiența vieții umane. Sunt necesare sute sau chiar mii de ani pentru ca un strat de sediment să fie acoperit de altele și să se transforme treptat în rocă. În mod similar, alterarea rocilor și transformarea lor în particule fine, precum nisipul, pot dura mii sau chiar milioane de ani. Chiar și munții, care astăzi domină peisajul, se ridică și se modelează prin procese ce se întind pe parcursul a zeci de milioane de ani.

În acest context al schimbărilor lente, este firesc să ne întrebăm de ce Pământul este considerat o planetă atât de dinamică. Răspunsul se află în mecanismul care stă la baza evoluției scoarței terestre: mișcarea continuă a plăcilor tectonice.

Aceste plăci, de dimensiuni continentale sau oceanice, plutesc pe mantaua superioară și se deplasează lent, antrenate de circulația internă a materialului fierbinte. Deși mișcarea lor are loc cu doar câțiva centimetri pe an, consecințele contactului dintre plăci pot fi spectaculoase. În zonele în care acestea se lovesc, se freacă sau se îndepărtează una de alta, Pământul eliberează brusc energia acumulată în interior, generând unele dintre cele mai violente și imprevizibile fenomene naturale: cutremurele. Aici, în aceste zone de contact, vulcanii pot remodela peisajul în numai câteva ore, iar tsunami-urile pot atinge țărmurile în câteva minute, lovind comunități nepregătite.

Cutremurele reprezintă, astfel, una dintre cele mai evidente manifestări ale dinamismului planetei noastre. Ele ne reamintesc că, dincolo de aparența stabilității cotidiene, Pământul este o structură vie, aflată într-o continuă reorganizare internă.

Definiție și mecanism de formare

Seismele sau cutremurele de pământ reprezintă unele dintre cele mai violente fenomene naturale, capabile să producă dezastre majore într-un timp extrem de scurt. Tocmai de aceea, cercetarea științifică pre-dezastru, monitorizarea continuă și educarea populației devin esențiale pentru reducerea riscurilor și limitarea consecințelor unui viitor eveniment seismic.

Cutremurele sunt *vibrații bruște ale scoarței terestre*, generate de eliberarea rapidă a energiei acumulate în interiorul rocilor. Această eliberare se produce, de regulă, pe fondul mișcării plăcilor tectonice, al blocării lor temporare sau al altor procese geodinamice. Din punct de vedere geofizic,

seismele reprezintă *solicitări elastice de scurtă durată* ale scoarţei, care se propagă cu viteze ce depăşesc adesea 1 km/s.

Cutremurele se clasifică, în funcţie de intensitate şi de efectele resimţite, în *microseisme*, care au o intensitate atât de redusă încât nu pot fi percepute de om, şi *macroseisme*, care sunt simţite la suprafaţă şi pot provoca pagube materiale, prăbuşiri de construcţii şi pierderi de vieţi omeneşti.

Energia eliberată într-un seism se transmite sub formă de unde seismice, ce pornesc din punctul de origine al cutremurului - focarul sau hipocentrul - şi se răspândesc în toate direcţiile. Proiecţia focarului la suprafaţa Pământului poartă numele de epicentru, locul în care sunt resimţite, de regulă, efectele maxime.

În studiul seismicităţii se disting doi termeni fundamentali:

Hazardul seismic reprezintă probabilitatea producerii unui cutremur de o anumită magnitudine într-un anumit loc şi interval de timp. Acesta se exprimă prin parametri care caracterizează mişcarea terenului - acceleraţie, viteză sau deplasare - şi este cartografiat în hărţi de hazard seismic.

Riscul seismic reflectă probabilitatea ca efectele sociale, economice sau materiale ale unui cutremur să atingă sau să depăşească anumite valori aşteptate într-un interval de timp. Riscul depinde atât de hazard, cât şi de vulnerabilitatea populaţiei, calitatea construcţiilor, densitatea urbană şi nivelul de pregătire al comunităţii.

Elementele unui seism

Pentru a înţelege de ce apar cutremurele, este necesar să revedem natura dinamică a planetei noastre. Mişcarea plăcilor tectonice modelează continuu suprafaţa Pământului, generând formarea şi distrugerea bazinelor oceanice, ridicarea munţilor şi deformarea scoarţei terestre. Cele mai multe cutremure se produc la *limitele plăcilor litosferice*, acolo unde apar fracturi numite *falii*.

O falie este o ruptură în scoarţă, de-a lungul căreia rocile se deplasează unele în raport cu altele. De exemplu, rocile situate la vest de celebra falia San Andreas din California s-au deplasat în ultimele milioane de ani cu aproximativ 450 km spre nord. În contrast, alte mii de falii prezintă deplasări de mai puţin de 1 km în aceeaşi perioadă. Unele falii sunt active şi pot genera cutremure puternice, în timp ce altele pot fi considerate inactive, neafişând mişcări semnificative în ultimele milioane de ani.

Deşi scoarţa terestră pare solidă şi stabilă, plăcile tectonice sunt într-o mişcare continuă. Uneori alunecarea este lentă şi continuă; alteori, blocajele

dintre plăci acumulează tensiune până când rocile cedează brusc, producând cutremurul.

Intensitatea unui seism se exprimă, în mod clasic, prin *scala Richter*, dezvoltată în 1935 de Charles F. Richter. Cutremurele mici, sub 3,5 grade, de regulă nu sunt resimţite. Cele puternice, de peste 8 grade, pot distruge oraşe întregi. Deşi cutremurele nu pot fi prevenite, măsurarea acumulării de tensiuni de-a lungul faliilor şi analizarea seismelor trecute permit estimarea probabilităţii unui viitor eveniment major.

Undele seismice. În momentul în care rocile blocate de-a lungul unei falii se rup, punctul în care are loc ruperea se numeşte *focar*. De aici pornesc vibraţiile - *undele seismice* - care se propagă în toate direcţiile. Forţa unui cutremur este maximă în epicentru, zona de la suprafaţă situată direct deasupra focarului. Cele mai distructive sunt cutremurele cu focare superficiale, situate la adâncimi sub 65 km.

Energia seismică se transmite prin trei tipuri principale de unde (figura 4.1):

Undele P (primare)

- sunt cele mai rapide şi primele înregistrate de seismografe;
- sunt unde longitudinale: particulele vibrează paralel cu direcţia de propagare;
- pot traversa atât mediile solide, cât şi lichidele.

Undele S (secundare)

- sosesc după undele P şi sunt mai lente;
- sunt unde transversale: particulele vibrează perpendicular pe direcţia de propagare;
- nu se propagă prin lichide;
- provoacă de obicei cele mai mari distrugeri structurale.

Undele de suprafaţă (Love şi Rayleigh)

- se propagă la suprafaţa Pământului;
- sunt cele mai lente, dar şi cele mai distructive pe distanţe mari;
- combină vibraţii longitudinale şi transversale, ceea ce determină mişcări complexe: înainte - înapoi şi sus - jos.

Aceste unde, combinate, determină modul în care solul se mişcă în timpul unui cutremur şi explică diferenţele dintre zonele afectate chiar în cadrul aceluiaşi eveniment seismic.

Viteza cu care undele seismice se deplasează prin Pământ depinde în mod direct de densitatea şi rigiditatea materialelor prin care trec. În straturile

superficiale, undele de suprafaţă au, în general, timpi de sosire ce cresc aproape liniar cu distanţa faţă de focar, deoarece se propagă cu o viteză relativ constantă în zonele puţin adânci ale scoarţei.

În interiorul Pământului, undele P (primare) se deplasează cu:

- 5-6 km/s în crusta continentală;
- aproximativ 8 km/s în rocile mai dense şi mai rigide ale mantalei.

Undele S (secundare) au viteze mai reduse:

- ≃3.5 km/s în crustă;
- ≃4.5 km/s în manta.

Aceste diferenţe se datorează proprietăţilor elastice ale materialelor: rocile compacte, bine cimentate, permit transmiterea rapidă a undelor, în timp ce materialele afânate - precum nisipurile, pietrişurile sau depozitele mlăştinoase - atenuează viteza de propagare

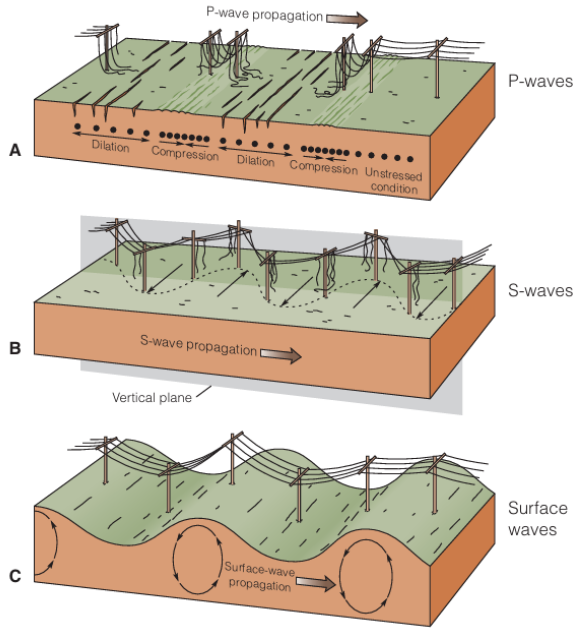


Figura 4.1. Tipuri de unde seismice (Hyndman & Hyndman, 2017)

Deşi undele seismice se propagă mai încet în materiale necoezive, efectul lor destructiv este mai mare. Acest lucru poate părea contraintuitiv, dar explicaţia este bine cunoscută în ingineria seismică:

- materialele afânate amplifică vibraţiile solului,
- straturile moi funcţionează ca un rezonator, crescând durata mişcării terenului,
- solurile saturate pot suferi lichefiere, pierzând temporar coeziunea.

Astfel, acolo unde rocile compacte transmit undele rapid şi „curat", sedimentele necoezive transformă mişcarea seismică în oscilaţii mai mari şi mai îndelungate, mult mai dăunătoare pentru construcţii.

Conform clasificării sintetizate de Grecu (2009), dacă riscul seismic în roci cristaline compacte este considerat 1, atunci el creşte astfel:

- 1 ... 2.4 în roci sedimentare cimentate;
- 2.4 ... 4.4 în nisipuri umede;
- 4.4 ... 11.6 în rambleuri;
- ≃12 în terenuri mlăştinoase.

Această ierarhie demonstrează că *vulnerabilitatea terenului* joacă un rol esenţial în manifestarea efectelor seismice.

Atunci când oamenii simt un cutremur sau când un seismograf înregistrează mişcarea solului, întrebarea firească este:

„Cât de mare a fost?"

Răspunsul poate fi dat în două moduri:

Intensitatea - descrie efectele resimţite de oameni, clădiri şi mediul înconjurător. Este o evaluare calitativă, variabilă în spaţiu, legată direct de condiţiile locale şi de tipul solului.

Magnitudinea - măsoară cantitatea totală de energie eliberată în focar. Este o valoare unică pentru fiecare cutremur, indiferent unde este măsurată. Scala de magnitudine, introdusă iniţial de Charles F. Richter, permite compararea cutremurelor din întreaga lume.

Prin urmare, intensitatea ne arată ce simţim, iar magnitudinea ne arată ce s-a întâmplat cu adevărat în interiorul Pământului.

Intensitatea cutremurelor. Primele încercări sistematice de evaluare a intensităţii cutremurelor au apărut după Marele Cutremur de la Lisabona din 1755 - unul dintre cele mai devastatoare evenimente seismice din istoria Europei. În lipsa instrumentelor moderne, arhiepiscopul Portugaliei a trimis atunci o scrisoare fiecărui preot paroh, cerându-le să raporteze tipul şi gravitatea daunelor observate în comunităţile lor. Răspunsurile au fost apoi reunite într-o hartă ce ilustra distribuţia efectelor şi nivelul distrugerilor din întreaga ţară. Aceste demersuri reprezentau, fără să o ştie autorii lor, începutul conceptului de *intensitate seismică* - modul în care cutremurul este perceput şi măsurat la suprafaţă, în diferite locuri.

La începutul secolului XX, omul de ştiinţă italian *Giuseppe Mercalli* a transformat aceste observaţii dispersate într-un sistem formalizat: *Scala de intensitate Mercalli*, publicată în 1902. Spre deosebire de magnitudine, care

exprimă energia eliberată în focar, intensitatea Mercalli descrie *nivelul efectelor produse de cutremur asupra oamenilor, construcţiilor şi mediului*. Scala se bazează atât pe percepţia subiectivă – „cât de puternic a fost simţit cutremurul?" – cât şi pe evaluarea obiectivă a pagubelor (tabel 4.1).

Tabelul 4.1. Scara de intensitate Mercalli Modificat (Grecu, 2009)

Intensitate	Daune
I	Păsările şi animalele sunt neliniştite
II	Simţit numai de puţine persoane care se găsesc în repaus, în special la etajele superioare
III	Se simte de unele persoane din interiorul clădirilor
IV	Se simte de mai multe persoane din interiorul clădirilor şi de unele aflate în exterior
V	Se simte aproape de toată lumea. Mulţi sunt sculaţi din somn
VI	Se simte de toată lumea, mulţi se sperie şi fug din locuinţe, unele mobile grele se deplasează
VII	Cei mai mulţi oameni părăsesc locuinţele. Este perceput şi de persoanele aflate la volan. Stricăciuni considerabile în clădiri prost construite
VIII	Casele se deplasează pe fundaţiile lor. Pereţii uşori sunt aruncaţi în afară. Unii pereţi de cărămidă se prăbuşesc
IX	Panică generală. Stricăciuni considerabile şi în structuri special construite. Crăpături mari în teren
X	Sunt distruse cele mai multe structuri din cărămidă. Mari alunecări de teren
XI	Puţine clădiri din cărămidă rămân în picioare. Sunt distruse poduri. Şinele de cale ferată sunt îndoite puternic
XII	Distrugerea este aproape totală. Obiectele sunt aruncate în sus. Au loc modificări ale reliefului

Ulterior, pentru a reflecta mai bine particularităţile construcţiilor şi ale solurilor din America de Nord, scala a fost adaptată, luând astfel naştere Scala de Intensitate Mercalli Modificată (MMI), utilizată în prezent pe scară largă în Statele Unite şi în multe alte ţări.

În evaluările moderne, instituţii precum U.S. Geological Survey (USGS) trimit chestionare observatorilor din zonele afectate – fie ei profesionişti, fie martori calificaţi – şi utilizează aceste date pentru a crea *hărţi de intensitate*. Aceste hărţi combină observaţiile umane cu indicatori obiectivi ai daunelor, oferind o imagine detaliată a modului în care a fost resimţit cutremurul într-o anumită regiune.

Rezultatele evidenţiază, de regulă:

- intensităţi maxime în proximitatea epicentrului, unde energia ajunge cel mai concentrat;
- valori ridicate în zonele cu soluri moi sau afânate, care amplifică mişcările terenului.

Astfel, hărţile de intensitate MMI nu doar documentează efectele unui cutremur, ci contribuie şi la înţelegerea vulnerabilităţilor locale şi la dezvoltarea strategiilor de reducere a riscului seismic.

Magnitudinea cutremurului. Imaginaţi-vă că staţi pe malul unui lac într-o seară liniştită, privind reflexia unui munte în apa perfect nemişcată. Dintr-odată, suprafaţa se tulbură uşor. O undă circulară se apropie lent de mal. Privind doar valul ajuns la voi, nu puteţi şti dacă a fost provocat de un peşte sărit din apă la câţiva metri distanţă sau de un animal mare care a intrat în lac pe malul opus. Pentru a înţelege cu adevărat ce s-a întâmplat, ar trebui să ştiţi *de unde a pornit unda* şi *cum s-a atenuat în drumul ei*.

Această analogie ilustrează perfect *diferenţa dintre intensitate şi magnitudine*. Intensitatea ne descrie efectele cutremurului într-un anumit loc – cât de puternic a fost simţit, ce pagube a produs. Magnitudinea, în schimb, ne spune cât de mare a fost evenimentul în realitate, în focar, indiferent de locul în care îl percepem.

Această problemă a fost abordată în 1935 de seismologul american *Charles F. Richter*, de la Institutul de Tehnologie din California. El a propus o metodă complet nouă de apreciere a dimensiunii unui cutremur: *scara magnitudinii locale*, cunoscută popular drept *scara Richter*.

Richter a observat că amplitudinea undelor seismice înregistrate de un seismograf scade odată cu distanţa faţă de focar. Pentru a elimina acest efect, a standardizat măsurătoarea, considerând că: *„magnitudinea" reprezintă amplitudinea maximă a undei seismice înregistrată de un seismograf Wood–Anderson aflat la 100 km de epicentru.*

Pentru a gestiona diferenţele uriaşe dintre amplitudinile observate, Richter a introdus o scară logaritmică:

- o creştere cu 1 unitate de magnitudine înseamnă o amplitudine de 10 ori mai mare pe înregistrarea seismografului;
- iar energia totală eliberată creşte de aproximativ 32 de ori.

Astfel, un cutremur de magnitudine 6 nu este doar puţin mai mare decât unul de magnitudine 5: este de peste 30 de ori mai energetic

Limitările scării Richter. Puterea şocului resimţit într-un anumit loc depinde de:

- adâncimea focarului,
- distanţa până la epicentru,
- tipul de sol şi generaţia construcţiilor,
- direcţia propagării undelor.

Din această cauză, magnitudinea determinată prin metoda lui Richter este o *magnitudine locală* (M_L), specifică zonei în care se află instrumentul. Valorile obţinute în regiuni diferite nu pot fi comparate întotdeauna direct între ele, iar pentru cutremure mari scala tinde să devină saturată, subestimând energia reală. Aceste limite au condus la dezvoltarea unei noi scări (figura 4.2)

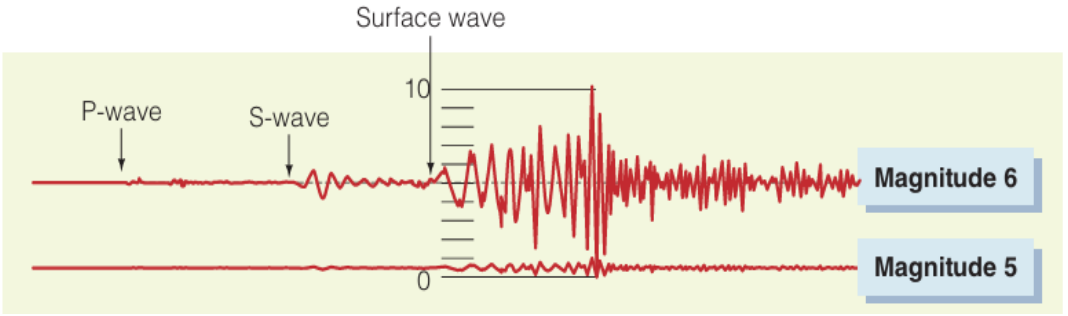


Figura 4.2. Scara Richter. Un cutremur cu magnitudinea 6 are o amplitudine de 10 ori mai mare decât un cutremur cu magnitudinea 5 din aceeaşi locaţie şi pe acelaşi seismograf. Această diferenţă este o creştere de 1 pe scara Richter. Axa orizontală a acestor seismograme este timpul, iar axa verticală este mişcarea solului înregistrată (Hyndman & Hyndman, 2017)

Magnitudinea momentului (Mw) - standardul modern. În anii 1970, seismologii au introdus magnitudinea momentului seismic (Mw), o scară fundamental diferită de metoda lui Richter. Aceasta se bazează pe caracteristicile fizice ale ruperii din focar:

- suprafaţa de rupere a faliei,
- distanţa cu care s-a deplasat blocul de rocă,
- rigiditatea rocilor.

Magnitudinea momentului măsoară direct *cantitatea totală de energie eliberată în cutremur*, devenind astfel un indicator global şi comparabil pentru toate tipurile de seisme, inclusiv pentru cele foarte mari, pe care scara Richter nu le descrie corect.

Deoarece necesită analiză detaliată a undelor seismice la nivel mondial, procesarea datelor poate dura zile sau chiar luni. Din acest motiv:

- imediat după cutremur, seismologii raportează *magnitudinea locală (M_L)*,

- iar ulterior, după analiza completă, este publicată *magnitudinea momentului (Mw)* – valoarea considerată oficială.

Astăzi, scara Mw este utilizată în toate aplicațiile științifice și în rapoartele internaționale, fiind singura care reflectă fidel dimensiunea reală a unui cutremur.

Tipuri genetice de seisme

Cutremurele pot avea origini diferite, în funcție de procesele fizice care determină acumularea și eliberarea bruscă a energiei în scoarța terestră. Deși pot exista cauze variate - tensiuni tectonice, activitate vulcanică, prăbușiri subterane, explozii artificiale sau chiar impacturi cosmice - aproximativ 90% dintre cutremurele înregistrate la scară globală sunt de origine tectonică. Când hipocentrul este localizat sub un bazin oceanic sau sub o mare, seismele pot genera tsunami.

Cutremurele de origine tectonică. Cele mai multe cutremure – aproape 90% dintre cele înregistrate la nivel mondial – sunt rezultatul mișcării plăcilor tectonice. Acolo unde scoarța Pământului se crapă, se întinde sau se ciocnește, tensiunea acumulată în roci se eliberează brusc, iar solul începe să vibreze. Fiecare tip de limită dintre plăci dă naștere unui peisaj seismic distinct.

De-a lungul dorsalelor medio-oceanice se caracterizează prin superficiale și moderate, rareori depășind magnitudinea 6 (pe scara Richter). Totuși, activitatea vulcanică ce însoțește acest proces este intensă, iar rifturile submarine sunt locuri în care Pământul „respiră” în mod continuu.

Imaginați-vă o cicatrice imensă, lungă de zeci de mii de kilometri, care brăzdează fundul oceanelor - acesta este sistemul dorsalelor medio-oceanice. Aici plăcile se depărtează una de alta, iar magma care urcă la suprafață umple spațiul creat.

De-a lungul faliilor transformante. Sunt zone în care două plăci alunecă lateral una pe lângă alta, asemenea a două blocuri uriașe care se împing și se freacă în timp ce se deplasează în direcții opuse.

În astfel de regiuni, precum falia San Andreas din California sau falia Anatoliană din Turcia, cutremurele sunt superficiale, dar pot fi extrem de puternice. Frecarea intensă dintre blocurile de rocă face ca eliberarea energiei să fie bruscă și violentă.

În zonele de subducție – fosele oceanice adânci De-a lungul marginilor Pacificului – cunoscut drept „Cercul de Foc” – cutremurele sunt dintre cele mai puternice de pe planetă. Aici o placă oceanică se scufundă sub o altă placă, alunecând pe un plan înclinat spre interiorul Pământului.

Cutremurele pot izbucni:

- aproape de suprafață,
- la adâncimi intermediare,
- sau chiar la peste 600 km în interiorul mantalei.

Această succesiune de focare dispuse pe un plan înclinat formează planul Wadati–Benioff, un adevărat „traseu seismic" al plăcii care se scufundă.

În astfel de zone s-au produs cutremure uriașe, precum Chile 1960, Alaska 1964 sau Japonia 2011.

În interiorul continentelor - zonele montane tinere. Acolo unde două continente se lovesc, apar munții. Iar acolo unde se ridică munții, apar și cutremurele. De-a lungul lanțurilor muntoase orogenice tinere, seismele sunt de obicei superficiale, dar pot apărea și la adâncimi intermediare, așa cum se întâmplă în zona Vrancea din Carpați. Sunt regiuni tensionate, unde continentele se împing unele pe altele, remodelându-și continuu marginile

Zonele relativ stabile. Există și locuri unde pământul stă aproape nemișcat. Scuturile geologice vechi - cum sunt Scandinavia, Groenlanda, Platforma Est-Europeană sau Australia - sunt regiuni de o stabilitate remarcabilă. Ele au depășit de mult fazele orogenice active și astăzi se mai cutremură doar rar și slab.

Cutremurele de origine vulcanică. În preajma vulcanilor, cutremurele capătă o altă poveste. Aici ele nu sunt rezultatul ciocnirii plăcilor tectonice, ci al mișcării magmei, al fracturării rocilor din jurul camerelor magmatice sau al vibrațiilor produse de gaze fierbinți care se strecoară prin fisuri. Deși, în general, au o energie mai redusă, aceste seisme sunt esențiale pentru prognoza erupțiilor

Cutremure vulcano-tectonice. Când magma urcă, presiunea sa rupe rocile din jur, ca un bolovan înfierbântat care forțează pereții unei camere. Aceste cutremure sunt scurte, zgomotoase din punct de vedere seismic și adesea anunță că vulcanul „se trezește".

Cutremure de frecare sau de volum. Aici magma și gazele se mișcă prin fisuri înguste, provocând vibrații lente, adânci și joase, asemenea sunetului produs de un lichid care curge sub presiune.

Cutremure hibride. Sunt semnul unei situații complexe: o combinație între rupere de roci și mișcare de fluide. Pe înregistrările seismice arată ca un dialog între două procese diferite.

Tremorul vulcanic. Nu este o lovitură unică, ci o vibraţie continuă, uneori care poate dura ore sau zile. Reprezintă unul dintre cele mai clare semnale că magma se află în ascensiune activă.

Cutremure de explozie. Apar în momentul în care vulcanul erupte efectiv. Energia care iese la suprafaţă este atât de puternică încât poate produce seisme locale care însoţesc explozia.

Cutremurele din zonele de subducţie În zonele de subducţie, o placă oceanică alunecă sub o alta, asemenea unei scânduri care se strecoară sub alta la presiune. Pe măsură ce coboară, placa întâlneşte temperaturi şi presiuni din ce în ce mai mari, devenind rigidă, tensionată şi predispusă la fracturare. De aceea, cutremurele din aceste regiuni apar:

- la suprafaţă, unde cele două plăci se ating,
- în interiorul plăcii care coboară,
- sau în zona în care începe formarea magmei.

Toate aceste focare dispuse în pantă formează zona Wadati-Benioff, un adevărat „fir roşu" al traiectoriei plăcii descendente.

Cele mai mari cutremure din istorie provin din aceste zone, pentru că suprafaţa de rupere este uriaşă, iar energia eliberată -colosală.

Cutremurele datorate unor cauze locale Există şi cutremure care nu au legătură directă cu tectonica globală. În zonele montane, în regiunile carstice sau în zonele unde s-au exploatat mine, apar seisme cauzate de prăbuşiri sau goluri subterane.

Deşi ele reprezintă doar aproximativ 3% din totalul seismelor, pot produce pagube considerabile dacă se produc în apropierea localităţilor.

Un exemplu dramatic este cutremurul din Skopje, 1963: magnitudinea nu a fost foarte mare ($M_{6.3}$), dar prăbuşirea sistemului carstic şi amplificarea locală a undelor au transformat evenimentul într-un dezastru major

Limitele plăcilor tectonice. Cutremurele nu apar la întâmplare. Ele urmează o logică profund legată de felul în care planeta noastră este alcătuită. Scoarţa terestră este împărţită în plăci tectonice uriaşe, care se deplasează lent, asemenea unor bucăţi plutitoare pe un ocean de rocă fierbinte (figura 4.3). Acolo unde aceste plăci se întâlnesc - fie că se ciocnesc, se depărtează sau se freacă lateral - Pământul îşi eliberează tensiunile interne sub forma cutremurelor. Pe limitele divergente, plăcile se depărtează una de alta, iar magma umple spaţiul creat: cutremurele sunt superficiale şi, în general, moderate. La limitele transformante, plăcile alunecă lateral, blocându-se şi

eliberând apoi energia brusc. Cutremurele pot fi foarte puternice, aşa cum se întâmplă în California, de-a lungul faliei San Andreas.

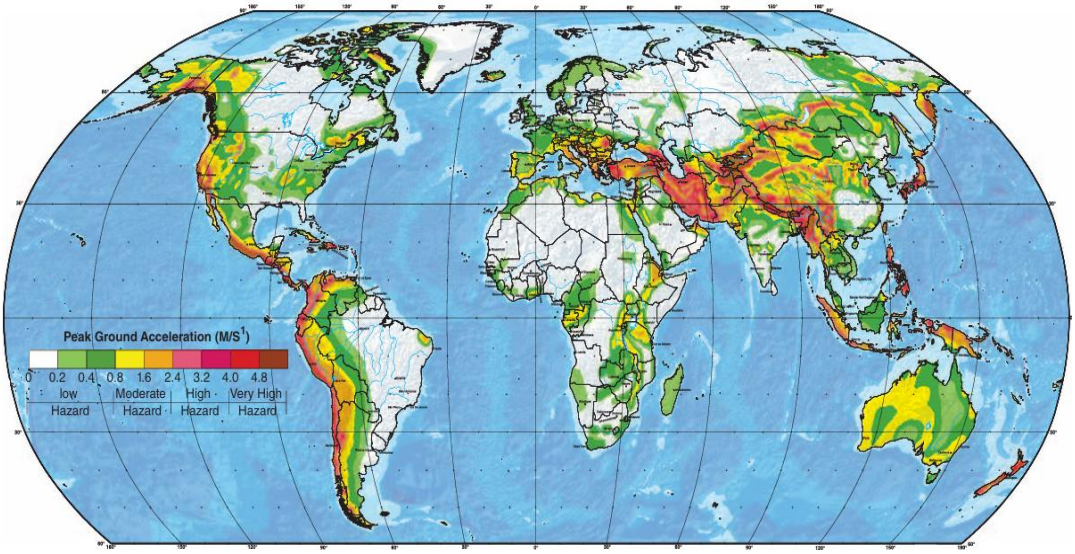


Figura 4.3. Harta riscului seismic. Acceleraţiile maxime (culorile roşu mai închis) corespund regiunilor cu cutremure puternice, de obicei de-a lungul zonelor de subducţie, cum ar fi cele de-a lungul coastelor de vest ale Americii de Nord şi de Sud şi zonele de coliziune continentală, cum ar fi sudul Europei şi Asia (Hyndman & Hyndman, 2017)

Cele mai violente cutremure, însă, apar la limitele convergente, în regiunile de subducţie - acolo unde o placă oceanică se scufundă sub o altă placă. Aici Pământul acumulează enorm de multă energie, iar eliberarea ei poate duce la evenimente catastrofale.

Cutremurele cu magnitudini de M_9 sau mai mari sunt rare şi extraordinare prin dimensiunile lor. Ele apar exclusiv în zone de subducţie, de-a lungul unor falii uriaşe numite "megathrust*"

În ultimul secol, toate cutremurele de această mărime au avut la bază astfel de zone.

Chile 1960 – cel mai mare cutremur măsurat vreodată

În 1960, Chile a fost lovit de un cutremur cu magnitudinea de $M_{9.5}$, cel mai puternic eveniment instrumentat din istorie. La acel moment, teoria plăcilor tectonice nici măcar nu fusese formulată, iar mecanismul care se ascundea în spatele unor astfel de cutremure gigantice nu era încă înţeles. Deşi au trecut decenii, amintirea distrugerilor şi a tsunami-ului declanşat atunci este încă vie în memoria comunităţilor afectate.

* o falie uriaşă de subducţie. Adică suprafaţa de contact dintre două plăci tectonice, acolo unde o placă oceanică alunecă sub o placă continentală (sau sub o altă placă oceanică)

Chile 2010 – un alt exemplu de megathrust

La 27 februarie 2010, aceeaşi regiune a Americii de Sud a fost zguduită de un cutremur de $M_{8.8}$, unul dintre cele mai mari din epoca modernă. De această dată, ştiinţa a putut explica mai bine mecanismul:

- Evenimentul a fost produs pe contactul dintre placa Nazca, care se deplasează spre est, şi placa Sud-Americană, care o suprapune.
- Placa Nazca se scufundă cu o rată de aproximativ 7 cm/an.
- Ruperea faliei a depăşit 500 km de-a lungul coastei, iar mişcarea bruscă a fundului oceanic a generat un tsunami care a lovit satele de coastă.

Deşi energia eliberată a fost enormă, bilanţul uman – aproximativ 500 de persoane - a fost mult mai mic decât în 1960 datorită sistemelor moderne de avertizare şi unei mai bune pregătiri a populaţiei.

Pe coasta de vest a Statelor Unite, falia San Andreas marchează graniţa dintre placa Pacifică şi placa Nord-Americană. Plăcile alunecă una pe lângă alta, în direcţii opuse, iar această mişcare constantă produce cutremure frecvente.

Un exemplu notabil este cutremurul de $M_{6.9}$ de la Loma Prieta din 1989, care a afectat zona San Francisco. Deşi nu a fost un cutremur foarte mare din punct de vedere al magnitudinii, impactul său a fost serios:

- 63 de persoane şi-au pierdut viaţa,
- peste 3.700 au fost rănite,
- pagubele materiale s-au ridicat la 5.6 miliarde de dolari.

Un detaliu interesant, rar menţionat, este că numărul victimelor ar fi fost mult mai mare dacă oamenii nu ar fi rămas acasă pentru a urmări meciul din World Series care avea loc în seara respectivă. Arena şi zonele aglomerate fuseseră deja evitate de mulţi locuitori.

Cutremurele de tip San Andreas sunt diferite de cele megathrust, dar nu mai puţin periculoase. Un cutremur de M8 sau mai mare în sudul Californiei ar putea provoca:

- pagube de peste 100 de miliarde de dolari,
- distrugerea masivă a infrastructurii,
- pierderea a câteva mii de vieţi omeneşti.

Cunoaşterea mecanismelor seismice, înţelegerea distribuţiei cutremurelor şi evaluarea probabilităţii producerii lor sunt esenţiale pentru planificarea urbană, pregătirea populaţiei şi reducerea pierderilor.

Harta riscului seismic arată distribuţia globală a acceleraţiilor maxime ale solului în timpul cutremurelor. Zonele colorate în roşu închis indică regiunile cu cea mai mare probabilitate de mişcări seismice puternice. Acestea se aliniază,

în general, de-a lungul zonelor de subducţie – precum coastele de vest ale Americii de Nord şi de Sud – dar şi în regiunile unde continentele se ciocnesc, cum sunt sudul Europei şi vaste părţi din Asia. Aceste zone reprezintă cele mai active şi mai periculoase regiuni seismice ale planetei (Hyndman & Hyndman, 2017).

...cu doar câteva clipe înainte ca pământul să înceapă să se cutremure, un băieţel de doi ani se juca voios în curtea casei. Descoperise cu mândrie cum să pornească aspersoarele de gazon, stârnind însă nemulţumirea mamei sale, care i-a spus să nu le atingă. Cum micuţul nu a ascultat, a fost dus în camera lui ca pedeapsă. La scurt timp după ce s-a întors în curte, Pământul a început să se cutremure. Ea a auzit copilul ţipând şi a fugit într-un suflet spre el. L-a găsit speriat, lipit de perete, iar după ce l-a calmat, micuţul a rămas tăcut toată după-amiaza, încă marcat de întâmplare. Când şi-a văzut tatăl, primele cuvinte ale copilului au fost emoţionante: "Tati, nu porni aspersoarele!" (Keller & DeVecchio, 2016, p. 119)

Efectele cutremurelor asupra mediului natural

Cutremurele sunt, poate, cele mai tulburătoare dintre toate fenomenele naturale. Ele izbucnesc brusc, fără avertisment, iar în doar câteva secunde pot schimba radical vieţi, peisaje şi structuri umane. Spre deosebire de alte procese naturale, cutremurele nu oferă timp pentru reacţie sau pregătire în momentul declanşării, iar impactul lor se resimte pe mai multe niveluri - fizic, psihologic şi social.

Primul semn al unui seism îl reprezintă mişcarea violentă a terenului. Solul începe să se zguduie, iar energiile eliberate în adâncuri se transmit spre suprafaţă sub forma unor unde care pot rupe falii, pot deschide fisuri şi pot deforma peisajul cu ridicări sau coborâri bruşte. În câteva momente, liniştea aparentă a reliefului poate fi perturbată de crăpături care se întind zeci sau sute de metri, iar construcţiile vulnerabile pot suferi avarii serioase.

După trecerea undelor principale, alte efecte se pot declanşa, uneori chiar mai distrugătoare decât vibraţia iniţială. În zonele montane sau pe versanţii instabili, cutremurul poate declanşa alunecări de teren, împingând mase uriaşe de roci şi sedimente la vale. În solurile saturate cu apă, particulele îşi pierd temporar coeziunea – fenomen cunoscut drept *lichefiere* - făcând ca terenul să se comporte ca un fluid, aşa cum s-a întâmplat la Niigata, în Japonia, în 1964. În mediul marin, o ruptură bruscă a fundului oceanic poate ridica sau coborî coloane întregi de apă, generând valuri gigantice - *tsunami-uri* - care pot călători mii de kilometri, aşa cum s-a întâmplat în 2011, la Tohoku.

Cutremurele pot, de asemenea, să dea naştere unor incendii sau explozii, mai ales atunci când infrastructura de gaz sau electricitate este afectată. Multe dintre distrugerile istorice severe - precum cele din San Francisco în 1906 sau Kobe în 1995 - au fost amplificate de astfel de incendii post-seism. Dincolo de pierderile materiale, impactul social este adesea dramatic: clădiri prăbuşite, oameni răniţi sau dispăruţi, familii evacuate, comunităţi întregi rămase fără adăpost. Trauma psihologică se poate întinde pe ani, iar costurile economice, cum s-a observat în Japonia în 2011, pot depăşi cu uşurinţă sute de miliarde de dolari.

De-a lungul istoriei geologice, cutremurele au făcut parte din „respiraţia" naturală a planetei. Forţele interne ale Pământului - cele care pun în mişcare plăcile tectonice şi alimentează vulcanii - au remodelat de-a lungul a miliarde de ani atât continentele, cât şi adâncurile oceanelor. Energia eliberată în timpul unui seism străbate atât interiorul, cât şi partea superficială a scoarţei, schimbând local poziţia rocilor, modificând structuri geologice şi generând procese de instabilitate.

Rocile şi sedimentele, aparent solide, îşi pot schimba brusc comportamentul sub efectul undelor seismice, devenind instabile, fluidizate sau mobile. Pe uscat, cutremurele pot fractura solul, pot modifica cursuri de apă sau pot schimba conturul versanţilor; pe fundul oceanelor, ruptura poate ridica sau coborî blocuri de rocă suficient de mari pentru a genera valuri uriaşe.

Astfel, cutremurele nu sunt doar episoade trecătoare de vibraţie; ele sunt expresia directă a dinamicii interne a planetei. Prin ele, Pământul îşi reconfigurează continuu suprafaţa, iar procesele declanşate - atât în adâncuri, cât şi la suprafaţă - pot avea consecinţe ce se resimt mult timp după ce zguduirea iniţială s-a oprit.



Figura 4.4 Formaţiuni geologice pe care sunt marcate cutele (sursa: http://all-geo.org/metageologist)

Cute şi falii. De-a lungul timpului, rocile din litosferă se comportă asemenea unor materiale elastice uriaşe. În interiorul lor se acumulează tensiuni, încet şi constant, pe măsură ce plăcile tectonice împing, trag sau răsucesc scoarţa terestră (figura 4.4). Atâta timp cât rezistenţa rocilor nu este depăşită, acestea se pot deforma treptat, asemenea unui covor împins de la capăt. Dar când tensiunea

devine prea mare, ele cedează brusc, se rup şi se deplasează - momentul în care se produce un cutremur.

Cutele sunt deformări elegante ale straturilor geologice, curbe care seamănă cu faldurile unui covor împins de o forţă invizibilă. Ele se formează atunci când rocile sunt comprimate pe perioade geologice foarte lungi, fără să se rupă.Cel mai uşor le putem observa în zonele montane, în deschiderile de la marginea drumurilor sau în pereţii abrupţi ai văilor. Forma lor ne spune povestea unor munţi care s-au ridicat prin compresie, strat după strat, de-a lungul a milioane de ani.

Faliile – rupturile bruşte ale scoarţei. Dacă cutele sunt rezultatul unei presiuni lente, faliile sunt marcajele unei cedări bruşte. O falie este o ruptură adâncă în scoarţa terestră, un plan pe care două blocuri de rocă se deplasează unul faţă de altul. Mişcarea poate fi verticală, orizontală sau o combinaţie între cele două. Indiferent de direcţie, fiecare falie păstrează în ea energia unui conflict tectonic.

O falie normală se formează atunci când rocile sunt întinse. Imaginaţi-vă scoarţa trasă în direcţii opuse, până când unul dintre blocuri alunecă în jos sub propria greutate. Acest proces poate crea văi lungi, coborâri ale zonelor de coastă sau depresiuni extinse. Dacă deplasarea se produce brusc, eliberarea de energie poate genera un cutremur. La rândul său, un cutremur deja produs poate reactiva o falie existentă, determinând deplasări suplimentare.

În cazul faliilor inverse, lucrurile se petrec exact invers: blocul de rocă situat deasupra planului de falie este împins în sus, peste cel inferior. Când planul faliei este atât de înclinat încât devine aproape orizontal, rocile pot fi „împinse” pe distanţe mari peste alte formaţiuni, formând ceea ce geologii numesc falii de încălecare - adevărate suprapuneri tectonice care au modelat marile lanţuri muntoase ale lumii.

Există şi falii în care deplasarea se produce mai ales orizontal. Acestea sunt faliile laterale. Ele nu ridică sau coboară blocuri de rocă, ci le deplasează într-o parte, asemenea a două plăci glisante. Deşi nu creează diferenţe de nivel, aceste falii pot elibera cantităţi impresionante de energie, aşa cum se întâmplă de-a lungul faliei San Andreas din California..

Lichefierea solului. Lichefierea este unul dintre cele mai surprinzătoare şi periculoase procese care pot însoţi un cutremur. În mod normal, un sol saturat cu apă – precum nisipul sau sedimentele fine din zonele de coastă sau din câmpii – se comportă ca un material solid, capabil să susţină greutatea clădirilor şi a infrastructurii. Însă, atunci când undele seismice trec printr-un

astfel de sol, particulele care îl compun încep să se agite și să se ciocnească unele de altele. În câteva secunde, structura internă a solului se destabilizează, iar apa dintre particule împinge granulele în afară, făcând ca întregul amestec să se comporte ca un fluid.

Solul care, cu o clipă înainte, părea ferm și stabil se transformă într-o masă semilichidă, asemănătoare nisipurilor mișcătoare. Clădirile grele își pierd brusc suportul, încep să se încline, să se scufunde sau chiar să se răstoarne (figura 4.5). Fenomenul poate fi observat, la scară foarte mică, chiar și pe o plajă: la fiecare pas apăsăm nisipul ud, iar apa iese la suprafață. În timpul unui cutremur, același mecanism se produce la dimensiuni incomparabil mai mari.

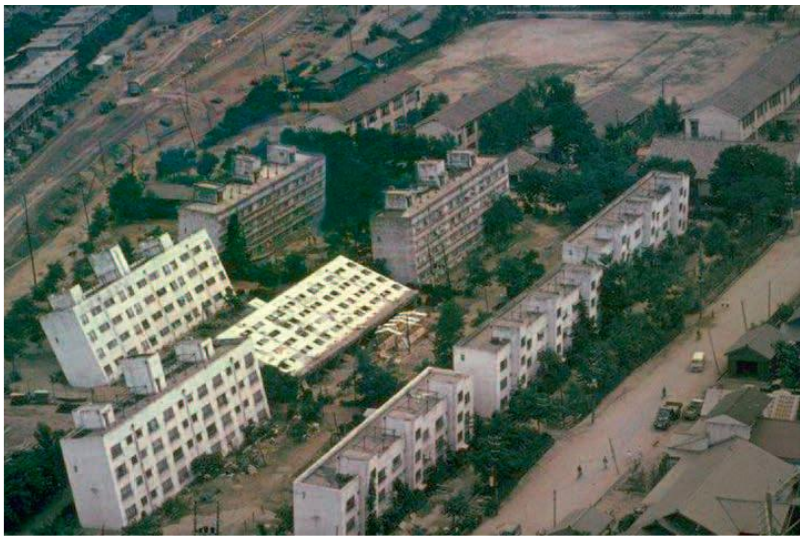


Figura 4.5 Daune provocate de lichefierea terenului în urma cutremurului din 1964, produs la Niigata, Japonia
(sursa: http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/selectpiclique/nigata64/tiltedbuilding.jpg)

Atunci când lichefierea are loc în zone populate, consecințele pot fi dramatice. Un exemplu celebru este cutremurul din Niigata (Japonia), din 1964, când clădiri întregi au fost răsturnate sau înclinate la unghiuri imposibile, rămânând în picioare doar datorită structurii lor flexibile. Fenomenul s-a repetat, la scară și mai mare, în Martie 2011, tot în Japonia, când lichefierea a afectat porturi, cartiere întregi și infrastructuri critice.

Lichefierea nu este doar un fenomen spectaculos, ci și o demonstrație a modului în care cutremurele pot transforma, în câteva clipe, un teren aparent solid într-un mediu instabil și periculos. Este una dintre cele mai mari provocări pentru ingineria seismică modernă și pentru planificarea urbană în zonele cu soluri nisipoase sau saturate cu apă.

Studiu de caz: Cutremurul din Japonia, martie 2011

Japonia este una dintre cele mai active regiuni seismice ale lumii. Deşi are o suprafaţă comparabilă cu cea a Californiei, ţara înregistrează anual aproximativ o mie de cutremure moderate, iar marile seisme sunt aproape o obişnuinţă. În ultimele două decenii, Japonia a fost lovită de 19 cutremure cu magnitudini între 7 şi 7.9, în timp ce Statele Unite au avut doar trei în aceeaşi perioadă – toate în Alaska, o regiune slab populată. În Japonia, chiar şi cutremurele de magnitudine 8 apar la intervale de câţiva ani.

Această activitate intensă a transformat ţara într-un adevărat laborator seismologic. Clădirile sunt proiectate atent pentru a rezista mişcărilor puternice, reţeaua de seismografe este cea mai densă din lume, iar sistemele de avertizare timpurie sunt integrate profund în funcţionarea societăţii. Pregătirea populaţiei este riguroasă, iar exerciţiile de simulare a cutremurelor fac parte din rutina obişnuită.

Totuşi, această maturitate în gestionarea riscurilor nu a apărut peste noapte. Un punct de cotitură a fost cutremurul din Kobe, 1995, cu magnitudinea 6.8, care a provocat moartea a aproximativ 6 500 de persoane, majoritatea surprinse în locuinţe sau sub dărâmături. Deşi Japonia introdusese coduri moderne de construcţie încă din 1981, multe clădiri mai vechi nu fuseseră niciodată modernizate, iar infrastructura critică s-a dovedit vulnerabilă. Lecţia a fost dură: Japonia a realizat că nu era atât de bine pregătită pe cât credea.

În anii care au urmat, guvernul a investit masiv în consolidarea clădirilor, modernizarea podurilor şi a drumurilor, precum şi în extinderea sistemelor de monitorizare. Peste un miliard de dolari au fost direcţionaţi către cercetare şi dezvoltare pentru crearea unui sistem modern de avertizare timpurie a cutremurelor – o investiţie care urma să salveze mii de vieţi în 2011.

Premise pentru un dezastru neaşteptat

Pe 9 martie 2011, reţeaua seismică japoneză a detectat un cutremur de magnitudine 7.2 în largul coastelor Tohoku. Seismologii nu au fost surprinşi: regiunea avusese, în ultimele 1100 de ani, numeroase cutremure asemănătoare, iar prognozele estimau o probabilitate de 60-70% pentru un astfel de eveniment în următorii 20 de ani. Nimic nu anunţa, însă, că acest seism avea să fie doar un preludiu.

În următoarele două zile au avut loc replici de mică intensitate, până când, pe 11 martie, la ora 14:46, echilibrul fragil dintre placa Pacificului şi placa Eurasiatică a cedat. În câteva zeci de secunde - un interval infim la scară geologică - placa Pacificului a alunecat sub Japonia cu 40-60 de metri, eliberând energia acumulată în secole. Rezultatul a fost cutremurul Tohoku 2011, cu magnitudinea 9.0 - unul dintre cele mai puternice cutremure înregistrate vreodată.

Avertizarea timpurie - de la teorie la practică

Sistemul japonez de avertizare timpurie, dezvoltat după 1995, a intrat în acţiune aproape instantaneu. La doar 8 secunde după detectarea undelor P, o alertă automată a fost transmisă către televiziuni, telefonia mobilă şi instituţiile critice. Trenurile de mare

viteză s-au oprit automat, centralele electrice s-au decuplat, iar populația a primit instrucțiunile standard de protecție.

Orașul Sendai, aflat cel mai aproape de epicentru, a avut aproximativ 10 secunde pentru a reacționa – puțin, dar suficient pentru ca oamenii instruiți să adopte pozițiile de siguranță. La Tokyo, aflat la peste 370 km distanță, locuitorii au beneficiat de aproximativ 80 de secunde până la sosirea undelor S (figura 4.6). În contextul unui cutremur major, acest interval este uriaș și a contribuit decisiv la evitarea unui număr mult mai mare de victime.



Figura 4.6 Harta părții de nord a insulei principale a Japoniei, Honshu, ilustrând intensitatea tremurului cauzat de cutremurul din 11 martie 2011
(sursa: https://www.britannica.com/event/Japan-earthquake-and-tsunami-of-2011)

După șocul principal – replici, lichefiere și alunecări de teren

Cutremurul de magnitudine 9.0 a fost urmat de aproximativ 10.000 de replici. În primele șapte zile s-au înregistrat 2000, iar 39 dintre acestea au depășit magnitudinea 6. Trei au avut magnitudinea 7 sau mai mare, declanșând din nou alarma de avertizare timpurie.

Clădirile ridicate sau consolidate după 1995 au rezistat remarcabil de bine. În multe cazuri, chiar și structurile avariate au rămas în picioare suficient timp pentru ca oamenii să se evacueze în siguranță. Totuși, alte fenomene declanșate de cutremur au provocat distrugeri importante:

- *lichefierea solului, care a avariat rețele subterane și fundații;*
- *aproximativ 4000 de alunecări de teren, majoritatea în zone montane;*
- *prăbușirea unui baraj de pământ, soldată cu victime în comunitatea aflată aval.*

Dar cea mai devastatoare consecință a cutremurului a fost, fără îndoială, tsunami-ul uriaș, ale cărui valuri au depășit în multe locuri orice prognoză anterioară.

Lecţii învăţate dintr-un dezastru istoric

Cutremurul şi tsunami-ul din Tohoku reprezintă cel mai costisitor dezastru natural din istorie, cu pagube estimare la peste 200 de miliarde de dolari. Dar, în ciuda magnitudinii sale, evenimentul a demonstrat că investiţiile Japoniei în cercetare, educaţie şi infrastructură au salvat nenumărate vieţi.

Datele oferite de reţeaua seismică ultra-densă a Japoniei au permis, pentru prima dată, înregistrarea detaliată a unui megaseism. Seismologii au obţinut informaţii preţioase despre modul în care plăcile interacţionează în zonele de subducţie şi despre motivele pentru care cutremurul şi tsunami-ul au depăşit orice aşteptare.

Astăzi, aceste date sunt folosite pentru a îmbunătăţi modelele globale de prognoză seismică. Lecţiile extrase din Tohoku - la fel ca cele din Kobe, 1995 - vor continua să salveze vieţi nu doar în Japonia, ci în întreaga lume.

Cutremurul din 11 martie 2011 rămâne un exemplu emblematic al fragilităţii noastre în faţa naturii, dar şi al puterii cunoaşterii, pregătirii şi rezilienţei.

Cutremurul din 11 martie 2011 a oferit seismologilor, societăţii japoneze şi lumii întregi una dintre cele mai complexe şi mai valoroase lecţii despre modul în care hazardurile naturale pot fi înţelese, anticipate şi gestionate. Analizat prin prisma celor cinci concepte fundamentale, evenimentul dezvăluie atât limitele cunoaşterii noastre, cât şi puterea pe care o au pregătirea şi investiţiile în reducerea riscurilor.

1. Ştiinţa ne ajută să prezicem hazardurile. Regiunea Tohoku este una dintre cele mai monitorizate din lume, iar Japonia dispune de o istorie seismică bine documentată. Pe baza acestei arhive, specialiştii estimau o probabilitate ridicată pentru producerea unui cutremur de magnitudine 7 în următorii 20 de ani. Seismul de 7.2 din 9 martie 2011, detectat prompt de reţeaua densă de seismografe, părea să se înscrie perfect în aceste aşteptări.

Totuşi, în ciuda instrumentelor moderne şi a unei baze vaste de date, magnitudinea reală a cutremurului principal a depăşit cu mult prognozele. Lipsa unor evenimente istorice de magnitudine apropiată în această porţiune a zonei de subducţie a contribuit la subestimarea riscului. Japonia a anticipat corect faptul că un seism major era probabil, dar a subestimat dimensiunea maximă pe care acesta o putea atinge.

2. Cunoaşterea riscurilor ajută oamenii să ia decizii. Înainte de 2011, scenariile de risc pentru Tohoku se bazau pe ideea că seisme de magnitudine 7 sau 7.5 reprezentau cel mai probabil pericol. Un cutremur de magnitudine 9 nu era considerat realist, tocmai pentru că nu fusese înregistrat niciodată în trecut. Această percepţie a influenţat standardele de proiectare, planurile de evacuare,

precum şi măsura în care comunităţile erau conştiente de un posibil eveniment extrem.

Subestimarea riscului nu a însemnat lipsă de pregătire, ci o orientare către un scenariu prea modest pentru realitatea tectonică a regiunii. Tohoku a demonstrat că evaluarea riscurilor trebuie să includă şi scenarii rare, chiar dacă par improbabile, pentru că natura poate depăşi limitele pe care le considerăm posibile.

3. Hazardurile naturale sunt interconectate. Cutremurul din Tohoku este poate cel mai elocvent exemplu al modului în care un hazard natural declanşează un lanţ de fenomene secundare. Seismul a generat imediat un tsunami uriaş, cu efecte mult mai devastatoare decât vibraţia iniţială a terenului.

În acelaşi timp, solurile saturate au intrat în lichefiere, afectând fundaţii, reţele subterane şi cartiere întregi. În zonele montane, mii de alunecări de teren au blocat drumuri şi au distrus comunităţi, iar prăbuşirea unui baraj de pământ a făcut victime suplimentare. Aceste fenomene nu au acţionat izolat, ci s-au amplificat reciproc, transformând un cutremur major într-un dezastru de proporţii istorice.

4. Oamenii pot transforma hazardurile în catastrofe. Evenimentul din Japonia a ridicat şi o întrebare importantă: ce s-ar fi întâmplat dacă un cutremur de magnitudinea celui din Tohoku ar fi lovit o regiune dens populată din California? Într-o societate în care populaţia urbană creşte rapid, iar infrastructura se extinde continuu, un seism de magnitudine 9 ar putea provoca pagube incomensurabile - de ordinul sutelor de miliarde de dolari - şi pierderi de vieţi omeneşti mult mai mari.

Californienii trăiesc la rândul lor pe o limită tectonică majoră, dar riscurile cresc proporţional cu aglomerarea aşezărilor, cu vechimea clădirilor şi cu infrastructura foarte complexă. Exemplul Tohoku arată că un hazard natural poate deveni catastrofal acolo unde vulnerabilităţile umane sunt mari, chiar şi în societăţi dezvoltate.

5. Consecinţele hazardurilor pot fi minimizate. Dacă tragedia din 2011 a demonstrat ceva în mod clar, este faptul că investiţiile continue în cercetare, legislaţie şi educaţie salvează vieţi. Lecţiile învăţate după cutremurul din Kobe din 1995 au determinat Japonia să-şi modernizeze infrastructura, să consolideze clădirile mai vechi, să dezvolte un sistem sofisticat de avertizare timpurie şi să perfecţioneze instruirea populaţiei.

În 2011, toate aceste măsuri şi-au dovedit eficienţa: trenurile de mare viteză s-au oprit automat, centralele electrice s-au decuplat, iar milioanele de japonezi au primit avertizarea cu suficiente secunde înainte încât să adopte măsuri de protecţie. Deşi magnitudinea cutremurului a depăşit orice scenariu anticipat, numărul victimelor ar fi fost incomparabil mai mare fără aceste investiţii.

Evenimentul a arătat însă şi limitele pregătirii umane. Codurile de construcţii nu luaseră în calcul intensitatea reală a lichefierii, iar dimensiunea tsunami-ului a fost subestimată. Înţelegerea acestor limite a dus deja la noi îmbunătăţiri, iar datele obţinute în 2011 stau astăzi la baza unor modele seismice mult mai robuste, utilizate pe scară globală.

Prevenirea şi reducerea riscurilor seismice

De-a lungul istoriei, cutremurele au avut puterea de a distruge oraşe întregi şi de a schimba cursul comunităţilor. Într-o lume în care tot mai multe populaţii trăiesc în zone urbane dense, un cutremur distructiv poate provoca, în câteva minute, pierderi uriaşe de vieţi omeneşti şi pagube economice incomensurabile. De regulă, oamenii nu sunt răniţi de cutremur în sine, ci de ceea ce acesta pune în mişcare: clădiri care se prăbuşesc, poduri care cedează, conducte sparte, incendii sau epidemii izbucnite după avarierea infrastructurii.

Istoria reţine numeroase astfel de exemple. La San Francisco, în 1906, nu vibraţia terenului a provocat cele mai multe distrugeri, ci incendiile care au izbucnit ulterior şi care au ras de pe faţa pământului cartiere întregi. În lipsa apei potabile şi a serviciilor funcţionale, zilele care urmează unui cutremur major sunt adesea marcate de contaminarea surselor de apă, scurgeri din reţelele de canalizare şi riscuri sanitare care, în trecut, au dus chiar la epidemii.

Pentru a preveni transformarea unui hazard natural într-o catastrofă umană, societăţile moderne se bazează pe o combinaţie de intervenţii – tehnice, instituţionale şi educaţionale.

Măsuri structurale – cum construim pentru a rezista

Primul pas în reducerea riscului seismic este proiectarea inteligentă a clădirilor. Construcţiile moderne sunt gândite astfel încât să se „mişte” odată cu undele seismice, fără să se prăbuşească. Materiale flexibile, sisteme de amortizare a vibraţiilor, izolatoare de bază sau cadre metalice elastice pot transforma o clădire rigidă într-una capabilă să reziste şocurilor.

În oraşele cu risc major, modernizarea infrastructurii vechi este esenţială. Multe structuri ridicate înaintea introducerii normelor antiseismice conţin zidărie portantă fragilă, acoperişuri grele şi pereţi exteriori fixaţi precar. În

timpul unui cutremur, asemenea elemente se pot desprinde sau prăbuși, provocând pierderi grave. Podurile și parcările supraterane pot fi, de asemenea, vulnerabile: platformele lor, proiectate să se dilate odată cu schimbările de temperatură, nu sunt întotdeauna bine ancorate și pot aluneca de pe suporturi în cazul unei mișcări seismice puternice.

Măsuri non-structurale – cunoașterea terenului și reacția rapidă

Chiar și cele mai bune clădiri au nevoie de planificare și de informații corecte. De aceea, autoritățile actualizează periodic hărți ale hazardului și riscului seismic, monitorizează activitatea seismică prin rețele dense de instrumente și implementează sisteme de avertizare timpurie. Japonia oferă exemplul cel mai avansat: un sistem capabil să emită alerte în mai puțin de zece secunde după detectarea undelor P, oferind populației și infrastructurilor vitale un răgaz esențial.

Planurile de răspuns rapid – de la evacuarea școlilor, la oprirea automată a trenurilor sau închiderea centralelor electrice – fac diferența între o criză controlată și un dezastru extins.

Educație și conștientizare – comportament care salvează vieți

În marile cutremure, reacția oamenilor din primele secunde poate însemna diferența dintre viață și moarte. De aceea, educația publică este crucială. Populația trebuie să știe ce să facă înainte, în timpul și după cutremur: cum să-și asigure casa, cum să își protejeze familia, ce obiecte să fixeze sau să ancoreze, unde să se adăpostească și cum să evite panica. Simulările periodice, campaniile educative și comunicarea clară a autorităților construiesc o cultură a pregătirii care, în țări precum Japonia, s-a dovedit extrem de eficientă.

Măsuri instituționale – coordonare și viziune pe termen lung

Niciun oraș nu poate face față singur unui cutremur major. De aceea, reducerea riscului seismic necesită strategii naționale, colaborare între institute seismologice, protecția civilă și autorități locale, precum și investiții constante în cercetare, monitorizare și pregătire. Politicile publice bine coordonate asigură faptul că normele de construcții sunt aplicate, infrastructura este verificată și modernizată, iar informațiile ajung la timp în comunități.

În final, cutremurele nu reprezintă cauza directă a celor mai multe tragedii, ci vulnerabilitățile structurilor pe care le-am construit. Zidurile fragile, podurile neancorate corect, pereții exteriori fixați superficial – toate acestea transformă un fenomen natural într-o catastrofă umană. Reducerea riscului

seismic este, aşadar, o combinaţie între ştiinţă, inginerie, educaţie şi responsabilitate colectivă.

CE TREBUIE SĂ FACEȚI	CE NU TREBUIE SĂ FACEȚI
În timpul unui cutremur	
▪ Rămâneţi calm şi evaluaţi situaţia rapid. Panica poate agrava pericolele. ▪ Adăpostiţi-vă sub un obiect solid, cum ar fi o masă sau un birou robust, pentru a vă proteja de căderi de obiecte. Ţineţi-vă de obiect pentru stabilitate. ▪ Protejaţi-vă capul şi gâtul folosind braţele, o pernă, o carte sau orice alt obiect la îndemână. ▪ Rămâneţi în interior dacă vă aflaţi deja acolo. Staţi departe de ferestre, oglinzi, ziduri exterioare sau obiecte suspendate. ▪ Dacă sunteţi în pat, rămâneţi acolo şi protejaţi-vă capul cu o pernă, cu condiţia să nu fie obiecte periculoase deasupra dvs. ▪ Dacă vă aflaţi în aer liber, îndepărtaţi-vă de clădiri, copaci, stâlpi de electricitate sau alte structuri care ar putea să cadă. Staţi într-un spaţiu deschis. ▪ În vehicul, trageţi pe dreapta într-un loc sigur (departe de poduri, tuneluri sau linii electrice) şi rămâneţi în maşină până când tremuratul încetează.	▪ Nu fugiţi afară din clădire în timpul cutremurului. Multe victime sunt rănite de fragmente căzute de la clădiri, cum ar fi tencuială sau cărămizi. ▪ Nu folosiţi lifturile. Este posibil să rămâneţi blocat în ele în cazul unei pene de curent. ▪ Nu staţi în pragul uşilor, decât dacă sunteţi absolut sigur că este un cadru solid (în multe clădiri moderne, pragurile nu oferă protecţie suplimentară). ▪ Nu vă apropiaţi de ferestre, oglinzi sau dulapuri, deoarece acestea se pot sparge sau prăbuşi. ▪ Nu aprindeţi lumânări sau chibrituri. Scurgerile de gaz ar putea cauza explozii
După cutremur	
▪ *Asiguraţi-vă siguranţa personală*. Verificaţi dacă sunteţi rănit şi oferiţi prim-ajutor celor din jur, dacă este necesar. Staţi departe de zonele afectate care pot fi instabile sau nesigure. ▪ *Evacuaţi cu precauţie*. Ieşiţi din clădire, dar numai dacă este sigur, printr-o cale de evacuare bine marcată. Evitaţi scările deteriorate sau lifturile. Mergeţi către spaţii deschise, departe de clădiri, linii electrice şi alte structuri care ar putea cădea. ▪ *Verificaţi starea echipamentelor electrice şi de alimentare cu gaz*. Închideţi alimentarea cu gaz, electricitate şi apă, dacă observaţi scurgeri sau alte probleme. Fiţi atenţi la scurgerile de gaz (miros de gaz sau sunet de şuierat). Evacuaţi zona şi anunţaţi autorităţile. Evitaţi utilizarea surselor deschise de foc până când siguranţa este confirmată. ▪ *Ascultaţi şi urmaţi instrucţiunile autorităţilor.* Respectaţi regulile de evacuare sau ordinele de carantină stabilite.	▪ *Nu intraţi în clădiri deteriorate*. Evitaţi să vă întoarceţi în clădiri care par afectate structural până când experţii le evaluează siguranţa. ▪ *Nu folosiţi telefonul inutil.* Evitaţi apelurile neesenţiale pentru a păstra liniile libere pentru urgenţe. ▪ *Nu folosiţi maşina dacă nu este necesar*. Evitaţi să ocupaţi drumurile care sunt esenţiale pentru serviciile de urgenţă. ▪ *Nu distribuiţi informaţii neconfirmate*. Evitaţi să transmiteţi zvonuri sau ştiri false care pot provoca panică.

- *Pregătiți-vă pentru replici.* Întoarceți-vă în interior doar dacă autoritățile declară că este sigur. Fiți vigilenți pentru mișcări secundare (replici), care pot provoca daune suplimentare clădirilor instabile.
- *Contactați rudele sau prietenii*. Utilizați SMS-urile sau aplicațiile de mesagerie pentru a anunța familia că sunteți în siguranță. Liniile telefonice pot fi aglomerate.
- *Ajutați comunitatea.* Ajutați vecinii vulnerabili, cum ar fi persoanele în vârstă, copiii sau persoanele cu dizabilități.

Împărtășiți doar informațiile oficiale.

Prin aplicarea acestor principii, comunitățile pot transforma un eveniment imprevizibil într-un risc gestionabil și pot salva vieți chiar în cele mai dificile momente.

Autoevaluare

1. Enumeră câțiva dintre precursorii care ar putea indica un cutremur iminent.
2. Explică de ce cutremurele la limitele plăcilor de transformare, convergente și divergente sunt diferite.
3. Enumeră principalele efecte primare și secundare ale cutremurelor.
4. Explică modul în care cutremurele sunt legate de alte pericole naturale
5. Cum pot oamenii să minimizeze riscul de cutremure?
6. Dacă ați fi primarul unui oraș mare dintr-o zonă seismică și experții în cutremure v-ar informa că un cutremur cu magnitudinea de 7.5 va lovi orașul poimâine, ce ați face? Care sunt consecințele notificării publicului? Ce le-ai spune să facă? Care sunt consecințele ascunderii acestor informații?

Bibliografie recomandată

- Bobrowsky, P., 2013. *Encyclopedia of natural hazards.* New York: Springer.
- Grecu, F., 2009. *Hazarde și riscuri naturale.* București: Editura Universitară.
- Hyndman, D. & Hyndman, D., 2017. *Natural Hazards and Disasters, Fifth Edition*. Boston, USA: Cengage Learning.
- Keller, E. & DeVecchio, D., 2016. *Natural hazards: earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes*. Fourth Edition. University of California, Santa Barbara: Routledge.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021. *PreventionWeb.* [Interactiv] Available at: https://www.preventionweb.net/



Tsunami-ul din Oceanul Indian, care a lovit coastele mai multor țări din Asia de Sud și de Sud-Est în decembrie 2004

Sursa: https://britannica.com

TSUNAMI: FORMARE, EVOLUȚIE ȘI CONSECINȚE

Rezultatele învățării:

La finalul acestei unități de învățare, studenții vor fi capabili să:

- explice mecanismele de formare a tsunami-urilor, incluzând rolul cutremurelor de subducție, alunecărilor submarine și erupțiilor vulcanice.
- analizeze impactul unui tsunami asupra mediului natural și asupra societății, identificând atât efectele primare, cât și pe cele secundare.
- recunoască legăturile dintre tsunami și alte riscuri naturale, înțelegând caracterul lor în lanț.
- evalueze vulnerabilitatea comunităților, luând în considerare forma reliefului, densitatea populației, infrastructura și nivelul de pregătire.
- propună măsuri de prevenire și reducere a riscurilor, atât structurale, cât și non-structurale, și să argumenteze importanța culturii de pregătire și a cooperării internaționale.

Termeni cheie: tsunami, zonă de subducție, vulnerabilitate costieră, sistem de avertizare timpurie

Tsunami-urile sunt comune în unele regiuni de coastă și foarte rare în altele. Timp de ani de zile, oamenii de știință au încercat să facă publice sistemele de avertizare pentru tsunami în afara bazinului Oceanului Pacific, dar a fost nevoie de catastrofa tsunami-ului din Oceanul Indian în 2004 pentru ca guvernele și comunitățile să ia în serios pericolul tsunami. Cu toate acestea, așa cum se întâmplă adesea după astfel de catastrofe, traducerea conștientizării sporite a unui pericol în avertizare, pregătire și atenuare îmbunătățită se desfășoară într-un ritm lent.

Acest capitol explică tsunami-urile și prezintă pericolul pe care îl reprezintă pentru oameni.

Un cutremur puternic, cu magnitudinea 9, a avut loc în largul coastei Japoniei. Mișcarea verticală a fundului oceanic din timpul cutremurului a ridicat o cantitate mare de apă, creând valuri uriașe în larg. În apropierea orașului Sendai, sirenele de tsunami au pornit pentru a-i avertiza pe oameni să urce în locuri mai înalte. Cutremurul s-a simțit intens și...

De-a lungul istoriei, tsunami-urile au fascinat și înspăimântat omenirea deopotrivă, fiind printre cele mai spectaculoase, dar și cele mai distructive manifestări naturale ale planetei. Termenul provine din limba japoneză - tsu („port") și nami („val") - o referire directă la locurile în care aceste fenomene au fost observate și documentate cel mai des. Spre deosebire de imaginea populară a unui singur val uriaș, un tsunami reprezintă, în realitate, o succesiune de valuri generate de o perturbare bruscă și masivă a fundului oceanic, care pune în mișcare cantități uriașe de apă.

Deși în limbajul comun încă se folosește expresia „valuri de maree", aceasta este înșelătoare: tsunami-urile nu au nicio legătură cu mareele oceanice, controlate de atracția gravitațională a Lunii și a Soarelui. Originea lor se află în adâncul oceanului, în acele momente rare și violente în care scoarța terestră se rupe, se ridică sau se prăbușește, modificând brusc nivelul apei.

Cele mai multe tsunami-uri sunt generate de cutremure submarine puternice, în special în zonele de subducție, acolo unde o placă oceanică alunecă sub o placă continentală. Totuși, natura are și alte mecanisme capabile să producă astfel de valuri: erupțiile vulcanice explozive, alunecările de teren submarine, prăbușirea flancurilor insulelor vulcanice sau chiar impacturile cosmice. În ultimele decenii, combinația dintre observațiile satelitare, rețelele seismice globale și modelele numerice avansate a oferit o înțelegere mult mai detaliată a felului în care aceste valuri se formează, cum se propagă și cum interacționează cu relieful submarin.

Impactul unui tsunami depinde nu doar de intensitatea perturbării, ci și de forma țărmului, de adâncimea apelor de coastă și de gradul de pregătire al comunităților afectate. Evenimentele recente - Sumatra 2004 sau Tohoku 2011 – au demonstrat cu brutalitate că un singur tsunami poate provoca pierderi de vieți omenești de ordinul sutelor de mii și distrugeri materiale uriașe. Aceste tragedii au impulsionat dezvoltarea sistemelor de avertizare timpurie și a strategiilor internaționale de reducere a riscului, evidențiind un adevăr esențial: în fața unui tsunami, cunoașterea, educația și cooperarea globală sunt singurele instrumente capabile să reducă vulnerabilitatea oamenilor.

Definiție și mecanism de formare

Tsunami-ul reprezintă o serie de valuri marine de proporții excepționale, generate de deplasări bruște ale unei mari mase de apă, cel mai adesea ca urmare a cutremurelor submarine de mare magnitudine (≥7.5), dar și a erupțiilor vulcanice, alunecărilor de teren submarine sau a impactului meteoriților. Tsunami-urile se caracterizează prin lungimi de undă excepțional

de mari, care pot ajunge la zeci de kilometri, uneori depășind 100 km. În largul oceanului, înălțimea unui val tsunami este relativ mică, de până la 0.5 metri, însă acesta se deplasează cu viteze extrem de mari, ce pot atinge până la 700 km/h în ape adânci. Pe măsură ce valul ajunge în apele de coastă, unde adâncimea scade, viteza sa se reduce semnificativ, dar energia se concentrează, ducând la creșteri dramatice ale înălțimii valului, ceea ce poate provoca distrugeri severe în zonele de coastă.

Mecanismul de formare poate fi explicat simplu:

- un cutremur de subducție ridică sau coboară brusc fundul mării;
- această mișcare deplasează o coloană uriașă de apă;
- energia se propagă sub formă de unde gravitaționale, care se deplasează în ocean cu viteze de până la 700–800 km/h;
- pe măsură ce adâncimea scade în apropierea țărmului, viteza undei scade, dar înălțimea ei crește dramatic, transformându-se într-un val uriaș.

Apa deplasată în larg dă naștere primului val de tsunami, care lovește țărmul cu o forță considerabilă. Valurile următoare, care pot atinge înălțimi de zeci de metri, depind de specificul condițiilor locale. Aceste valuri colosale pot remodela dramatic țărmurile, provocând inundații extinse ce afectează atât regiunile de coastă, cât și zonele interioare mai îndepărtate. Ele erodează terenul, depozitează cantități semnificative de moloz și cauzează distrugeri masive asupra clădirilor și infrastructurii.

Procesul de formare și evoluție a unui tsunami. Mișcarea verticală a fundului mării inițiază un proces care duce în cele din urmă la impactul valurilor tsunami asupra țărmului.

Formare. Deplasarea verticală a fundului mării creează o perturbație inițială în coloana de apă. Înălțimile valurilor tsunami în largul oceanului sunt mici. Tsunami-urile generate de cutremurele oceanice nu au adesea mai mult de un metru sau doi înălțime departe în ocean, cu un maxim de aproximativ 15 m în apropierea epicentrului cutremurului.

Într-o zonă de subducție, litosfera oceanică se deplasează, în mod obișnuit, sub litosfera continentală. Deși plăcile tectonice se mișcă cu o viteză aproximativ constantă, limita dintre ele rămâne blocată mulți ani. În regiunile în care aceste plăci sunt blocate, marginea continentului este atrasă în jos și spre interiorul acestuia, pe măsură ce placa subdusă avansează dedesubt. Acest lucru face ca placa de deasupra să se îndoaie în sus, generând o bombare costieră, similară cu deformarea unei foi de hârtie atunci când marginea sa îndepărtată este trasă spre observator (figura 5.1). Atunci când zona blocată,

care se extinde de obicei pe o lungime considerabilă de-a lungul coastei, cedează brusc în urma unui cutremur, marginea continentului revine rapid la poziția sa inițială, deplasându-se în sus și spre ocean.

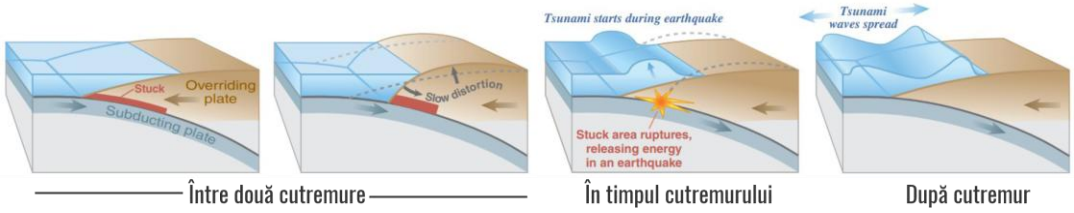


Figura 5.1. Secvența evenimentelor care creează un tsunami generat de un cutremur subacvatic

Propagarea. Unda tsunami se propagă în ocean cu viteze foarte mari, similar cu undele gravitaționale. Mecanismele care generează valurile tsunami sunt diferite de cele care determină formarea valurilor tipice, care sunt induse de vânt. Valurile create de vânt au lungimi de undă relativ scurte, motiv pentru care ating fundul mării doar aproape de țărm, apoi se înclină înainte și se sparg pe țărm. Valurile tsunami, pe de altă parte, au lungimi de undă extrem de mari, astfel încât ele interacționează cu fundul mării în întreaga întindere oceanică.

Lungimea medie de undă a unui val tsunami este de 360 km, astfel încât pantele de pe flancurile valurilor sunt extrem de blânde. Timpul dintre valuri, sau perioada, poate fi de o jumătate de oră. De exemplu, pentru un val cu o perioadă de 30 de minute, o navă ar trece de la val la creastă și înapoi la val în 30 de minute. O navă pe mare nici măcar nu ar observa un val atât de blând.

Apropierea de țărm: Pe măsură ce se apropie de țărm, adâncimea oceanului scade, iar unda tsunami se înalță dramatic, formând un val mare. Deoarece un tsunami interacționează cu fundul mării departe de țărm, își mărește amplitudinea (devine mai înalt) și se transformă într-un front abrupt de apă. Pe măsură ce se deplasează peste platforma continentală și se apropie de uscat, continuă să avanseze ca o viitură rapidă.

Tipuri de tsunami

Tsunami generat de cutremur. Cele mai multe tsunami sunt generate în timpul cutremurelor subacvatice de mică adâncime asociate cu ridicarea sau căderea bruscă a fundului mării, care deplasează un volum mare de apă. Se întâmplă atunci când fundul mării se află pe o porțiune a scoarței terestre care se ridică sau coboară brusc în timpul unui cutremur. Tsunami-urile generate de cutremure apar cel mai frecvent prin deplasarea fundului oceanic în urma

mişcărilor inverse sau de tip thrust* pe faliile zonelor de subducţie (şi ocazional pe faliile normale). Cutremurele de tip strike-slip† generează rar tsunami-uri deoarece nu deplasează o cantitate semnificativă de apă. De obicei, este necesar un cutremur de magnitudine 7.5 sau mai mare pentru a deplasa suficient fundul mării şi a genera un tsunami devastator

Secvenţa evenimentelor care creează un tsunami generat de o falie inversă sau de tip thrust subacvatică pe fundul oceanului este următoarea:

- *Fundul mării se ridică brusc*, împingând apa odată cu el: imaginează-ţi că fundul oceanului, dintr-o dată, se ridică ca un arc. Această mişcare bruscă împinge o masă mare de apă în sus (figura 5.2).
- *Suprafaţa mării coboară*, formând o depresiune: în acelaşi timp, în zona unde fundul mării s-a ridicat, se formează o depresiune, ca o adâncitură la suprafaţa apei.
- *Apa deplasată revine la suprafaţă*, formând creasta valului: apa care a fost împinsă în sus de ridicarea fundului mării începe să se retragă, revenind la nivelul iniţial. Această mişcare creează o creştere a nivelului apei, formând creasta unui val.

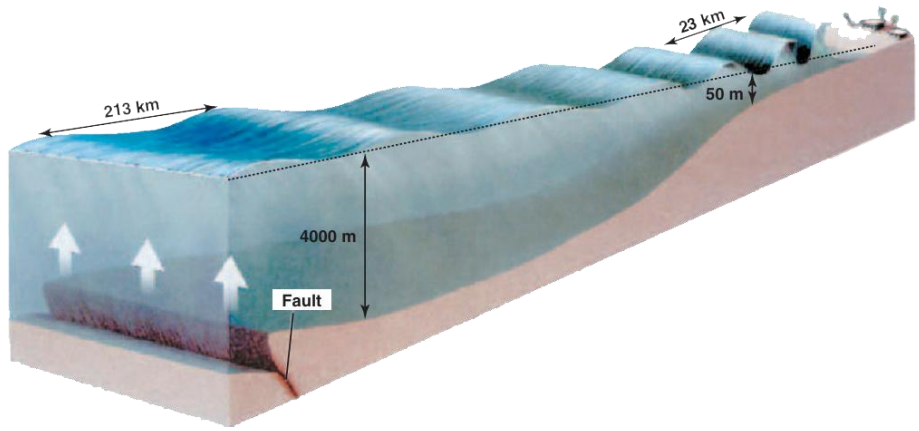


Figura 5.2. Valurile devin mai scurte ca lungime de undă şi mai mari ca înălţime înainte de a lovi ţărmul

- *Gravitaţia readuce nivelul apei la poziţia de echilibru*, trimiţând valuri în ambele direcţii: Gravitaţia trage apa înapoi, încercând să restabilească nivelul iniţial al mării. Această mişcare de "du-te-vino" creează o serie de valuri care se

* aceste falii implică mişcarea unui bloc de crustă terestră peste altul, rezultând o scurtare şi ridicare a scoarţei.

† cutremurele de tip strike-slip implică mişcarea laterală a blocurilor de crustă terestră de-a lungul unei falii verticale

propagă atât spre ţărm, cât şi spre larg, în ambele direcţii de la locul unde s-a produs cutremurul. Este ca şi cum ai arunca o piatră într-un lac – valurile se răspândesc în toate direcţiile.

Bombarea costieră suferă o scufundare bruscă, ceea ce duce frecvent la inundarea regiunilor litorale joase. Aceste zone rămân submerse până când procesele tectonice determină o nouă ridicare progresivă a scoarţei. Deplasarea bruscă a unui volum masiv de apă generează unde tsunami, care se propagă atât spre continent, cât şi în direcţia opusă, din locul în care au fost iniţiat.

Tsunami generat de erupţii vulcanice. Tsunami-urile pot fi cauzate şi de procese vulcanice care deplasează volume mari de apă. Apa este împinsă în sus sau în exterior de curgeri rapide de cenuşă vulcanică fierbinte sau de explozii vulcanice submarine într-o masă mare de apă. În plus, părţi ale unui vulcan se pot prăbuşi, alunecând în apă. Această alunecare masivă de teren deplasează o cantitate uriaşă de apă, declanşând un tsunami. Mai multe dintre aceste mecanisme pot avea loc la un singur vulcan. Tsunami-urile generate de erupţii vulcanice sunt uneori catastrofale, dar sunt încă slab înţelese; dimensiunea lor maximă este necunoscută. Nu ştim suficient despre mecanismul de deplasare a apei dintr-o erupţie subacvatică pentru a face mult mai mult decât să speculăm. Flancurile multor vulcani oceanici de mari dimensiuni, inclusiv cele ale Insulelor Hawaii din Oceanul Pacific şi ale Insulelor Canare din Oceanul Atlantic, par să se prăbuşească periodic, alunecând în ocean şi provocând deplasarea bruscă a unor volume de apă de ordinul a mii de kilometri cubi. Tsunami-urile rezultate pot atinge înălţimi de sute de metri.

Vulcanii, cum ar fi cei care alcătuiesc Insulele Hawaii, cresc de pe fundul mării timp de 200000 până la 300000 de ani înainte de a atinge nivelul mării. Apoi, construiesc un dom înclinat, destul de solid, deasupra nivelului mării, numit scut de lavă. Mega-alunecările de teren au loc spre sfârşitul etapei de formare a scutului, când rata de creştere este cea mai rapidă, greutatea rocilor de deasupra este cea mai mare, iar pantele sunt cele mai abrupte şi, prin urmare, cele mai puţin stabile. Partea inferioară a fiecărui vulcan, sub nivelul mării, este formată în mare parte din resturi vulcanice neconsolidate, formate atunci când lava care erupe s-a răcit în apa de mare şi s-a spart în fragmente. Aceasta are o rezistenţă mecanică redusă.

Tsunami de intensitate redusă pot fi generate de fluxuri piroclastice masive de noroi vulcanic care pătrund în mare în timpul erupţiilor explozive. Aceste tsunami se atenuează rapid, reducându-şi dimensiunea pe măsură ce se îndepărtează de vulcan şi, prin urmare, prezintă un risc mai scăzut comparativ

cu tsunami induse de cutremure de mare magnitudine. Mai mulţi vulcani activi din Arcul Aleutian, situat în sudul statului Alaska, au potenţialul de a produce astfel de tsunami prin acest mecanism.

Gândiţi-vă la un vulcan ca la un munte imens. Din vârful său, pornesc trei creste principale, ca nişte braţe care se extind în lateral. Din cauza greutăţii lor colosale, aceste creste se "desfac" uşor, formând zone de rift de-a lungul vârfurilor lor. În termeni mai simpli, crestele se lasă sub propria greutate, iar asta creează nişte "fisuri" sau "rupturi" numite zone de rift.

În cele din urmă, vulcanul se rupe în trei segmente uriaşe, aproximativ egale. Una sau mai multe dintre aceste "felii" de vulcan pot începe să se mişte încet spre mare. Fisurile dintre segmente asigură trecerea uşoară a magmei topite care se ridică la suprafaţă. Acele fisuri care devin locurile celor mai multe erupţii formează, de asemenea, „zone slabe” în vulcan.

Tsunami de la alunecări de teren sau căderi de pietre. Alunecările de teren care au loc pe fundul mării sau într-un lac pot genera tsunami, la fel ca şi prăbuşirile masive de pe versanţii muntoşi în mase mari de apă care pot deplasa cantităţi imense de apă şi pot genera tsunami. Te-ai putea aştepta ca înălţimea tsunami-ului să depindă în primul rând de volumul masei care deplasează apa. Cu toate acestea, un parametru mai important este înălţimea de cădere; căderile mai mari deplasează mai multă apă, deoarece materialul se mişcă mai repede atunci când loveşte apa.

În numeroase cazuri, astfel de alunecări sunt declanşate de cutremure. Un exemplu notabil este tsunami-ul devastator din iulie 1998, produs pe coasta de nord a Papua Noua Guinee. Acest tsunami a fost precedat de un cutremur cu magnitudinea 7.1, al cărui epicentru se afla sub fundul mării, la nord de insulă. Seismul a fost resimţit în laguna Sissano, situată la 50 km distanţă, iar la scurt timp după aceea, un tsunami cu valuri de până la 15 metri înălţime a lovit zona. Satele de coastă au fost distruse, lăsând 12000 de persoane fără adăpost şi provocând moartea a 2100 de oameni. Tsunami-ul a fost cauzat de o alunecare submarină declanşată de cutremur, evidenţiind impactul distructiv pe care îl poate avea un tsunami generat de un cutremur şi o alunecare de teren subacvatică din apropiere. Se consideră că, în absenţa acestei alunecări, cutremurul singur nu ar fi produs un tsunami de dimensiuni semnificative.

Un eveniment similar a avut loc pe coasta de est a Canadei în luna noiembrie a anului 1929. Un cutremur cu magnitudinea de 7.2, produs la extremitatea sudică a Grand Banks, la aproximativ 250 km sud de Newfoundland, a declanşat o alunecare submarină de mari dimensiuni, care, la

rândul său, a generat un tsunami. Undele tsunami s-au propagat prin Oceanul Atlantic, fiind înregistrate de marigrafe până în Carolina de Sud şi Portugalia. În Newfoundland, tsunami-ul a provocat distrugeri în peste 40 de comunităţi de coastă şi a cauzat pierderea a 27 de vieţi omeneşti.

Cea mai afectată zonă a fost Peninsula Burin. În seara zilei de 18 noiembrie, pe parcursul a aproximativ 30 de minute, trei valuri succesive au pătruns cu forţă prin canalele înguste şi în golfurile adiacente. Tsunami-ul a ridicat ambarcaţiuni mici şi goelete*, rupând lanţurile ancorelor şi proiectând navele pe uscat sau înghiţindu-le complet. Locuinţele au fost smulse de pe fundaţii, unele fiind distruse complet, în timp ce altele au fost purtate înainte şi înapoi de forţele apei în flux şi reflux. Impactul dezastrului a fost agravat de faptul că tsunami-ul a ajuns pe coastă în apropierea vârfului unei maree extrem de înalte.

Regiuni geografice expuse riscului de tsunami

Tsunami-urile reprezintă o ameninţare pentru toate regiunile oceanice ale lumii, deşi frecvenţa, intensitatea şi gradul de distrugere variază. Tsunami-urile din Oceanul Atlantic şi regiunea Caraibelor tind să fie mai mici, mai puţin frecvente şi mai puţin distructive decât cele din Oceanele Pacific şi Indian.

Deşi majoritatea ţărmurilor oceanice şi unele ţărmuri lacustre ar putea fi afectate de un tsunami, anumite coaste sunt supuse unui risc mult mai mare decât altele, datorită localizării lor în raport cu cutremurele, alunecările de teren şi vulcanii. Coastele situate în proximitatea unei zone de subducţie majore capabile să genereze cutremure de magnitudine 9 sunt cele mai expuse riscului. Aproximativ 85% dintre tsunami-urile înregistrate au avut loc în Oceanul Pacific, datorită asocierii lor cu cutremurele mari din zonele de subducţie care înconjoară o mare parte a Pacificului. Zonele cu cel mai mare risc de tsunami în bazinul Pacificului sunt Japonia, Kamchatka, Hawai, insulele din Pacificul de sud şi vestic, Chile, Peru, Mexic şi coasta Pacificului de nord-est, din Alaska până în nordul Californiei (figura 5.3). Alte regiuni considerate cu risc ridicat includ părţi ale Mediteranei şi estul Oceanului Indian.

Cel mai mare pericol de tsunami, cu perioade de revenire† de câteva sute de ani, este adiacent acelor zone majore de subducţie cu o convergenţă de câţiva

* nave cu pânze, de dimensiuni medii, caracterizate prin cel puţin două catarge şi vele dispuse preponderent în format „auric" (triunghiulare)

† perioada de revenire, cunoscută şi sub denumirea de perioadă de recurenţă, reprezintă intervalul mediu de timp estimat dintre evenimente extreme succesive de aceeaşi magnitudine

centimetri pe an. Acestea includ zona de subducţie Cascadia din nord-vestul Pacificului, şanţul chilian de-a lungul sud-vestului Americii de Sud şi zonele de subducţie din largul coastei Japoniei

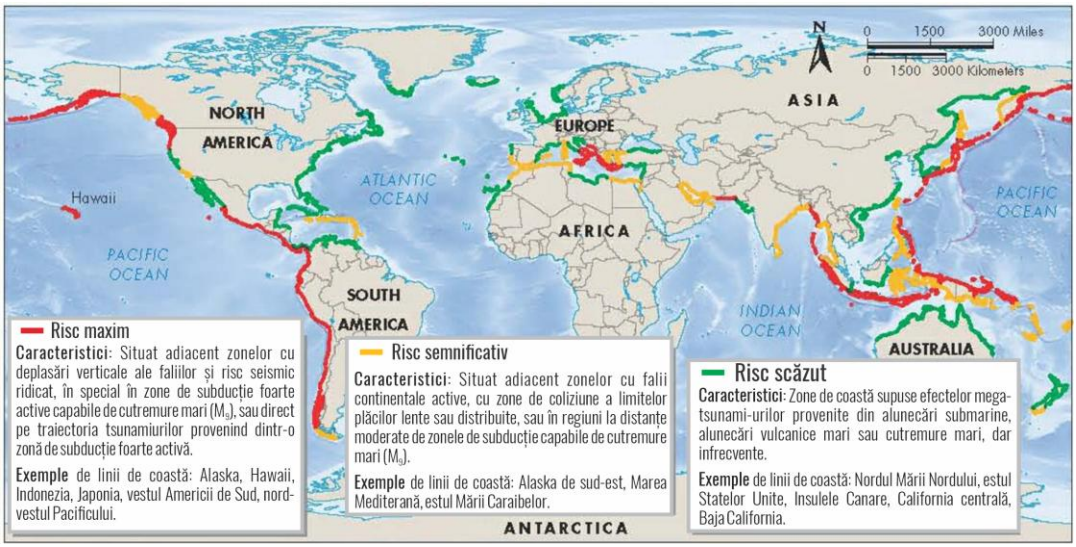
Anumite locaţii, precum Japonia şi Hawai, se confruntă cu tsunami-uri frecvente. Honshu, cea mai mare dintre insulele japoneze, este lovită de un tsunami de 10 m, în medie, o dată la 10 ani. Înregistrările istorice din Hawai, care datează din 1813, indică faptul că un tsunami măsurabil are loc acolo, în medie, o dată la doi ani. În contrast, alte zone, cum ar fi Golful Mexic şi coasta Atlantică a Statelor Unite, nu au cunoscut tsunami-uri semnificative în timp istoric.

...Pe 11 martie 2011, nord-estul Japoniei a fost zguduit de cel mai puternic cutremur înregistrat vreodată în această ţară. Tsunami-ul pe care l-a declanşat nu a devastat doar coasta pe câteva sute de kilometri. De asemenea, se află la originea dezastrului nuclear de la Fukushima. Cutremurul cu magnitudinea 9.0 a avut loc la ora 14:26 (ora locală) şi la o adâncime de 30 km, de-a lungul zonei de subducţie din largul coastei de est a oraşului Honshu. Focarul seismic a fost la 130 km est de oraşul de coastă Sendai şi la aproximativ 370 km nord de Tokyo. La nivel global, acesta este al patrulea cel mai puternic cutremur din ultimii 100 de ani. A provocat un tsunami de peste 10 metri înălţime şi chiar, în unele golfuri, un val de peste 40 de metri. Cu două zile mai devreme, a avut loc un cutremur precursor cu magnitudinea Mw 7.2, dintre care cea mai puternică replică (Mw 7.9) a avut loc la 40 de minute după cutremurul principal.

Tsunami-urile pot varia în înălţime, ajungând chiar şi la 30 m sau mai mult. Cele cu o înălţime de *run-up* de cel puţin 5 m sunt considerate tsunami-uri semnificative şi sunt frecvent produse de cutremure de magnitudine ridicată şi alunecări submarine asociate.

O evaluare a riscului global de tsunami clasifică riscul de la relativ scăzut la cel mai mare, bazându-se pe perioada de revenire a unui tsunami semnificativ (cel puţin 5 m *run-up*). Trebuie reţinut că această hartă este foarte generalizată, deoarece *run-up*-ul unui tsunami variază considerabil în funcţie de forma fundului mării imediat în larg şi de tipul de topografie şi vegetaţie spre interior de plajă. Atât topografia din larg, cât şi cea a liniei de ţărm pot accentua foarte mult înălţimea valului tsunami. De asemenea, nu se cunosc suficiente despre seismicitatea globală pentru a prezice cu exactitate perioadele de revenire a cutremurelor de M_9 sau mai mari - acele cutremure cel mai probabil să producă un tsunami semnificativ.

sau mai mare. Este utilizată frecvent în analiza riscurilor pentru fenomene rare şi extreme, cum ar fi inundaţiile, cutremurele, precipitaţiile extreme sau valurile de tsunami.



5.3. Harta riscului față de producerea unui tsunami de cel puțin 5m înălțime

Analiza hărții relevă că majoritatea zonelor de risc maxim înconjoară Oceanul Pacific. Acest lucru nu este surprinzător, având în vedere că majoritatea zonelor majore de subducție se găsesc la marginile Pacificului. Alte regiuni considerate cu cel mai mare risc sunt părți ale Mediteranei, precum și partea de nord-est a Oceanului Indian. Vestea bună despre riscul de tsunami-uri semnificative este că aproape toate vor provoca daune substanțiale doar la câțiva sute de kilometri de sursa lor. Cu toate acestea, cele mai mari cutremure din zonele de subducție pot provoca daune substanțiale la câteva mii de kilometri de sursă. Acesta a fost cu siguranță cazul cu tsunami-ul indonezian din 2004, care a traversat Oceanul Indian, provocând moarte și distrugere până departe, pe coasta de est a Africii. Cu toate acestea, cea mai mare parte a deceselor și a distrugerilor a avut loc mult mai aproape de epicentrul cutremurului.

Efectele tsunami-urilor și legăturile cu alte riscuri naturale

Tsunami-urile manifestă atât efecte primare, cât și secundare. Efectele primare sunt asociate cu impactul apelor invadatoare și al resturilor antrenate de acestea, precum și cu inundațiile și eroziunea rezultante. Energia apei turbulente, cu viteză mare de deplasare, este suficientă pentru a distruge plajele, cea mai mare parte a vegetației costiere, locuințele și alte clădiri. Aceste efecte se diminuează odată cu distanța de coastă. O mare parte din daunele aduse atât peisajului, cât și structurilor antropice rezultă din revenirea apei în ocean. Ceea ce rămâne adesea în urmă este un teren gol sau acoperit cu resturi. Majoritatea deceselor cauzate de tsunami sunt prin înec. Decesele și rănirile

rezultă, de asemenea, din impacturi fizice, fie de resturi plutitoare, fie prin a fi târât în obiecte staționare, cum ar fi clădiri sau copaci.

Uneori, un tsunami poate părea ca un val normal care se sparge la mal, doar că mult mai rapid și mult mai mare. Alteori, poate veni ca un zid imens de apă care se prăbușește cu o forță devastatoare, distrugând tot ce întâlnește în cale. Valul tsunami se prăbușește pe țărm, provocând inundații și distrugeri semnificative. Pe măsură ce valurile tsunami se apropie de țărm, gurile râurilor și golfurile de coastă acționează ca niște canale de concentrare, amplificând semnificativ înălțimea acestora. În situația în care tsunami-ul ajunge în perioada mareei înalte, înălțimea valurilor este amplificată și mai mult. Deplasându-se înainte și înapoi între malurile unui golf, valurile pot interfera unele cu altele, suprapunerea acestora conducând la formarea unor valuri și mai înalte. În plus, pe măsură ce valurile tsunami interacționează cu fundul oceanic, ele își modifică progresiv traiectoria, orientându-se perpendicular pe țărm. În cazul în care tsunami-ul înconjoară o insulă, valurile pot fuziona pe partea opusă, unde curburile lor converg, generând astfel valuri și mai mari.

Deoarece majoritatea orașelor de coastă și porturilor maritime sunt situate în golfuri, impactul distructiv al valurilor tsunami este amplificat în aceste regiuni. De exemplu, deși tsunami-ul din 1960 s-a generat în Chile, la o distanță considerabilă spre sud-est, iar Golful Hilo este orientat spre nord-est, refracția valurilor în jurul insulei a lăsat extremitatea interioară a golfului expusă unor valuri ce au atins 4 metri deasupra nivelului mării.

Un alt exemplu semnificativ a avut loc pe 12 decembrie 1992, când un cutremur cu magnitudinea 7.5 produs în Indonezia a generat un tsunami în Marea Flores. Coasta sudică a insulei Babi, situată în direcția opusă celei din care au venit valurile, a fost lovită de valuri de 26 de metri înălțime, de două ori mai mari decât cele care au afectat coasta nordică. În acest caz, valurile care au ajuns pe coasta nordică s-au divizat și s-au refractat în jurul insulei circulare, interferând și combinându-se pe coasta opusă. Acest eveniment a avut consecințe tragice, ducând la pierderea a peste 1000 de vieți omenești.

Pe de altă parte, geografia de coastă poate, în anumite cazuri, oferi protecție împotriva tsunami-urilor. Multe insule joase din Pacific și Caraibe sunt înconjurate de recife de corali situate în larg, care coboară abrupt în ape adânci. În aceste situații, valurile tsunami sunt forțate să se spargă pe recif, ceea ce oferă un anumit grad de protecție pentru insulele propriu-zise.

Când un val ajunge la țărm, se analizează caracteristicile run-up-ului, adică înălțimea maximă la care valul ajunge în timpul înaintării sale pe uscat. Run-up-

ul este întotdeauna mai mare decât înălţimea iniţială a valului şi variază în funcţie de distanţa faţă de zona de rupere a faliei, precum şi de tipul ţărmului lovit: fie o coastă deschisă, fie un golf.

Pentru cele mai mari cutremure, precum evenimentul de subducţie din Alaska din 1964 şi cutremurul din Chile din 1960, înălţimea run-up-ului a fost, în general, cuprinsă între 5 şi 10 metri deasupra nivelului normal al mareei. În anumite locaţii din Chile, run-up-ul a atins valori de până la 30 de metri. Nivelul apei se poate modifica rapid, uneori cu mai mulţi metri în doar câteva minute.

De obicei, un val de tsunami înaintează pe ţărm într-o direcţie perpendiculară pe linia crestei valului, după care se retrage înapoi în larg, urmând panta terenului. Marginea superioară a run-up-ului este adesea marcată de lemn plutitor, copaci smulşi şi resturi ale bărcilor, caselor şi vehiculelor. Chiar şi la mult timp după eveniment, dovezi ale unui tsunami trecut pot fi observate sub forma trimline-ului, o linie vizibilă pe versanţii muntoşi unde copacii înalţi de pe pantele superioare sunt brusc înlocuiţi de vegetaţie mult mai joasă în regiunile inferioare.

Tsunami-urile distructive de-a lungul istoriei au fost relativ frecvente, în special în bazinul Pacificului:

- cutremurul din 1755 ($\sim M_9$) de la Lisabona, Portugalia, a produs un tsunami care, împreună cu cutremurul şi incendiul rezultat, a ucis aproximativ 20.000 de oameni. Valurile tsunami care au traversat Oceanul Atlantic s-au amplificat la înălţimi de 7 m sau mai mult în Indiile de Vest.
- explozia violentă din 1883 a vulcanului Krakatoa din strâmtoarea Sundra între Java şi Sumatra a provocat prăbuşirea vârfului vulcanului în ocean. Această prăbuşire bruscă a produs un tsunami uriaş de peste 35 m înălţime care a distrus 165 de sate şi a ucis peste 36.000 de oameni.
- cutremurul din Aleutine (Alaska) din 1946 ($M_{8.1}$) a produs un tsunami în Insulele Hawaii care a ucis aproximativ 160 de oameni.
- cutremurul din Chile din 1960 ($M_{9.5)}$ a declanşat un tsunami care a ucis 61 de persoane în Hawaii după ce a călătorit timp de 15 ore peste Oceanul Pacific.
- cutremurul din Alaska din 1964 ($M_{9.2}$) a generat un tsunami care a ucis aproximativ 130 de oameni în Alaska şi California.
- cutremurul din 1993 din Marea Japoniei a provocat un tsunami care a ucis 120 de persoane pe insula Okushiri, Japonia.

- cutremurul din Papua Noua Guinee din 1998 ($M_{7.1}$) a declanşat o alunecare de teren submarină care a produs un tsunami care a ucis peste 2100 de oameni.
- cutremurul din Sumatra din 2004 ($M_{9.1}$) a generat un tsunami care a ucis aproximativ 230.000 de oameni (vezi Studiul de caz 4.2: Tsunami indonezian).
- cutremurul din Samoa din 2009 ($M_{8.1}$) a generat un tsunami care a ucis aproximativ 200 de oameni.
- cutremurul din Chile din 2010 ($M_{8.8}$) a generat un tsunami care a ucis aproximativ 700 de oameni în oraşele de coastă.
- cutremurul din Japonia din 2011 ($M_{9.1}$) a generat un tsunami care a ucis peste 20000 de oameni.

Oceanul Pacific este scena celor mai multe dintre tsunami-urile lumii, fiind înconjurat de celebrul „inel de foc" o zonă tectonică extrem de activă, marcată de arce insulare, tranşee oceanice adânci şi lanţuri muntoase submarine. În această regiune, plăcile tectonice se întâlnesc, se lovesc, alunecă sau se scufundă unele sub altele, generând cutremure şi erupţii vulcanice frecvente, condiţii ideale pentru formarea undelor gigantice.

Unul dintre cele mai dramatice exemple din istoria recentă este tsunamiul declanşat la 26 decembrie 2004, în urma unui cutremur cu magnitudinea cuprinsă între 9.1 şi 9.3, produs în apropierea insulei Sumatra. În câteva ore, valurile au traversat Oceanul Indian şi au lovit ţărmurile a peste zece ţări, transformând această zi într-unul dintre cele mai sumbre momente ale secolului: aproximativ 283.000 de persoane şi-au pierdut viaţa.

Tsunami-urile pot fi însă generate şi de alte procese naturale. Un exemplu istoric marcant este erupţia vulcanului Krakatau din august 1883. Explozia uriaşă şi prăbuşirea unei părţi a insulei au aruncat în aer milioane de tone de roci şi cenuşă, deplasând brutal apa oceanului. Valurile astfel formate au devastat satele de coastă, provocând mii de victime. Evenimentul rămâne un simbol al forţei combinatorii dintre vulcanism şi dinamica marină. (Bobrowsky, 2013, p. 482).

Impactul unui tsunami asupra zonei de coastă este rapid, amplu şi deseori ireversibil. Primul val, deşi nu întotdeauna cel mai înalt, aduce cu el o masă de apă care inundă cu violenţă litoralul, smulgând vegetaţia, distrugând clădiri, porturi şi infrastructură. Ţărmurile sunt remodelate în câteva minute, iar eroziunea poate schimba fundamental configuraţia geografică a unor regiuni.

După retragerea apei, peisajul este adesea de nerecunoscut. Inundaţiile marine lasă în urmă sedimente, resturi, apă sărată şi contaminanţi care pătrund în soluri şi în sursele de apă dulce. Această contaminare afectează agricultura, sănătatea publică şi ecosistemele. În unele situaţii, tsunamiurile pot declanşa incendii sau explozii industriale, iar în cazuri extreme – cum s-a întâmplat la Fukushima în 2011 – pot compromite instalaţii nucleare.

Pe lângă distrugerile materiale, impactul social este profund. Mii de oameni îşi pierd viaţa prin înec, iar cei care supravieţuiesc se confruntă cu pierderi familiale, traume psihologice şi nevoia urgentă de relocare. Comunităţile de pescari şi destinaţiile turistice pot fi devastate complet, iar reconstrucţia economică poate dura ani sau chiar decenii. Ecosistemele litorale, cum ar fi recifurile de corali sau pădurile de mangrove, sunt adesea grav afectate, pierzându-şi funcţia de protecţie naturală împotriva furtunilor şi eroziunii.

Legături cu alte riscuri naturale. Tsunami-urile sunt fenomene complexe nu doar prin impactul lor direct, ci şi prin legăturile strânse cu alte hazarduri naturale. În cele mai multe cazuri, ele sunt generate de cutremure submarine, ceea ce face ca analiza riscului seismic să fie esenţială pentru înțelegerea riscului de tsunami. Totodată, alunecările de teren, atât cele terestre care se prăbuşesc în mare, cât şi cele submarine, pot produce valuri puternice, mai ales în fiorduri sau în regiunile insulelor vulcanice.

Erupţiile vulcanice, în special cele explozive sau cele care implică prăbuşirea flancurilor vulcanilor în ocean, pot produce valuri gigantice în doar câteva secunde. Aceste procese pot declanşa un lanţ de fenomene, în care un cutremur produce o alunecare de teren, iar aceasta, la rândul ei, generează un tsunami - un exemplu de interacţiune tipică între hazarduri.

Deşi cicloanele tropicale nu generează tsunami-uri, efectele lor pot amplifica severitatea unui astfel de fenomen. Marile furtuni pot creşte nivelul mării prin furtuna asociată (storm surge), pot slăbi infrastructura de coastă şi pot reduce capacitatea comunităţilor de a răspunde rapid unui eventual tsunami ulterior. În acest sens, cumulul de fenomene naturale poate multiplica vulnerabilitatea zonelor costiere.

Această interdependenţă evidenţiază necesitatea unei abordări interdisciplinare în gestionarea riscului: geologia, oceanografia, meteorologia şi ingineria trebuie integrate într-un sistem unitar de avertizare, prevenire şi răspuns.

Studiu de caz: Japonia 2011: Tsunami și dezastru nuclear

De-a lungul istoriei sale, Japonia a învățat să trăiască în prezența permanentă a cutremurelor și tsunamiurilor. Generații întregi au consemnat astfel de evenimente în cronici locale, iar oamenii de știință au studiat cu minuțiozitate mecanismele lor de producere. Conștientizarea riscului este atât de profund integrată în cultura japoneză, încât pregătirea pentru cutremure face parte din viața de zi cu zi – de la educația copiilor până la dezvoltarea unor sisteme complexe de avertizare și infrastructuri special gândite pentru a proteja viețile omenești.

Pe coasta de est a arhipelagului, la aproximativ 100 km în larg, se află una dintre cele mai studiate zone de subducție din lume: locul unde Placa Pacifică coboară sub Placa Eurasiatică. Aici se produc cutremure mari, cu magnitudini de regulă între 7 și 8, suficiente pentru a genera tsunami-uri semnificative. Aparent, Japonia părea pregătită pentru astfel de evenimente. Orașe întregi erau protejate de mii de kilometri de diguri, iar investițiile în lucrări de apărare atinseseră valori impresionante. Un exemplu emblematic este bariera de la Kamaishi, finalizată în 2009 – cea mai adâncă construcție de protecție împotriva tsunami-urilor de pe planetă. Cu o structură ancorată la 65 m sub nivelul mării, bariera fusese proiectată să oprească valuri de până la 5 metri, tipice pentru un cutremur major, dar nu extraordinar.

Totul s-a schimbat în după-amiaza zilei de 11 martie 2011, când o ruptură masivă a plăcilor tectonice a eliberat o energie echivalentă a mii de bombe nucleare. Cutremurul de magnitudine 9.0, cel mai mare înregistrat vreodată în Japonia, a depășit orice estimare anterioară. Avertizările de tsunami au fost transmise imediat, iar comunitățile costiere au avut între 12 și 15 minute pentru evacuare. Japonia era, în teorie, pregătită. Populația știa cum să reacționeze, iar digurile trebuiau să ofere un nivel suplimentar de protecție.

Dar realitatea a contrazis aproape toate așteptările.

Valurile care au urmat au depășit nu doar limitele de proiectare, ci și imaginația colectivă. În unele locuri, înălțimea lor a atins 40 de metri, măturând diguri, porturi, sate și orașe întregi. Chiar și bariera de la Kamaishi - simbolul tehnologiei și al ingeniozității japoneze - a fost depășită în câteva minute. În doar câteva clipe, valuri uriașe au pătruns până la 10 km în interiorul uscatului, transportând cu ele mașini, nave, clădiri și fragmente de infrastructură.

Ceea ce este remarcabil, dar și tragic, este faptul că oamenii de știință japonezi avertizaseră cu aproape un deceniu înainte asupra posibilității unor tsunami-uri mult mai mari decât cele cunoscute în epoca modernă. Depozite geologice vechi, descoperite la kilometri în interiorul țărmului, sugerau existența unor evenimente similare celui din 2011, cu perioade de revenire de aproximativ o mie de ani. Doar că aceste avertismente au rămas marginale, pierdute în dezbateri tehnice.

În contrast cu tragedia generală, micuțul sat Fudai a devenit un exemplu de viziune. Aici, în anii 1960, primarul – inspirat de amintirile tragice ale tsunami-urilor din 1896 și 1933 – a insistat asupra construirii unui zid mult mai înalt decât recomanda standardul epocii. Proiectul a fost criticat vreme de ani, considerat exagerat și costisitor.

Dar în 2011, zidul de 16 metri a salvat satul, în timp ce localităţile învecinate au fost complet distruse.

În paralel cu tragedia produsă pe coastă, o altă criză se desfăşura în tăcere: accidentul nuclear de la Fukushima Daiichi. Deşi reactoarele se opriseră automat în primele secunde după cutremur, generatoarele care alimentau sistemul de răcire au fost inundate de valurile tsunami-ului. Răcirea reactorului a devenit imposibilă, iar în orele şi zilele următoare, acumularea de hidrogen a provocat explozii care au eliberat particule radioactive în atmosferă.

În doar câteva ore, zona de evacuare din jurul centralei a fost extinsă de la 3 km la 20 km, forţând aproximativ 200.000 de oameni să-şi părăsească locuinţele. Printre ei, mii de vârstnici şi pacienţi spitalizaţi, pentru care mobilitatea era limitată. Mulţi au murit ulterior din cauza condiţiilor dificile de evacuare – frig, lipsa energiei electrice, lipsa medicamentelor şi accesul redus la servicii medicale. Estimările actuale sugerează că în regiunea Fukushima, numărul morţilor cauzate indirect de evacuare (aprox. 1600) a depăşit numărul victimelor directe ale cutremurului şi tsunami-ului.

***Evenimentele din 11 martie 2011 au avut reverberaţii globale**. În Europa, de exemplu, tragedia de la Fukushima a reactivat dezbaterea privind siguranţa energiei nucleare. Germania a decis, la puţin timp după aceea, să închidă treptat toate centralele nucleare - o decizie istorică, influenţată direct de dezastrul japonez[*].*

În Japonia, analiza post-dezastru a arătat că, deşi digurile nu au putut opri valurile, în unele localităţi ele au întârziat inundaţia suficient cât să permită evacuarea şi salvarea multor vieţi. Autorităţile reconstruiesc acum structuri defensive mai înalte şi mai rezistente. Rămâne însă întrebarea: în condiţiile creşterii nivelului mării şi ale hazardurilor rare, dar extreme, este posibil ca digurile să ofere protecţie totală?

Analiza prin prisma celor cinci concepte:

1. Ştiinţa ne ajută să prezicem hazardurile. Evaluarea nivelului general de pregătire al Japoniei pentru riscul de tsunami şi analiza succeselor şi eşecurilor în anticiparea tsunami-ului din 2011.

Japonia este recunoscută pentru nivelul său ridicat de pregătire în faţa hazardurilor naturale, în special în ceea ce priveşte riscul seismic şi tsunami-urile. Cu toate acestea, tsunami-ul generat de cutremurul din Tohoku (2011) a evidenţiat atât punctele forte, cât şi vulnerabilităţile sistemului de avertizare şi protecţie. Printre succese se numără existenţa unui sistem de monitorizare

[*] Germania a închis toate centralele sale nucleare până în anul 2023. Iniţial, guvernul german stabilise anul 2022 ca termen limită pentru eliminarea treptată a energiei nucleare, ca parte a politicii Energiewende (tranziţia energetică). Cu toate acestea, din cauza crizei energetice cauzate de războiul din Ucraina, ultimele trei centrale nucleare rămase în funcţiune (Isar 2, Neckarwestheim 2 şi Emsland) au continuat să opereze până pe **15 aprilie 2023**, când au fost definitiv oprite

seismică avansat și a unor structuri de protecție costieră. Totuși, eșecurile au inclus subestimarea magnitudinii maxime a valurilor tsunami și întârzierile în transmiterea avertizărilor către populație.

2. Cunoașterea riscurilor poate ajuta oamenii să ia decizii .Factori care au determinat comunitatea științifică și populația generală din Japonia să subestimeze riscul tsunami-ului din 2011

Subestimarea riscului a fost influențată de mai mulți factori, inclusiv interpretarea eronată a datelor istorice, încrederea excesivă în infrastructura de protecție existentă și presupunerea că un eveniment cu o magnitudine atât de mare este extrem de rar. Studiile anterioare au indicat că tsunami-urile în zona de subducție a Japoniei ar fi fost limitate la înălțimi de cel mult 10 metri, ceea ce a dus la construirea unor bariere insuficient de înalte pentru a face față valurilor reale din 2011, care în unele zone au depășit 40 de metri.

3. Există legături între hazardurile naturale. Legătura tsunami-ului din 2011 cu alte tipuri de hazard și analiza aspectelor temporale și spațiale.

Tsunami-ul din 2011 nu a fost un fenomen izolat, ci a generat o serie de pericole secundare. În primul rând, inundațiile cauzate de valurile tsunami au condus la distrugerea infrastructurii critice, inclusiv a centralei nucleare Fukushima Daiichi, declanșând un accident nuclear major. De asemenea, tsunami-ul a dus la eroziunea solului și la alunecări de teren în unele regiuni de coastă. Aspectele temporale includ impactul imediat al valurilor asupra comunităților costiere, urmat de efectele pe termen lung, precum poluarea radioactivă și deteriorarea infrastructurii. Din punct de vedere spațial, impactul s-a resimțit nu doar pe coasta de est a Japoniei, ci și în alte părți ale Pacificului, inclusiv în Statele Unite și Chile, unde s-au înregistrat niveluri mai ridicate ale apei.

4. Oamenii pot transforma evenimentele periculoase în catastrofe. Impactul erorii umane asupra amplificării dezastrului provocat de tsunami-ul din 2011

Gravitatea catastrofei a fost accentuată de mai multe erori umane, atât înainte, cât și după eveniment. Înainte de tsunami, o planificare inadecvată a infrastructurii și lipsa actualizării scenariilor de hazard au contribuit la vulnerabilitatea anumitor regiuni. După dezastru, deficiențele în gestionarea crizei, inclusiv întârzierile în evacuarea populației și lipsa unei comunicări eficiente între autorități și cetățeni, au dus la pierderi suplimentare de vieți omenești. De asemenea, în cazul centralei nucleare Fukushima Daiichi, măsurile de protecție au fost insuficiente, iar lipsa unei reacții rapide a agravat colapsul sistemelor de răcire, determinând dispersia radiațiilor.

5. Consecinţele hazardurilor pot fi minimizate. Evaluarea succeselor şi eşecurilor Japoniei în reducerea efectelor tsunami-ului din 2011 şi îmbunătăţiri pentru viitor.

Japonia a demonstrat un nivel ridicat de reziliență în faţa dezastrului, reuşind să minimizeze pierderile printr-un sistem de construcţie antiseismică avansat şi o infrastructură de avertizare rapidă. Cu toate acestea, eşecurile au inclus subestimarea severităţii hazardului şi deficienţele în gestionarea urgenţelor post-dezastru. Pentru a reduce impactul unor evenimente viitoare, Japonia ar putea îmbunătăţi strategiile de protecţie prin actualizarea modelelor de risc, îmbunătăţirea comunicării cu populaţia, proiectarea unor bariere de protecţie mai eficiente şi dezvoltarea unor planuri de evacuare mai flexibile şi rapide. În plus, consolidarea cercetării interdisciplinare privind interacţiunea dintre hazardurile naturale şi infrastructura critică ar putea contribui la creşterea rezilienţei pe termen lung.

Prevenirea şi reducerea riscurilor tsunami

Gestionarea riscului de tsunami reprezintă un efort complex, care începe mult înainte de producerea evenimentului şi continuă mult după retragerea ultimului val. În regiunile expuse, pregătirea populaţiei şi planificarea atentă a spaţiului geografic sunt esenţiale pentru reducerea pierderilor de vieţi omeneşti. La fel ca în cazul altor hazarduri extreme, primele minute sunt decisive, iar diferenţa dintre viaţă şi moarte poate depinde de rapiditatea reacţiei şi de existenţa unor mecanisme solide de protecţie.

Înainte de orice eveniment, cunoaşterea terenului joacă un rol fundamental. Comunităţile vulnerabile trebuie să identifice din timp zonele cele mai sigure pentru evacuare - de preferinţă locuri situate la altitudine, aflate dincolo de înălţimea maximă de inundare estimată în scenariile locale de hazard (run-up). Hărţile topografice devin, în acest sens, instrumente esenţiale, ajutând oamenii să ştie exact încotro să se îndrepte în cazul unei alerte. Tot în etapa de pregătire, populaţia este încurajată să îşi asigure mici rezerve de supravieţuire: apă potabilă, alimente neperisabile, medicamente, o lanternă, un radio portabil şi o trusă de prim ajutor. Experienţa dezastrelor recente arată că, în primele zile după un tsunami, accesul la resurse poate fi grav afectat, iar serviciile de urgenţă pot întârzia.

Există însă şi semne naturale care pot avertiza iminentul pericol. Un cutremur puternic, cu durată de peste 10-15 secunde, reprezintă adesea primul indiciu al unui tsunami. Retragerea bruscă a mării, zgomotele neobişnuite venind din larg sau creşterea rapidă a nivelului apei sunt semnale clare care

impun evacuarea imediată. În paralel, sistemele moderne de avertizare pot transmite alerte oficiale în câteva secunde după detectarea unui cutremur major, oferind comunităţilor câteva minute preţioase pentru a se pune la adăpost.

În timpul evenimentului, instinctul poate îndruma oamenii spre maşini, dar experienţa tragică a multor tsunami-uri a demonstrat că vehiculele pot deveni capcane mortale. Drumurile se blochează rapid, podurile se prăbuşesc, iar fluxul haotic al traficului îngreunează evacuarea. De aceea, cea mai sigură opţiune rămâne deplasarea pe jos, rapid şi în direcţia zonelor înalte. Dacă timpul este insuficient, refugierea la etajele superioare ale unei clădiri solide poate oferi o şansă de supravieţuire. În cazuri extreme, oamenii pot încerca să se agaţe de obiecte mari plutitoare, evitând coliziunile cu resturile antrenate de val.

După trecerea primului val, pericolul nu dispare. Tsunami-urile vin în serii, iar intervalele dintre valuri pot varia de la câteva minute la o oră sau chiar mai mult. Primele valuri nu sunt neapărat cele mai mari, ceea ce face întoarcerea prematură în zonele costiere extrem de riscantă. Doar confirmarea oficială a încetării pericolului permite revenirea populaţiei în zonele afectate. De asemenea, există riscul persistent al inundaţiilor, deoarece valurile pot lăsa în urmă cantităţi mari de apă care persistă ore în şir. Informarea constantă prin radio, televiziune sau sisteme de alertă este esenţială pentru a evita noi victime.

Pe lângă pregătirea individuală, infrastructura joacă un rol major în gestionarea riscului. În unele state, digurile şi barierele de protecţie au fost ridicate pentru a reduce forţa valurilor, însă eficienţa lor depinde de înălţime, de raportul faţă de nivelul mării şi de magnitudinea evenimentului. Exemplele recente arată că, atunci când sunt depăşite, aceste structuri pot totuşi întârzia valul suficient pentru a salva vieţi. În acelaşi timp, protejarea ecosistemelor naturale - recifurile de corali şi pădurile de mangrove - poate avea un efect surprinzător de eficient, deoarece acestea reduc energia valurilor înainte ca acestea să ajungă la ţărm. Amplasarea infrastructurii critice, precum spitale, centrale electrice sau depozite de combustibil, la altitudini sigure este o altă strategie crucială pentru reducerea riscurilor.

Dimensiunea non-structurală a protecţiei este la fel de importantă. Hărţile de hazard şi de risc tsunami, actualizate periodic, permit evaluarea vulnerabilităţilor şi sprijină planificarea urbană. Sistemele de avertizare timpurie, bazate pe reţele seismice, sateliţi şi senzori de presiune în adâncime, transmit informaţii în timp real centrelor de alertă din întreaga lume. Pacific

Tsunami Warning Center, de exemplu, monitorizează oceanul 24/7 şi poate emite avertizări internaţionale în doar câteva minute.

Educaţia populaţiei rămâne însă fundamentul oricărei strategii de reducere a riscului. În regiunile vulnerabile, rutele de evacuare sunt marcate clar, exerciţiile şcolare sunt desfăşurate periodic, iar campaniile publice explică modul în care trebuie recunoscute semnele premergătoare ale unui tsunami. Cultura pregătirii permanente reprezintă una dintre cele mai eficiente forme de protecţie.

La nivel instituţional, riscul tsunami este integrat în strategiile naţionale de protecţie civilă, iar cooperarea internaţională devine tot mai importantă. Statele împart date, modele şi sisteme de avertizare, contribuind la o reacţie globală rapidă în cazul unui eveniment major. Totodată, cercetarea interdisciplinară - reunind geofizica, oceanografia, ingineria şi GIS-ul - oferă instrumente tot mai precise pentru prognoză şi modelarea impactului.

În ansamblu, prevenirea şi reducerea riscurilor tsunami reprezintă o combinaţie de cunoaştere ştiinţifică, planificare, infrastructură, educaţie şi solidaritate comunitară. Niciun element nu este suficient de unul singur, dar împreună pot transforma un potenţial cataclism într-un eveniment gestionabil, limitând pierderile şi salvând vieţi.

Autoevaluare

1. Defineşte tsunami-ul şi identifică câteva evenimente declanşatoare de tsunami.
2. Ce regiuni geografice sunt cele mai expuse riscului de tsunami?
3. Care sunt efectele primare şi secundare ale tsunami-urilor?
4. Enumeră modurile în care tsunami-urile sunt legate de alte pericole.
5. Numeşte trei semne ale unui tsunami iminent.
6. Locuieşti într-o zonă de coastă care se confruntă cu tsunami mari, dar rare Ce probleme credeţi că sunt cele mai importante pentru a îmbunătăţi pregătirea pentru tsunami a comunităţii şi cum aţi convinge oamenii că este necesar să fie pregătiţi pentru tsunami?

Bibliografie recomandată

- Bobrowsky, P., 2013. *Encyclopedia of natural hazards.* New York: Springer.
- Hyndman, D. & Hyndman, D., 2017. *Natural Hazards and Disasters, Fifth Edition*. Boston, USA: Cengage Learning.
- Hyndman, D. & Hyndman, D., 2017. *Natural Hazards and Disasters, Fifth Edition*. Boston, USA: Cengage Learning.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021. *PreventionWeb.* [Interactiv] Available at: https://www.preventionweb.net/



Alunecarea de teren Laguna Beach, California. 1 iunie, 2005

Sursa: https://www.usgs.gov

PROCESELE GRAVITAȚIONALE ȘI RISCURILE ASOCIATE

Rezultatele învățării:

La finalul acestei unități de învățare, studenții vor fi capabili să

- explice, în termeni clari și accesibili, principalele procese gravitaționale și mecanismele prin care acestea se declanșează.
- recunoască factorii naturali și antropici care contribuie la destabilizarea versanților și să înțeleagă modul în care aceștia interacționează.
- identifice regiunile predispuse la mișcări de masă, pornind de la caracteristicile geologice, climatice și morfologice ale terenului.
- analizeze impactul proceselor gravitaționale asupra mediului, infrastructurii și comunităților umane, evidențiind consecințele imediate și pe termen lung.
- aplice cunoștințele dobândite pentru interpretarea unor studii de caz reale și pentru formularea unor soluții adaptate contextelor locale.

Termeni cheie: procese gravitaționale; alunecări de teren; avalanșe; drenaj

Modificarea reliefului, blocarea rețelelor hidrografice, pierderea fertilității solurilor și fragmentarea ecosistemelor sunt consecințe frecvente ale proceselor gravitaționale. Acestea includ ansamblul fenomenelor prin care materialele de la suprafața terestră - roci, soluri, zăpadă sau depozite neconsolidate - se deplasează sub acțiunea gravitației, de la altitudini mai mari spre poziții inferioare.

Factorii determinanți includ litologia, structura geologică, panta, regimul hidrologic și climatul, la care se adaugă influențele antropice.

În lunile premergătoare alunecării de teren catastrofale din 29 aprilie 1903, minerii care exploatau un strat de cărbune la baza muntelui au raportat zgomote ciudate. Cu toate acestea, pentru cei 20 de mineri care au coborât în subteran în noaptea de 28 aprilie și pentru sutele de locuitori ai orașului Frank, Alberta, care dormeau liniștiți în casele lor, nu exista niciun indiciu că un dezastru era iminent.

Procesele gravitaţionale reprezintă una dintre cele mai importante categorii de procese geomorfologice actuale, având un rol esenţial în modelarea reliefului şi în dinamica versanţilor. Ele includ ansamblul fenomenelor prin care materialele de la suprafaţa terestră – roci, soluri, zăpadă sau depozite neconsolidate – se deplasează sub acţiunea forţei gravitaţionale, de la altitudini mai mari spre poziţii inferioare.

Aceste procese se manifestă într-o mare varietate de forme - de la rostogoliri şi prăbuşiri, până la alunecări de teren, curgeri noroioase sau avalanşe - şi se caracterizează prin mecanisme, viteze şi intensităţi diferite, determinate de natura materialului, panta versantului, condiţiile climatice şi intervenţia antropică.

Pe lângă rolul lor natural în remodelarea reliefului, procesele gravitaţionale pot avea efecte distructive semnificative, mai ales în zonele locuite sau intens utilizate economic. Ele pot provoca pierderi de vieţi omeneşti, distrugerea infrastructurii, degradarea terenurilor agricole şi modificări ale ecosistemelor. Din această perspectivă, sunt considerate procese geomorfologice de risc, iar studiul lor are o importanţă majoră în planificarea teritorială, amenajarea versanţilor şi reducerea vulnerabilităţii la dezastre naturale.

Analiza proceselor gravitaţionale presupune, aşadar, o abordare complexă, care îmbină factori geomorfologici, geologici, climatici şi antropici, pentru a înţelege atât mecanismele de declanşare, cât şi consecinţele asupra mediului şi societăţii. Cunoaşterea acestor procese constituie baza elaborării măsurilor de prevenire şi reducere a riscurilor geomorfologice, contribuind la o gestionare durabilă a teritoriului.

Definiţii şi tipuri de procese gravitaţionale

Riscul geomorfologic reprezintă ansamblul ameninţărilor generate de procesele naturale care determină modificarea formelor de relief şi a caracteristicilor suprafeţei terestre, producând efecte negative asupra populaţiei şi asupra mediului înconjurător. Aceste procese pot fi analizate atât calitativ (prin natura şi tipul fenomenului), cât şi cantitativ (prin intensitatea şi frecvenţa manifestării lor).

Se poate distinge între:

- un *risc geomorfologic natural*, care se referă la potenţialul de manifestare al proceselor în mediul fizic, independent de activitatea umană;
- şi un *risc geomorfologic pentru societate*, care se referă la consecinţele acestor procese asupra oamenilor, infrastructurii şi activităţilor economice.

Ambele tipuri de risc pot afecta populaţia direct, prin distrugeri materiale sau pierderi de vieţi omeneşti, sau indirect, prin perturbarea mediului de viaţă şi reducerea resurselor naturale.

Procesele geomorfologice cu impact negativ asupra societăţii pot fi clasificate după mai multe criterii, însă, în mod tradiţional, se disting două mari grupe principale:

Procese de versant, care includ:

- procese gravitaţionale, determinate de deplasarea maselor de rocă, sol sau material deluvial sub acţiunea gravitaţiei (ex.: alunecări, prăbuşiri, rostogoliri);
- procese hidrice de versant, în care acţiunea apei se combină cu gravitaţia, ducând la eroziune, şiroire sau torenţialitate.

Procese de albie, care afectează cursurile de apă prin eroziune, transport şi depunere de sedimente, modificând astfel dinamica reliefului fluvial.

La aceste categorii se adaugă şi procese speciale, cum ar fi cele eoliene (determinate de vânt), litorale (în zona de coastă) sau glaciare, care, deşi sunt influenţate de fenomene atmosferice sau hidrologice, pot produce şi ele modificări semnificative ale reliefului.

În sens restrâns, se consideră fenomene geomorfice de risc acele procese care modifică efectiv formele de relief şi au impact măsurabil asupra populaţiei şi mediului. De asemenea, multe dintre aceste procese influenţează şi calitatea şi stabilitatea solului, contribuind la degradarea terenurilor. Un rol important în declanşarea sau accelerarea acestor fenomene îl are şi procesul de meteorizaţie, care pregăteşte materialul litologic pentru acţiunea factorilor geomorfologici activi.

În literatura de specialitate geomorfologică şi geologică sunt descrise numeroase tipuri de deplasări ale maselor de materiale (sol, rocă, depozite de versant), definite în funcţie de criteriul de clasificare utilizat. În general, aceste fenomene sunt reunite sub denumirea de procese gravitaţionale, deoarece se desfăşoară sub acţiunea directă a forţei gravitaţiei, care determină mişcarea materialelor de la altitudini mai mari spre poziţii inferioare (figura 6.1).

În practica geomorfologică modernă, clasificarea acestor procese combină mai multe criterii - genetice, dinamice şi mecanice - însă criteriul genetic (legat de originea şi mecanismul de formare) este considerat cel mai important.

Astfel, procesele de deplasare a materialelor pe versanţi, inclusiv pe interfluvii, pot fi grupate în următoarele categorii principale:

- procese de deplasare prin cădere - mişcări rapide ale fragmentelor de rocă sau ale blocurilor desprinse, care cad liber sau ricoşează pe pante abrupte (ex.: prăbuşiri, rostogoliri).
- procese de deplasare datorită sufoziunii - mişcări determinate de spălarea şi îndepărtarea particulelor fine din masa solului sau din depozitele necoezive, sub acţiunea apei care circulă prin interstiţii.
- procese de deplasare prin tasare - mişcări lente, generate de compactarea sau de pierderea suportului intern al materialului, frecvent întâlnite în terenurile loessoide sau în zone cu structuri argiloase umflate.
- procese de deplasare prin alunecare – mişcări de masă pe suprafeţe de discontinuitate sau plane de alunecare, cunoscute sub denumirea de alunecări de teren; acestea pot fi lente sau rapide, în funcţie de compoziţia şi umiditatea materialului.
- procese de curgere noroioasă (curgeri de noroi şi materiale plastice) – mişcări fluide ale unui amestec de apă şi material solid fin (argilă, praf, nisip), care se deplasează pe versanţi sau de-a lungul văilor torenţiale, având o viteză variabilă în funcţie de pantă şi de conţinutul de apă.

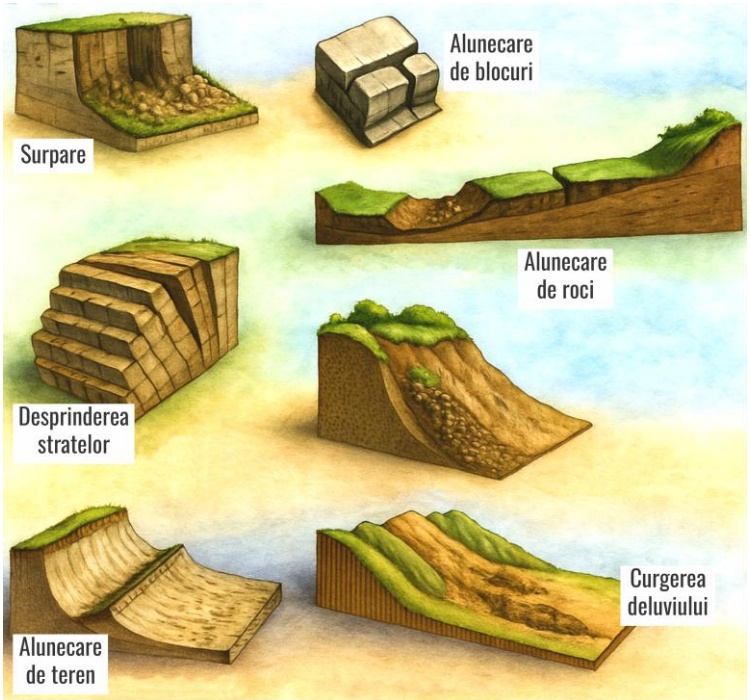


Figura 6.1. Tipuri de deplasări gravitaţionale (după Selby)
Imagine generată de Chat GPT

Aceste procese gravitaţionale constituie una dintre principalele categorii de riscuri geomorfice, prin efectele lor asupra terenurilor, infrastructurii şi ecosistemelor locale.

În sens restrâns, *eroziunea* reprezintă procesul prin care particulele de material sunt desprinse de pe suprafaţa terestră sub acţiunea forţelor naturale. Atunci când ne referim însă la sol, termenul capătă o semnificaţie mult mai amplă, deoarece include toate etapele prin care particulele sunt dislocate, transportate şi, în cele din urmă, depuse în alte locuri. Aceste etape nu se desfăşoară separat, ci sunt legate între ele şi au loc aproape simultan, ceea ce conferă procesului un caracter continuu şi dinamic.

Ca orice proces geomorfologic, eroziunea depinde de o multitudine de factori. Agenţii naturali - apa, vântul, gheaţa sau valurile marine - joacă rolul principal, dar felul în care aceşti agenţi acţionează este influenţat de condiţii precum panta versantului, textura şi structura solului, gradul de acoperire cu vegetaţie, precum şi de regimul climatic local. În plus, factorii declanşatori, cum ar fi precipitaţiile intense sau lipsa vegetaţiei, pot accelera brusc ritmul eroziunii, mai ales în arealele sensibile sau instabile.

Pe versanţi, eroziunea nu se rezumă doar la pierderea stratului de sol, ci implică întregul proces prin care materialul aflat la suprafaţă este dislocat şi pus în mişcare, remodelând gradual relieful. De aceea, acest fenomen are consecinţe nu doar asupra solului în sine, ci şi asupra stabilităţii versanţilor şi asupra activităţilor umane desfăşurate în zonă.

În funcţie de modul în care se produce, putem vorbi despre eroziune naturală şi eroziune antropică. Cea naturală este un proces permanent, care se desfăşoară independent de intervenţia omului şi contribuie, într-un ritm lent, la transformarea treptată a reliefului. Chiar dacă este un proces firesc, ea poate deveni problematică în anumite contexte, motiv pentru care regiunile expuse au nevoie uneori de lucrări specifice de protecţie, precum împăduriri sau amenajări antierozionale.

Eroziunea antropică, în schimb, este direct legată de activităţile umane. Defrişările, lucrările agricole necorespunzătoare, păşunatul excesiv sau construcţiile pot destabiliza versanţii şi pot accelera pierderea solului într-un ritm mult mai rapid decât cel natural. În astfel de situaţii, efectele devin vizibile într-un timp scurt: solul îşi pierde fertilitatea, apar şanţuri sau ravene, iar riscul de degradare creşte considerabil.

Agenţii naturali implicaţi în proces sunt variaţi. Apa rămâne însă principalul factor care declanşează şi întreţine eroziunea, fie că vorbim de

impactul picăturilor de ploaie, de scurgerea difuză de la suprafaţa versantului sau de concentrarea acesteia în rigole şi torenţi. În zonele montane sau în regiunile care au fost cândva acoperite de gheţari, gheaţa joacă un rol important, deplasarea maselor glaciare având o mare forţă de dislocare. De asemenea, în zonele de coastă, valurile şi curenţii marini remodelează ţărmurile, în timp ce în regiunile aride vântul poate transporta cantităţi mari de particule fine, contribuind la formarea dunelor sau la degradarea terenurilor.

Privită în ansamblul său, eroziunea este un proces complex, în care se împletesc acţiunile agenţilor naturali cu cele ale omului. Felul în care aceşti factori interacţionează determină gradul de afectare a terenurilor şi influenţează atât dinamica reliefului, cât şi stabilitatea ecosistemelor. De aceea, cunoaşterea acestor mecanisme nu are doar valoare teoretică, ci constituie baza pentru gestionarea durabilă a solurilor şi pentru prevenirea degradării versanţilor.

Apa este fără îndoială cel mai activ agent al modelării reliefului, iar acţiunea ei pe versanţi devine vizibilă încă din primele momente în care începe o ploaie mai intensă. La suprafaţa solului, picăturile lovesc pământul cu o energie surprinzător de mare, sfărâmând particulele fine şi punându-le în mişcare. De aici începe, de fapt, povestea eroziunii hidrice: un proces aparent discret, dar extrem de eficient, care transformă treptat forma versanţilor.

Eroziunea hidrică pe versanţi. Pe pantele mai line, apa se prelinge sub forma unei pelicule subţiri. Nu creează şanţuri vizibile, dar transportă neobservat o cantitate mare de material, lăsând în urmă o suprafaţă mai săracă în elemente fertile. Este o formă de eroziune tăcută şi insidioasă, care nu atrage atenţia imediat, însă în timp duce la degradări semnificative. În astfel de zone, fermierii pot observa doar o scădere a productivităţii solului sau o subţiere a stratului vegetal, fără să bănuiască întotdeauna că eroziunea difuză este responsabilă.

Pe măsură ce panta devine mai abruptă sau ploile mai abundente, apa nu mai curge liniştit, ci se adună în mici canale şi produce rigole. Acestea sunt urme vizibile, sinuoase, care se formează pe versanţi după episoade de ploi violente. Rigolele reprezintă deja o etapă avansată a procesului: apa începe să se concentreze, să capete forţă şi să sape adânc în sol. De la rigole la torenţi nu este decât un pas, iar odată declanşat, un torent poate transporta cantităţi impresionante de apă şi material, chiar dacă există doar pentru câteva ore. În astfel de momente, versantul nu mai pare o formă stabilă, ci o suprafaţă în continuă transformare.

În anumite condiţii, eroziunea hidrică capătă forme spectaculoase şi dramatice. Materialul dislocat este purtat spre bază, unde se acumulează, modificând atât panta, cât şi structura solului. În timp, rigolele se pot adânci, se pot uni, iar versantul capătă înfăţişarea unui relief brăzdat, fragmentat, uneori greu de folosit în agricultură sau silvicultură. În zonele unde solul este afânat sau unde vegetaţia lipseşte, procesul avansează rapid, iar intervenţia omului devine singura soluţie pentru a preveni degradarea completă.

Ceea ce este important de reţinut este faptul că *eroziunea hidrică pe versanţi nu este doar un fenomen geomorfologic*, ci un proces cu implicaţii directe asupra comunităţilor: scade fertilitatea terenurilor, poate provoca blocarea drumurilor, afectează infrastructura şi contribuie la destabilizarea versantului, pregătind terenul pentru alte procese gravitaţionale. Privită în ansamblu, ea dovedeşte încă o dată cât de strâns legată este dinamica reliefului de regimul precipitaţiilor şi de modul în care gestionăm terenurile.

Alunecările de teren: dinamica unui versant instabil. Alunecările de teren reprezintă una dintre cele mai expresive forme prin care natura ne arată că relieful nu este niciodată definitiv. De cele mai multe ori, versanţii par solizi şi nemişcaţi, dar în interiorul lor se desfăşoară procese lente, invizibile, care pregătesc treptat terenul pentru o posibilă deplasare. Uneori, această mişcare are loc discret, aproape imperceptibil, alteori se produce brusc, cu o energie impresionantă, modificând pentru totdeauna aspectul zonei.

În esenţă, o alunecare de teren apare atunci când rezistenţa internă a materialului de pe versant nu mai face faţă forţelor care îl solicită, în special greutatea proprie şi presiunea apei din sol. Versantul îşi pierde echilibrul, iar masa de pământ sau de rocă începe să se deplaseze în jos, urmând calea impusă de panta terenului. Această pierdere a echilibrului poate fi rezultatul unor fenomene naturale - ploi abundente, topirea zăpezilor, cutremure - sau poate fi accentuată de activităţile umane, atunci când versanţii sunt tăiaţi, supraîncărcaţi sau lipsiţi de vegetaţia care îi stabiliza.

În perioada premergătoare unei alunecări, versantul poate transmite semnale subtile: apar fisuri în sol, copacii se înclină într-o direcţie nefirească, drumurile prezintă crăpături sau se formează mici trepte pe terenul înclinat. Sunt indicii care arată că masa de teren începe să se mişte, chiar dacă mişcarea este prea lentă pentru a fi observată de la o zi la alta. Alteori însă, procesul este rapid: o ploaie puternică poate satura brusc solul cu apă, reducându-i coeziunea şi transformându-l într-o masă alunecoasă, predispusă la deplasare.

Când alunecarea se declanşează, materialul se pune în mişcare în funcţie de proprietăţile sale: uneori sub forma unui bloc compact care alunecă pe un plan clar definit, alteori sub forma unei mase amestecate, care se deformează şi se fragmentează pe parcurs. În zonele cu soluri argiloase, mişcarea este adesea lentă şi ondulatorie, ca şi cum versantul „ar respira" în timp ce înaintează. În schimb, în terenurile mai instabile sau în condiţii extreme, alunecarea poate deveni rapidă şi violentă, purtând cu sine arbori, roci şi chiar construcţii.

Principalele mecanisme implicate sunt:

- creşterea conţinutului de apă (precipitaţii abundente, topirea zăpezii);
- vibraţii seismice sau alte mişcări tectonice;
- tăieri artificiale de pantă, construcţii, defrişări;
- alterarea geologică a materialului (argilizare, fracturare, eroziune).

Alunecarea începe adesea lent, cu mici deplasări, dar poate evolua brusc într-un proces rapid şi distructiv. Viteza mişcării variază de la câţiva milimetri pe an (deplasări lente) la zeci de metri pe secundă (prăbuşiri catastrofale).

Termenul alunecare de teren se referă la o gamă largă de mişcări descendente de pe pante, care implică solul, rocile sau alte materiale de suprafaţă. Ele sunt puse în mişcare de gravitaţie şi apar atunci când forţele de deplasare (greutatea materialului, apa infiltrată etc.) depăşesc rezistenţa internă a rocilor sau a solului.

Factorii declanşatori sunt numeroşi:

- cutremurele,
- topirea rapidă a zăpezii,
- ploile intense,
- creşterea nivelului apelor subterane,
- eroziunea la baza versanţilor produsă de râuri, precum şi
- activităţile umane (defrişări, drumuri, construcţii).

În anumite cazuri, erupţiile vulcanice pot iniţia procese similare.

Clasificarea alunecărilor de teren are un rol esenţial în înţelegerea mecanismelor de formare şi evoluţie a acestor procese, dar şi în elaborarea măsurilor de prevenire şi stabilizare. O clasificare corectă trebuie să permită nu doar descrierea fenomenului în funcţie de aspectele sale morfologice şi dinamice, ci şi aprecierea potenţialului de evoluţie în timp - adică posibilitatea extinderii, reactivării sau accelerării alunecării.

Din perspectivă aplicativă, clasificările utilizate în practică trebuie să fie clare, operaţionale şi eficiente, astfel încât să conducă la identificarea celor mai potrivite soluţii de intervenţie pentru stabilizarea terenurilor afectate.

În funcţie de scopul analizei şi de domeniul de aplicare (geologic, geomorfologic, geotehnic sau ingineresc), pot fi folosite diferite criterii de clasificare.

a) După natura materialului

• roci consolidate - se produc în formaţiuni masive (calcare, gresii, şisturi), de obicei sub formă de prăbuşiri şi rostogoliri.

• depozite neconsolidate (soluri) - alunecări rotative, translaţionale sau curgeri de noroi.

b) După mecanismul mişcării

• căderi (falls) - desprinderea şi căderea liberă a blocurilor de rocă; frecvente în zonele montane abrupte.

• rostogoliri (topples) - rotirea blocurilor rigide în jurul unui punct de pivotare, urmată de prăbuşire.

• alunecări propriu-zise (slides) - mişcarea unui bloc compact de material pe o suprafaţă de alunecare bine definită.

După caracterul mişcării acestea pot fi:

- rotaţionale. Se formează în depozite omogene, alcătuite în special din argile sau şisturi relativ uniforme. Suprafaţa de alunecare poate fi circulară, caz în care masa alunecată nu este deformată, sau necirculară, când masa alunecată este parţial deformată; au o lungime limitată şi se produc pe pante mai abrupte;
- de translaţie - se dezvoltă pe suprafeţe de stratificaţie sau pe o altă suprafaţă preexistentă; sunt de obicei lungi şi au loc pe pante line.
- curgere (flows) - materialul se comportă ca un fluid vâscos (noroi, argilă, amestec de apă şi fragmente de rocă).
- deformări lente (creep) - deplasări foarte lente, adesea imperceptibile, care afectează solul de suprafaţă.
- avalanşe de resturi (debris avalanches) - amestecuri rapide de fragmente de rocă, sol şi vegetaţie, declanşate de ploi torenţiale sau cutremure.

c) După viteză de alunecare. Viteza de deplasare a maselor de teren constituie unul dintre criteriile fundamentale în analiza şi clasificarea alunecărilor, deoarece ea reflectă energia procesului, gradul de pericol şi tipul de măsuri necesare pentru stabilizare.

Conform clasificării propuse de Sharpe şi Eckel, alunecările pot fi grupate în funcţie de viteza de mişcare astfel (Dumitriu, 2021):

- extrem de rapide, cu o viteză mai mare de 3 m/s, corespunzătoare unor deplasări bruşte şi violente, care pot produce distrugeri semnificative;

- foarte rapide, cu viteze cuprinse între 3 m/s şi 0.3 m/min, caracteristice alunecărilor active pe versanţi abrupţi, declanşate adesea de ploi torenţiale sau cutremure;
- moderate, cu viteze de aproximativ 1.5 m/zi - 1.5 m/lună, specifice proceselor de alunecare continuă în condiţii de umiditate crescută;
- lente, cu viteze între 1.5 m/lună şi 1.5 m/an, adesea greu de observat direct, dar cu efecte vizibile în deformarea treptată a terenului;
- foarte lente, cu viteze sub 1.5 m/an, până la aproximativ 0.06 m/an, corespunzătoare proceselor de tip creep (deformări lente şi continue) - o mişcare extrem de lentă, aproape imperceptibilă, dar constantă, care duce la înclinarea arborilor, gardurilor sau fisurarea drumurilor şi construcţiilor.

Un caz particular al acestor mişcări îl constituie curgerile plastice, care sunt deplasări extrem de lente ale maselor de teren. Acestea nu prezintă o suprafaţă de alunecare clar delimitată, ci se caracterizează printr-o deformare plastică a materialului în profunzime, în special în depozite groase, argiloase sau loessoide.

Curgerile plastice indică, prin urmare, o stare avansată de instabilitate internă a terenului, fiind procese greu de detectat pe termen scurt, dar importante în evaluarea evoluţiei pe termen lung a versanţilor.

d) După cauză

- naturale - produse de factori geomorfologici şi climatici;
- antropice - determinate de defrişări, drumuri, exploatări miniere, construcţii, reţele de apă şi canalizare care modifică drenajul natural.

Fiecare sistem de clasificare a alunecărilor de teren evidenţiază, de fapt, o anumită proprietate a procesului: natura materialului, adâncimea suprafeţei de alunecare, viteza de deplasare, mecanismul de mişcare sau stadiul de evoluţie. De aceea, pentru a obţine o caracterizare completă şi realistă a fenomenului, este necesară corelarea tuturor criteriilor de clasificare.

În practică, definirea unui tip simplu şi unitar de alunecare este adesea dificilă, deoarece procesele reale prezintă trăsături mixte şi o evoluţie complexă. Acest lucru este confirmat de numeroase exemple din teren.

De exemplu, o alunecare cu suprafaţa de alunecare situată la adâncimi mari, sub formă de glimee , se caracterizează printr-o viteză de deplasare foarte lentă. Ea se formează de obicei de la baza versantului şi evoluează regresiv, adică în sens contrar înclinării stratelor geologice, înaintând treptat către cumpăna de ape.

Din punct de vedere genetic și structural, acest tip de mișcare este o alunecare consecventă în faza finală, dezvoltată pe un plan de stratificație - ceea ce o încadrează în categoria alunecărilor de translație.

Procesul descris s-a produs în timpul Pleistocenului, deci reprezintă o alunecare veche, stabilizată. Cu toate acestea, fiecare glimee poate fi, la rândul ei, afectată de alunecări superficiale recente, mai ales în condiții de ploi abundente sau de modificare a drenajului natural.

Arealul respectiv continuă să fie modelat de alte procese geomorfologice active, în special de torențialitate, care accentuează eroziunea și favorizează reactivarea parțială a alunecărilor vechi. Astfel de zone prezintă un risc geomorfologic ridicat, necesitând monitorizare permanentă și măsuri complexe de stabilizare.

La nivel mondial, alunecările de teren sunt un hazard major. Sunt cunoscute: alunecarea de la Muntele St. Helens (SUA, 1980), legată de erupția vulcanică; alunecarea de la Usoy (Tadjikistan, 1911), produsă de un cutremur; dezastrul barajului Vaiont (Italia, 1963), cu aproape 2000 de victime; tragedia din Yungay (Peru, 1970), unde cutremurul și avalanșa de rocă au îngropat un oraș întreg; și evenimentul din La Conchita (California, 2005), provocat de ploi abundente.

Dincolo de mecanisme, impactul alunecărilor de teren este profund. Ele pot bloca drumuri, pot distruge gospodării, pot devasta suprafețe agricole sau pot modifica cursuri de apă. Mai mult, consecințele nu se opresc odată cu oprirea mișcării: versantul rămas în urmă rămâne, de regulă, instabil și poate da naștere unor noi alunecări în viitor, dacă nu se intervine corespunzător.

În multe regiuni, inclusiv în Republica Moldova, alunecările de teren fac parte din „peisajul natural", dar frecvența lor este adesea amplificată de activitățile umane: defrișări, lucrări necorespunzătoare pe versanți, lipsa drenajului, construcții plasate în zone vulnerabile. De aceea, cunoașterea modului în care se formează și evoluează aceste procese nu are doar un rol academic, ci și unul practic. Înțelegerea versantului ca sistem dinamic ne ajută să prevenim degradarea terenurilor și să reducem riscurile asociate locuirii sau exploatării zonelor înclinate.

Prăbușirile/surpările/rostogolirile. Dacă alunecările de teren sunt procese care pot evolua lent, cu semnale prevestitoare, prăbușirile și căderile de blocuri reprezintă, dimpotrivă, reacții bruște ale reliefului (Dumitriu, 2021). Ele se produc în special pe versanții abrupți, unde roca este expusă direct acțiunii gravitației și a factorilor externi. Totul pare stabil până în clipa în care, printr-

un mecanism adesea invizibil la suprafață, un bloc de stâncă se desprinde și cade cu o forță impresionantă.

Prăbușirile au de obicei la origine un proces lent de „pregătire", care se desfășoară chiar dacă nu îl putem observa. Rocile masive, oricât de solide ar părea, conțin fisuri, planuri de slabă rezistență sau microfracturi formate în timp. Aceste discontinuități pot fi rezultatul înghețului și dezghețului repetat, al infiltrării apei, al variațiilor de temperatură sau pur și simplu al îmbătrânirii materialului geologic. Toate aceste elemente slăbesc treptat structura rocii și creează condițiile pentru o desprindere bruscă.

Acest moment critic poate fi declanșat de un episod de ploaie intensă, de topirea zăpezii, de vibrații provocate de trafic sau de un cutremur, chiar și unul de intensitate redusă. În astfel de situații, blocul de rocă își pierde brusc echilibrul și cade, punând în mișcare o energie proporțională cu masa sa. În câteva secunde, versantul își schimbă înfățișarea, iar în josul pantei pot apărea linii de impact, cratere mici sau halouri de blocuri sfărâmate.

Principalele cauze ale prăbușirilor sunt:

- înclinarea accentuată a stratelor geologice, care favorizează desprinderea blocurilor de rocă;
- diaclazarea și fisurarea intensă a formațiunilor litologice, care reduce coeziunea internă;
- adâncirea sau eroziunea laterală a râurilor, care destabilizează baza versanților;
- subsaparea versanților prin activități antropice (exploatări miniere, lucrări de terasament, drumuri etc.);
- vibrațiile și variațiile de umiditate, care pot accelera desprinderea maselor instabile.

Prăbușirile apar, de obicei, în roci compacte și coezive (calcare, gresii, bazalte) care, în timp, au fost fisurate și dezagregate sub acțiunea factorilor externi.

Există și cazuri de prăbușiri verticale ale unor mase de teren situate deasupra cavităților subterane, cum ar fi peșteri naturale, mine sau goluri rezultate din dizolvarea rocilor solubile (ex.: sare, ghips). Un exemplu cunoscut îl constituie prăbușirile de la Ocnele Mari (România), generate de exploatarea subterană a sării și de pierderea stabilității acoperișului cavităților (Grecu, 2009).

Căderile de blocuri reprezintă forma cea mai spectaculoasă a acestor procese, dar și cea mai periculoasă. Ele au loc rapid, fără avertismente, și pot

afecta drumuri, trasee turistice, zone locuite sau terenuri cultivate. În multe regiuni montane, aceste procese sunt considerate „normale”, parte a modului în care relieful se ajustează permanent. Totuşi, când infrastructura sau activitatea umană întâlnesc astfel de zone, riscul devine imediat evident.

Un exemplu simplu este acela al drumurilor care şerpuiesc la poalele unor versanţi abrupţi. Mulţi şoferi observă plasele metalice fixate pe stâncă, fără să realizeze că, în lipsa lor, prăbuşirile ar putea ajunge direct pe carosabil. De asemenea, traseele turistice sunt adesea deviate sau marcate cu avertismente atunci când riscul de căderi de pietre devine ridicat, mai ales după perioade cu ploi puternice sau îngheţ.

Dincolo de spectacolul geologic pe care îl implică, prăbuşirile şi căderile de blocuri ne amintesc un lucru esenţial: stabilitatea aparentă a unui versant abrupt este doar rezultatul unui echilibru fragil. Forţele interne din masivul stâncos, combinate cu acţiunea factorilor externi, modelează în permanenţă relieful, iar desprinderile bruşte sunt expresia vizibilă a unui proces lent, de lungă durată.

Aceste fenomene au un impact semnificativ asupra mediului şi infrastructurii, fiind considerate procese gravitaţionale de risc major, specifice zonelor montane şi submontane, dar posibile şi în regiuni de câmpie cu exploatări subterane active.

Surpările reprezintă procese de cedare bruscă a stabilităţii terenului, care apar de regulă în roci sau depozite cu coeziune redusă, predispuse la deformare prin întindere şi forfecare. Astfel de materiale includ marnele, argilele şi loessurile, care, prin natura lor, au o rezistenţă scăzută la eforturile mecanice.

Aceste procese se declanşează atunci când panta naturală de echilibru este depăşită, de obicei ca urmare a pierderea suportului de la baza versantului. Această destabilizare se produce prin eroziune fluvială, marină sau lacustră, care sapă la baza pantei şi favorizează deplasarea maselor superioare.

Surpările sunt frecvente pe malurile concave ale râurilor, mai ales în sectoarele de coturi, unde curentul are energie mai mare şi erodează intens baza versantului. Fenomene similare se întâlnesc şi pe falezele marine sau lacustre, unde acţiunea valurilor are efecte de subsăpare.

În cazul loessurilor şi depozitelor loessoide, surpările se produc adesea în lanţ (în releu), adică în succesiune de trepte, pe măsură ce materialul cedează progresiv. Prin acumularea acestor mişcări succesive se formează terase de surpare, care constituie forme de relief caracteristice acestor zone instabile.

În concluzie, surpările sunt procese gravitaţionale de risc moderat spre ridicat, având o dinamică rapidă şi o distribuţie specifică în regiunile cu roci friabile şi maluri erodabile, unde interacţiunea dintre apă şi relief determină pierderea echilibrului geomecanic al terenului.

Rostogolirile reprezintă procese de mişcare a particulelor şi blocurilor de rocă determinate de pierderea echilibrului static al acestora, sub acţiunea combinată a trei factori principali:

- greutatea proprie a masei de material,
- înclinarea versantului (panta),
- şi forţa gravitaţională.

Viteza de deplasare a fragmentelor este direct proporţională cu unghiul pantei - cu cât versantul este mai abrupt, cu atât mişcarea materialelor este mai rapidă şi mai energică.

Desprinderea şi deplasarea particulelor se realizează individual, în funcţie de dimensiunea şi greutatea fiecărui fragment. Tipul de mişcare specific acestui proces este rostogolirea. Blocurile mai mari de rocă tind să se deplaseze pe distanţe mai lungi, ajungând adesea la baza versantului, în timp ce fragmentele mai mici se opresc mai aproape de locul desprinderii.

Ca urmare a acestui proces se formează trene de grohotiş, atunci când panta este relativ uniformă pe o distanţă mare, sau conuri de grohotiş (cunoscute şi ca formaţiuni de rostogolire sau formations d'éboulis, slide rock), în zonele unde panta se frânge brusc la baza versantului.

În evoluţia lor, aceste formaţiuni tind să atingă un echilibru morfologic: materialele instabile sunt treptat consolidate şi acoperite de un strat fin de particule rezultate din dezagregare şi de sol în formare. În acest stadiu, se dezvoltă o zonă de tranziţie (unitate de racord) între versantul abrupt şi baza sa mai plană, care contribuie la stabilizarea reliefului local.

Înţelegerea acestor procese este importantă nu doar prin prisma riscurilor, ci şi pentru a înţelege dinamica zonelor montane. Prăbuşirile fac parte din ciclul natural prin care munţii se erodează şi se transformă.

Avalanşele sunt procese gravitaţionale prin care mase mari de zăpadă şi gheaţă se deplasează rapid la vale, prin alunecare, rostogolire sau curgere, sub acţiunea propriei greutăţi. Pe măsură ce înaintează în aval, aceste mase îşi măresc volumul, greutatea şi viteza, devenind fenomene extrem de periculoase pentru oameni, infrastructuri şi ecosisteme montane.

Termenul provine din franţuzescul avaler – „a coborî", iar în literatura mai veche se utiliza şi forma lavalanşă, analogă cu lava, pentru a descrie curgerea în

lanț a materialului. În limbajul montanierilor, termenii avalanșă sau lavină desemnează toate mișcările masive de zăpadă și gheață care se desprind și coboară de pe versanți abrupți.

Pentru a înțelege avalanșele, este important să știm că zăpada depusă pe un versant nu este niciodată uniformă. Fiecare ninsoare adaugă un strat nou, cu o structură diferită: uneori zăpada este afânată și ușoară, alteori umedă și grea, iar alteori înghețată și dură ca un strat de gheață subțire. Aceste straturi nu se leagă întotdeauna bine între ele. Între ele pot exista suprafețe fragile, unde zăpada aderă slab, ca o carte de vizită așezată pe o masă alunecoasă. Este suficient ca un strat inferior să nu poată susține presiunea celor de deasupra pentru ca întregul sistem să se destabilizeze.

Factorii care declanșează avalanșele sunt numeroși. Ninsorile abundente, schimbările bruște de temperatură sau rafalele puternice de vânt pot modifica rapid greutatea sau distribuția zăpezii pe versant. Topirea bruscă a zăpezii poate crea pelicule de apă între straturi, reducând coeziunea acestora. În anumite situații, chiar și o vibrație minoră - trecerea unui schior, zgomotul unui motor sau un animal care traversează panta - poate declanșa alunecarea masei instabile.

Ca și în cazul altor procese gravitaționale, formarea și declanșarea avalanșelor depind de doi mari grupuri de factori:

Factorii potențiali (favorizanți). Aceștia definesc condițiile de formare a stratului de zăpadă și predispoziția terenului la declanșarea avalanșei:

- acumularea zăpezii – în special în zonele umbrite sau pe versanți cu înclinare mare;
- structura stratificată a zăpezii, cu alternanțe între straturi compacte și straturi friabile sau înghețate;
- rezistența redusă a stratului de zăpadă, determinată de variațiile de temperatură, umiditate și densitate.

Factorii declanșatori (activi). Aceștia sunt elementele care rup echilibrul instabil al masei de zăpadă și determină declanșarea mișcării:

- depunerea excesivă a zăpezii sau creșterea greutății sale peste pragul de rezistență (când factorii potențiali ating valori critice);
- vântul, care poate redistribui zăpada și forma cornișe instabile;
- trepidațiile antropice, cum ar fi zgomotele puternice, detonările sau activitatea turistică;
- cutremurele, care pot destabiliza masele de zăpadă depuse pe pante abrupte.

Avalanşele reprezintă, prin urmare, manifestări naturale complexe ce combină condiţiile climatice, topografice şi mecanice ale mediului montan. În multe regiuni alpine, acestea constituie un risc geomorfic major, motiv pentru care monitorizarea şi prevenirea lor fac parte din strategiile de management al riscurilor naturale (Grecu, 2009).

Structura şi comportamentul stratului de zăpadă influenţează în mod direct tipul şi dinamica avalanşelor. În condiţiile montane, zăpada suferă în timp transformări fizice complexe - proces cunoscut sub numele de diageneză –, prin care cristalele iniţiale se transformă în zăpadă granulară rotunjită, cu proprietăţi diferite de coeziune şi stabilitate.

Pe baza acestor caracteristici, L. Lliboutry (1965) propune o clasificare a avalanşelor în funcţie de natura zăpezii şi de mecanismul de deplasare:

- avalanşe pudroase - formate din zăpadă uscată şi fină, care se deplasează rapid sub formă de nor dens, însoţite de o mare viteză şi putere de distrugere;
- avalanşe în plăci - produse prin alunecarea unui strat compact de zăpadă deasupra unui strat instabil, de obicei pe versanţi abrupţi;
- avalanşe de zăpadă umedă - declanşate în perioadele de încălzire, când topirea parţială a zăpezii reduce coeziunea dintre straturi;
- avalanşe de primăvară – caracteristice perioadei de topire masivă, când zăpada saturată de apă se deplasează lent, dar cu volum mare.

Ulterior, Gumuchian (1983) (citat de Voiculescu, 2002) a adaptat această clasificare, menţinând criteriul principal al caracteristicilor zăpezii, dar introducând şi forme intermediare:

- avalanşe de zăpadă recentă;
- avalanşe de zăpadă pudroasă;
- avalanşe mixte (care combină zăpadă uscată şi umedă);
- avalanşe în plăci;
- avalanşe rezultate din topirea zăpezilor de primăvară.

În literatura de specialitate, există şi alte clasificări care, pe lângă proprietăţile zăpezii, iau în considerare o serie de criterii geomorfologice şi mecanice, precum:

- cauza desprinderii (naturală sau antropică);
- tipul de desprindere (superficială sau profundă);
- modul de deplasare (alunecare, curgere, rostogolire);
- poziţia suprafeţei de alunecare (pe strat de gheaţă, pe strat umed, pe sol îngheţat etc.);

- forma traseului de deplasare (direct, ramificat sau în evantai).

Dincolo de spectaculozitatea lor, avalanşele reprezintă un risc major în arii montane. Pot bloca drumuri şi pot perturba infrastructura turistică, pot distruge cabane, pot afecta păduri întregi şi, în cazuri tragice, pot surprinde drumeţi sau schiori în zone în care versantul părea complet sigur cu doar câteva minute înainte. În regiunile montane unde avalanşele sunt frecvente, localnicii cunosc bine comportamentul zăpezii şi înţeleg cât de repede se poate schimba situaţia atunci când condiţiile meteo se modifică.

Totuşi, avalanşele nu sunt doar un pericol, ci şi un fenomen natural prin care munţii se remodelează şi se transformă. Prin deplasarea zăpezii, ele redistribuie materia, contribuie la formarea depozitelor nivale de la baza versanţilor şi influenţează dinamica pădurilor alpine. Acolo unde păşunile sau pădurile sunt afectate, natura revine treptat, adaptându-se unui ciclu de perturbări care, chiar dacă pare violent, face parte din ritmul firesc al zonelor alpine.

Avalanşele oferă o lecţie importantă: stabilitatea unui strat de zăpadă este doar aparentă, iar forţele care acţionează în interiorul lui sunt adesea invizibile la suprafaţă. Înţelegerea acestui fenomen înseamnă nu doar a cunoaşte mecanismele sale, ci a învăţa să privim relieful ca pe un sistem viu, sensibil la schimbări, mereu în mişcare.

Regiuni expuse riscului asociat proceselor gravitaţionale

Procesele gravitaţionale îşi fac simţită prezenţa în numeroase regiuni ale lumii, însă intensitatea şi frecvenţa lor diferă în funcţie de relief, geologie şi condiţiile climatice locale. În zonele montane sau deluroase, versanţii par adesea solizi şi stabili, dar în interiorul lor se ascund fragilităţi care, în anumite condiţii, pot declanşa mişcări rapide sau lente ale materialelor de la suprafaţă.

Prăbuşirile şi rostogolirile sunt printre cele mai comune procese în astfel de regiuni. Deşi implică adesea volume relativ mici de material, energia cu care acestea se produc este remarcabilă. Un singur bloc de stâncă desprins dintr-un perete abrupt poate străbate zeci de metri în câteva secunde, lăsând în urmă un traseu clar şi potenţial distructiv. Aceste procese sunt tipice acolo unde rocile prezintă fisuri, diaclaze sau discontinuităţi, iar stabilitatea versantului depinde doar de un echilibru temporar. Nu este vorba doar despre munţi; chiar şi în zone de câmpie, malurile abrupte ale râurilor pot deveni instabile atunci când curentul subminează baza versantului.

În alte situaţii, instabilitatea versanţilor se manifestă treptat, sub forma unor deformări lente, aproape insesizabile la început. Aşa apar deplasările

laterale, caracteristice acelor regiuni unde un strat rigid de la suprafaţă se sprijină pe un substrat mai plastic, adesea argilos sau marnoasă. Pe măsură ce apa se infiltrează, iar presiunile interne se acumulează, masa superioară începe să „alunece” încet, fracturându-se şi fragmentându-se, de parcă relieful s-ar desface în plăci care se îndepărtează una de alta. Acest tip de proces nu creează neapărat o suprafaţă clară de rupere, dar lasă urme evidente în peisaj: zone uşor scufundate, copaci înclinaţi, trepte pe pante aparent line. Regiunile colinare, cu alternanţe între straturi rigide şi depozite clastice moi, sunt deosebit de sensibile la astfel de fenomene

Avalanşele reprezintă o categorie aparte de procese gravitaţionale, specifice mediului montan. Acolo, stabilitatea zăpezii depinde de felul în care aceasta se aşază pe versant şi de modul în care diferitele straturi interacţionează între ele. Pe pantele abrupte, de peste 30–45°, chiar şi o mică schimbare de temperatură poate transforma stratul nival într-o masă instabilă, predispusă la alunecare. Versanţii expuşi soarelui sunt mai sensibili în perioadele de topire, când zăpada devine umedă şi grea, în timp ce versanţii umbriţi favorizează avalanşele de zăpadă uscată, adesea rapide şi extinse. În zonele în care panta scade, procesul îşi pierde intensitatea şi masa de zăpadă se opreşte treptat, pierzându-şi energia.

Un alt tip de mişcare este reprezentat de curgerile de pământ, specifice versanţilor domoli sau moderaţi, acolo unde materialul este fin granular şi sensibil la umezeală. În perioadele cu precipitaţii abundente, solul se satură şi începe să se comporte ca o pastă vâscoasă, deplasându-se încet în aval. Aceste curgeri apar adesea în climate cu alternanţe accentuate între secetă şi ploi intense, unde fisurarea solului şi re-umezirea subită creează condiţiile necesare pentru pierderea coeziunii. De multe ori, alunecările clasice sau deplasările laterale pot evolua în astfel de curgeri, dacă materialul iniţial dislocat este suficient de umed şi de fin.

La scară globală, regiunile cele mai expuse acestor procese sunt cele cu relief muntos sau puternic fragmentat: Anzii, Alpii, Himalaya, Carpaţii, dar şi zonele vulcanice ale Indoneziei, Filipinelor şi Japoniei, unde combinaţia dintre pante abrupte, precipitaţii intense şi activitate seismică creează un context deosebit de vulnerabil. În Asia de Sud-Est, ploile musonice determină anual declanşarea a mii de mişcări de masă, afectând comunităţi dens populate. În America Centrală şi de Sud, defrişările accentuează fragilitatea solurilor, accelerând procesele gravitaţionale în zone deja expuse.

În Republica Moldova, deşi relieful este mai blând decât în regiunile montane, alunecările de teren sunt un fenomen frecvent şi adesea sever. Versanţii abrupţi ai Prutului, Răutului, Ichelului şi Cogâlnicului reprezintă arealele cu cea mai mare predispoziţie, iar structura geologică - dominată de argile şi marne - contribuie decisiv la instabilitate. Podişul Moldovei Centrale este, fără îndoială, zona cea mai afectată, unde alunecările se declanşează uşor în urma precipitaţiilor abundente sau a topirii rapide a zăpezii. Episodul de la Costeşti din 1991, când o alunecare a distrus peste o sută de case, rămâne unul dintre cele mai cunoscute exemple ale vulnerabilităţii versanţilor moldoveneşti.

Analizele recente arată că zonele colinare din nordul şi centrul ţării, în special Codrii, Orheiul şi Podişul Nistrului, concentrează cea mai mare parte a proceselor de instabilitate. Straturile geologice alternante, permeabile şi impermeabile, favorizează acumularea apei şi declanşarea mişcărilor de masă. Zonele sudice, precum Cimişlia, Leova sau Ştefan Vodă, prezintă o densitate mai redusă a proceselor, însă alunecări locale apar frecvent pe malurile abrupte ale Prutului şi Ialpugului (figura 6.2.a). Suprapunerea hărţilor cu terenuri deja afectate confirmă această distribuţie: cele mai mari suprafeţe degradate, depăşind adesea 2000 de hectare, se regăsesc în raioanele Nisporeni, Străşeni, Hânceşti, Călăraşi şi Orhei, toate caracterizate printr-o instabilitate geomorfologică ridicată (figura 6.2.b).

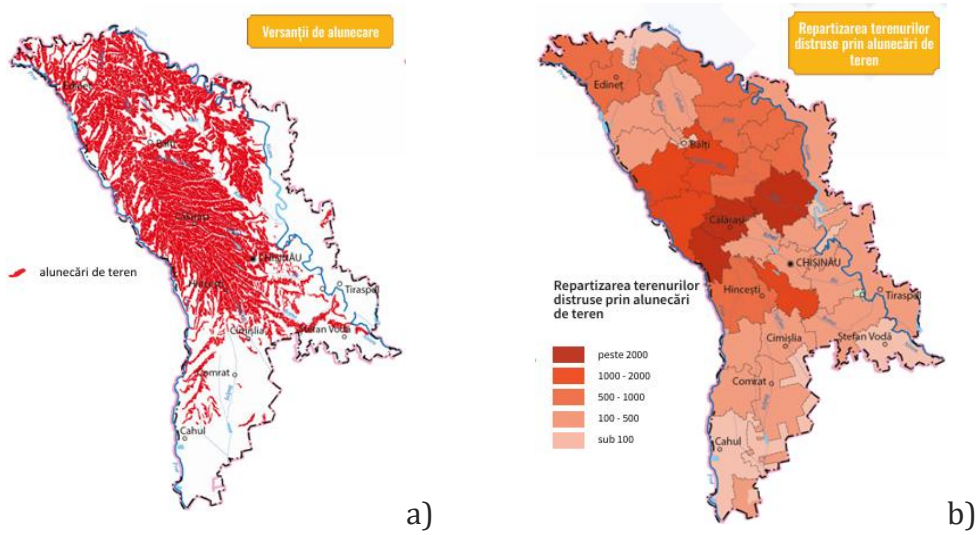


Figura 6.2. Distribuţia versanţilor în alunecare (a) şi a terenurilor distruse prin alunecări de teren (b) pe teritoriul Republicii Moldova (Bejan, et al., 2023)

Din perspectiva riscului natural, alunecările de teren constituie unul dintre cele mai extinse și active procese gravitaționale din Republica Moldova. Ele afectează stabilitatea versanților, terenurile agricole, infrastructura și localitățile rurale, contribuind la degradarea peisajului și a solurilor. Reducerea riscului presupune monitorizarea permanentă a versanților, împădurirea zonelor instabile, îmbunătățirea drenajului natural și restricționarea construcțiilor în arealele vulnerabile.

Privite în ansamblu, procesele gravitaționale reflectă fragilitatea reliefului în fața acțiunilor naturale și antropice. Ele ne arată că stabilitatea versanților depinde de un echilibru delicat, în care geologia, clima și modul de utilizare a terenului joacă roluri esențiale. Înțelegerea acestor mecanisme și a regiunilor vulnerabile reprezintă un pas important în prevenirea degradării terenurilor și în protejarea comunităților aflate în zonele de risc.

Efecte asupra mediului și societății

Procesele gravitaționale lasă întotdeauna urme vizibile în peisaj, însă efectele lor nu se rezumă doar la transformarea formei reliefului. De cele mai multe ori, consecințele se propagă dincolo de locul unde mișcarea s-a produs, afectând ecosisteme, infrastructuri, gospodării și activități economice. În funcție de intensitatea și amploarea proceselor, impactul lor poate fi discret, aproape invizibil la început, sau, dimpotrivă, abrupt și devastator.

În primul rând, procesele gravitaționale modifică structura și stabilitatea versanților. O alunecare lentă poate părea, la suprafață, o simplă deformare, însă în profunzime ea schimbă distribuția tensiunilor din sol și poate pregăti terenul pentru mișcări ulterioare mai ample. Prăbușirile de blocuri sau rostogolirile repetate fragmentează treptat versanții abrupți, slăbind coeziunea maselor de rocă și favorizând procesele de înaintare a eroziunii.

Efectele asupra mediului sunt adesea complexe. Vegetația este una dintre primele componente afectate. Copacii pot fi smulși, răsturnați sau îngropați de masa de material, iar plantele de la suprafață pot fi distruse complet. În zonele în care procesul se repetă, apar suprafețe instabile, greu de reîmpădurit, unde regenerarea naturală este lentă și dificilă. De asemenea, mișcările de masă modifică regimul hidric al versanților, schimbând direcția de scurgere a apelor sau blocând temporar cursuri mici de apă, ceea ce poate duce la bălțiri sau formarea unor lacuri temporare.

Alunecările de teren și fenomenele asociate acestora au capacitatea de a produce distrugeri semnificative și pierderi de vieți omenești. Efectele directe ale alunecărilor de teren asupra populației și a bunurilor includ lovirea sau

îngroparea oamenilor sub masele de material dislocat. Alunecările pot, de asemenea, distruge locuințe, drumuri și rețele de utilități amplasate pe sau în apropierea versanților. În mod frecvent, acestea blochează drumurile și căile ferate, întrerupând circulația timp de zile sau chiar săptămâni (Keller & DeVecchio, 2016).

Alunecările pot afecta chiar și transportul naval. În 1980, o curgere de aluviuni generată de erupția vulcanului Mount St. Helens a umplut râul Columbia cu peste 34 milioane m^3 de sedimente, blocând accesul navelor de marfă către orașul Portland, Oregon, până la finalizarea lucrărilor de dragare.

Efectele indirecte includ formarea de inundații amonte ca urmare a blocării albiei unui râu de către o alunecare, precum și răspândirea unor boli prin spori fungici eliberați în atmosferă. Aceste exemple evidențiază amploarea consecințelor alunecărilor de teren, atât prin impactul lor imediat asupra mediului construit și natural, cât și prin efectele economice și sociale pe termen lung.

Având în vedere că aproximativ 90% din suprafața terestră neacoperită de ghețari este alcătuită din versanți cu grade variabile de înclinare (Huggett, 2016), procesele de deplasare în masă nu mai pot fi privite doar ca fenomene naturale implicate în modelarea reliefului, ci tot mai mult ca amenințări semnificative la adresa comunităților umane și a mediului înconjurător.

Această categorie de procese geomorfologice – care include alunecările de teren, prăbușirile, surpările, curgerile de pământ sau de noroi – se înscrie printre cele mai distructive tipuri de hazarduri naturale, cu efecte socio-economice și ecologice extinse la scară globală (Grecu, 2009).

Distribuția spațială a acestor evenimente arată că peste 54% dintre cazurile raportate s-au produs în Asia, regiune caracterizată prin relieful muntos extins, densitatea mare a populației și precipitațiile extreme. Totuși, este important de subliniat că în baza EM-DAT sunt incluse doar evenimentele cu cel puțin 10 victime, ceea ce determină o subestimare semnificativă a numărului real de decese și de persoane afectate.

Ca urmare, în ultimul deceniu, tot mai multe cercetări internaționale au urmărit o estimare mai precisă a impactului uman al deplasărilor în masă, prin integrarea datelor din surse regionale, observații satelitare și raportări locale. Aceste eforturi contribuie la o mai bună înțelegere a vulnerabilității comunităților expuse, dar și la fundamentarea măsurilor de prevenire, avertizare și gestionare a riscurilor geomorfologice.

Impactul alunecărilor de teren asupra societăţii trebuie analizat dintr-o perspectivă complexă, care include atât efectele directe, cât şi efectele indirecte ale acestor procese.

Efectele directe sunt cele care se manifestă imediat după declanşarea fenomenului şi se referă la pierderile umane, distrugerea infrastructurii (drumuri, locuinţe, conducte, linii electrice) şi modificarea rapidă a reliefului. În cazul alunecărilor de adâncime, care pot atinge dimensiuni şi viteze considerabile, aceste consecinţe pot fi deosebit de grave, mai ales atunci când procesele se produc în areale locuite sau în apropierea căilor de comunicaţie.

Efectele indirecte se manifestă pe termen lung şi includ transformarea reliefului prin apariţia de forme secundare specifice (trepte de alunecare, glimee, oglinzi de alunecare, depresiuni de acumulare), dar şi degradarea fertilităţii solurilor. Suprafeţele afectate îşi pierd treptat capacitatea de utilizare agricolă, iar terenurile devin improprii pentru construcţii sau activităţi economice. Din acest motiv, riscul geomorfic asociat alunecărilor de teren are un caracter persistent, manifestându-se adesea pe termen îndelungat, chiar şi după stabilizarea aparentă a versanţilor.

Recunoaşterea arealelor afectate se realizează prin analiza morfologiei versanţilor, care prezintă un profil neregulat şi discontinuu, precum şi prin studierea asociaţiilor vegetale, ce reflectă variaţii microclimatice şi pedologice locale. Vegetaţia dispunându-se haotic sau având specii cu cerinţe ecologice diferite semnalează, de obicei, instabilitatea solului şi prezenţa unor alunecări vechi sau reactivabile.

Pentru comunităţile umane, consecinţele sunt dintre cele mai sensibile. Chiar şi o alunecare de dimensiuni moderate poate afecta terenuri agricole, poate bloca drumuri sau poate avaria reţele de apă, electricitate sau canalizare. În zonele rurale, unde gospodăriile sunt adesea construite pe sau în apropierea versanţilor, riscul devine imediat vizibil: case fisurate, garduri deformate, anexe distruse, grădini şi livezi acoperite de materialul deplasat. În cazurile extreme, alunecările pot rupe drumuri naţionale sau liniile electrice, izolând comunităţi întregi.

Impactul social este adesea mai profund decât pare la prima vedere. O alunecare care distruge case sau blochează accesul la infrastructură afectează nu doar bunuri materiale, ci şi siguranţa şi stabilitatea familiilor. Mutarea oamenilor, repararea pagubelor, reamenajarea terenurilor – toate acestea pot dura luni sau chiar ani, generând costuri ridicate şi presiune asupra bugetelor locale.

La nivel economic, pierderile pot fi considerabile. Agricultorii pierd terenuri fertile, iar lucrările de consolidare necesare pentru stabilizarea versanților sunt costisitoare și necesită expertiză tehnică. În zonele turistice montane, avalanșele pot afecta pârtii, cabane sau trasee turistice, reducând atractivitatea zonei și generând pierderi financiare sezoniere.

Alunecările de teren produc modificări profunde asupra mediului natural, afectând atât structura solului și a vegetației, cât și echilibrul hidrologic al zonelor vizate. Prin dinamica lor bruscă sau lentă, aceste procese determină fragmentarea peisajului, schimbarea regimului de scurgere a apei, pierderea stratului fertil și transformarea habitatelor naturale.

Prin urmare, alunecările de teren nu trebuie privite doar ca procese naturale de remodelare a reliefului, ci ca hazarduri complexe, cu implicații economice, ecologice și sociale majore, care impun o monitorizare atentă și o gestiune responsabilă a teritoriului în regiunile predispuse.

În lunile premergătoare alunecării de teren catastrofale din 29 aprilie 1903, minerii care exploatau un strat de cărbune la baza muntelui au raportat zgomote neobișnuite. Cărbunele se desprindea de pe pereții minei, iar bârnele utilizate pentru susținerea acestora se spărgeau în bucăți.
Cu toate acestea, pentru cei 20 de mineri care au coborât în subteran în noaptea de 28 aprilie și pentru sutele de locuitori ai orașului Frank, Alberta, care se odihneau în locuințele lor, nu existau indicii că un dezastru era iminent. Apoi, la ora 4:10 a dimineții de 29 aprilie, în întuneric complet, un bloc de rocă cu o lățime de 900 m, o lungime de 650 m și o grosime de 150 m s-a desprins de pe versantul estic al Muntelui Turtle și s-a prăbușit în vale.
Masa de roci fragmentate s-a răspândit pe fundul văii, acoperind o suprafață de aproximativ 3km^2, atingând în unele locuri o adâncime de 30 m.
În anul 1903, localitatea Frank avea aproximativ 600 de locuitori; cel puțin 76 de persoane aflate pe traiectoria alunecării de teren și-au pierdut viața, printre care și trei mineri.
Alunecările de teren pot fi declanșate de activități antropice care fie cresc tensiunea exercitată asupra unei pante, fie reduc rezistența materialelor ce o compun. Deși exploatarea cărbunelui nu a reprezentat o cauză principală a alunecării de teren de la Frank, este posibil ca aceasta să fi diminuat stabilitatea masei de rocă deja instabile de pe Muntele Turtle, contribuind astfel la cedarea acesteia. Alte activități umane care pot declanșa alunecări de teren includ excavarea excesivă la baza pantelor, suprasarcinile aplicate în zonele superioare ale acestora, precum și introducerea apei în structura pantelor prin procese precum irigațiile sau amenajările peisagistice.

Unul dintre cele mai importante efecte este *degradarea solului*. Prin deplasarea maselor de teren, stratul superior, fertil, este dislocat, expunând orizonturile inferioare, sărace în materie organică. În unele cazuri, materialele transportate acoperă terenurile din aval, ducând la îngroparea vegetației și la înlocuirea solurilor productive cu depozite instabile. Acest proces contribuie la

scăderea capacității de regenerare a ecosistemelor și la pierderea productivității agricole.

Din punct de vedere hidrologic, alunecările pot modifica *direcția de scurgere a apelor de suprafață* și pot conduce la formarea de lacuri temporare sau baraje naturale, care uneori cedează brusc, generând viituri secundare. De asemenea, modificarea microreliefului afectează infiltrarea și drenajul apei, crescând riscul de saturare hidrică și de reactivare a alunecărilor vechi.

Ecosistemele forestiere și cele de pajiște sunt, de asemenea, puternic influențate. Vegetația de pe versanții instabili suferă pierderi masive prin dislocare, iar *diversitatea floristică scade* în favoarea speciilor pionier, adaptate la condiții de stres și substraturi instabile. În unele cazuri, alunecările generează noi nișe ecologice, dar echilibrul ecosistemic se restabilește greu, necesitând decenii de regenerare naturală.

Pe termen lung, efectele cumulative ale acestor procese se traduc prin fragmentarea habitatelor, perturbarea circuitelor biogeochimice (în special ale carbonului și azotului) și creșterea vulnerabilității ecologice a peisajelor. Astfel, alunecările de teren se înscriu printre principalele procese de degradare a mediului terestru, cu implicații directe asupra rezilienței ecosistemelor și stabilității geosistemelor locale.

În final, efectele proceselor gravitaționale trebuie privite ca parte a unui lanț de modificări, în care relieful, vegetația, infrastructura și comunitățile sunt interconectate. Un proces aparent limitat poate avea urmări care depășesc cu mult zona de origine, demonstrând fragilitatea echilibrului dintre om și mediu. Înțelegerea acestor consecințe este esențială pentru a putea preveni, gestiona și reduce riscurile în regiunile predispuse la astfel de fenomene.

Studiu de caz: Alunecările de teren din Rio de Janeiro, Brazilia

Rio de Janeiro este unul dintre cele mai spectaculoase orașe ale lumii, dar frumusețea reliefului său ascunde o vulnerabilitate majoră. Vârfurile de granit care se ridică abrupt din apropierea oceanului oferă orașului un decor unic, însă aceste forme de relief, atât de atrăgătoare pentru privitor, creează și condiții ideale pentru declanșarea alunecărilor de teren. Cu peste șase milioane de locuitori și o extindere urbană care se întinde peste dealuri, văi înguste și versanți abrupți, Rio se confruntă probabil cu unele dintre cele mai serioase provocări legate de stabilitatea terenurilor dintre toate marile orașe ale lumii.

Vulnerabilitatea zonei își are originile în mai mulți factori, combinați într-un mod aproape inevitabil. Versanții abrupți sunt alcătuiți din roci dure, dar fisurate, acoperite de un strat subțire de sol care poate fi ușor dislocat în timpul ploilor torențiale. Regiunea este, de altfel, cunoscută pentru episoadele de precipitații intense, care pot aduce

cantități impresionante de apă într-un interval scurt. La acestea se adaugă intervențiile umane de-a lungul timpului: terasări, excavații, extinderea zonelor de locuire pe pante abrupte și eliminarea treptată a vegetației care stabiliza în mod natural versanții.

***Problemele nu sunt noi**. Chiar din primele etape ale dezvoltării orașului, defrișările masive au destabilizat versanții, pregătind terenul pentru alunecările care aveau să urmeze. În ultimele decenii, presiunea creșterii urbane a împins locuințele către zone din ce în ce mai înalte și mai instabile. Pentru a crea spațiu, pante întregi au fost tăiate sau umplute cu materiale improprii, iar acolo unde vegetația a fost înlăturată, solul a rămas expus. În acest peisaj deja fragil, ploile violente nu fac decât să declanșeze un proces pentru care toate condițiile sunt deja îndeplinite.*

*Istoria recentă a Rio de Janeiro este marcată de episoade dramatice. În **februarie 1988**, o furtună violentă a adus peste 120 mm de precipitații în numai patru ore. Pantele au cedat pe rând, declanșând inundații, alunecări și curgeri de aluviuni. Rezultatul a fost tragic: cel puțin 90 de persoane și-au pierdut viața, iar aproximativ 3000 de locuitori au rămas fără adăpost. Cele mai multe victime au fost înregistrate în mahalalele amplasate pe versanți, unde locuințele improvizate nu ofereau nicio protecție în fața apelor care se acumulau rapid. Totuși, nici zonele mai înstărite nu au fost scutite. Într-o regiune de pe un versant abrupt, o alunecare a distrus complet un cămin de bătrâni, provocând moartea a 25 de persoane. Costurile pentru refacerea infrastructurii orașului s-au ridicat la peste 100 de milioane de dolari.*

*Un alt episod dramatic a avut loc în **aprilie 2010**, când ploile abundente au generat zeci de alunecări de teren. De data aceasta, numărul victimelor a fost și mai mare: peste 200 de persoane și-au pierdut viața, iar zeci de locuințe au fost distruse. Din nou, cartierele sărace amplasate pe versanți abrupți au fost cele mai afectate, ilustrând încă o dată cât de strâns este legată vulnerabilitatea geomorfologică de vulnerabilitatea socială.*

În fața unor astfel de evenimente, devine evident că Rio de Janeiro se confruntă cu o problemă complexă, în care elementele naturale și cele antropice se împletesc într-un mod periculos. Pentru a reduce riscul, orașul are nevoie de o abordare integrată: cartografierea zonelor predispuse la alunecări, stabilizarea versanților prin metode inginerești adecvate, crearea unor sisteme eficiente de drenaj, dar și intervenții rapide pentru evacuarea populației în caz de pericol. Totuși, oricât de elaborate ar fi aceste măsuri, cea mai eficientă rămâne evitarea extinderii orașului în zone extrem de fragile, unde alunecările sunt nu o posibilitate, ci o certitudine.

*Rio de Janeiro este un exemplu elocvent al modului în care **dezvoltarea urbană necontrolată**, combinată cu un relief dificil și cu fenomene meteorologice extreme, poate transforma procesele naturale în adevărate dezastre. Lecția pe care ne-o oferă acest oraș este clară: respectul față de limitele impuse de relief este esențial în construcția unei comunități sigure, durabile și reziliente.*

Prevenirea şi reducerea riscurilor de alunecare

Prevenirea alunecărilor de teren de mari dimensiuni este, de cele mai multe ori, o provocare, mai ales acolo unde procesele naturale sunt puternic influenţate de topografie, climă sau structură geologică. Chiar dacă nu putem controla în totalitate aceste fenomene, o serie de măsuri bine gândite pot reduce considerabil riscul. Primul pas este evitarea activităţilor care destabilizează versanţii, în special supraîncărcarea zonelor superioare ale pantelor, tăierea necontrolată a pantelor sensibile, depozitarea de material instabil pe versanţi sau intervenţiile care modifică regimul hidric al solului. Toate acestea pot transforma un versant aparent stabil într-unul predispus la mişcări bruşte de teren.

În multe situaţii, *soluţiile inginereşti* joacă un rol decisiv în consolidarea pantelor. Instalarea sistemelor de drenaj, atât la suprafaţă cât şi în profunzime, reprezintă una dintre cele mai eficiente modalităţi de prevenire a alunecărilor, deoarece apa este adesea factorul declanşator principal. Prin devierea apelor pluviale, rigolele şi canalele bine amplasate împiedică scurgerea necontrolată de pe versant, în timp ce acoperirea unor suprafeţe sensibile cu straturi impermeabile - de la sol-ciment până la folii speciale - reduce infiltrarea apei în sol. Pentru apa subterană, sistemele de drenaj subteran, formate din ţevi perforate înconjurate de pietriş, devin adevărate bariere care preiau şi redirecţionează apa din zonele vulnerabile, reducând presiunea internă care ar putea destabiliza panta.

Uneori însă, stabilizarea unui versant necesită o intervenţie fizică asupra formei reliefului. Lucrările de modelare a pantelor, atunci când sunt realizate cu atenţie şi în baza unor studii de stabilitate, pot avea un efect benefic. În operaţiunile de tip „cut and fill”, materialul este mutat din partea superioară a pantei către baza ei, ceea ce duce la reducerea înclinaţiei generale şi la transferul masei instabile către o zonă unde poate contribui la creşterea stabilităţii. În cazul pantelor foarte înalte sau abrupte, această metodă devine mai dificil de aplicat, dar versanţii pot fi adaptaţi prin terasare în trepte. Fiecare treaptă acţionează ca un prag de stabilizare, capabil să oprească sau să încetinească micile deplasări de material, iar canalele de drenaj amenajate pe aceste suprafeţe menţin controlul asupra scurgerilor.

Pe lângă intervenţiile inginereşti, prevenirea riscurilor gravitaţionale depinde şi de modul în care *planificăm şi administrăm teritoriul*. Elaborarea hărţilor de hazard geomorfologic şi integrarea lor în strategiile de dezvoltare locală permit identificarea zonelor vulnerabile înainte ca acestea să fie ocupate

sau transformate. Acolo unde riscul este ridicat, restricționarea anumitor activități — fie ele agricole, forestiere sau de construcții — devine o măsură necesară pentru protejarea comunităților.

Educația și conștientizarea populației joacă și ele un rol esențial. Mulți locuitori ai zonelor predispuse nu recunosc semnele premergătoare ale unei alunecări: fisuri apărute brusc în sol, pomi care se înclină inexplicabil, apariția unor izvoare noi sau deformarea terenului. Informarea oamenilor despre aceste indicii, precum și despre modul în care pot contribui la stabilitatea versanților prin practici agricole durabile, reprezintă un pas important în reducerea riscului. O cultură a prevenției, formată la nivel local, poate salva vieți și bunuri înainte ca autoritățile să reușească să intervină.

La nivel instituțional, succesul depinde de cooperarea dintre autoritățile locale, specialiștii în geologie și inginerie, serviciile de protecție civilă și societatea civilă. Programele naționale de monitorizare a terenurilor instabile și actualizarea legislației privind amenajarea versanților sunt elemente de bază pentru o gestionare eficientă a riscului. Investițiile în cercetare, tehnologii moderne și cartări detaliate ale zonelor expuse sunt la fel de importante, deoarece permit anticiparea problemelor înainte ca acestea să se manifeste.

Prevenirea alunecărilor de teren este un proces complex, care combină intervenții tehnice, reguli de urbanism, educație și coordonare instituțională. Nicio măsură nu funcționează izolat; ele acționează împreună, ca părți ale unui sistem de protecție menit să transforme versanții vulnerabili în zone sigure și gestionabile. În final, prevenția rămâne cea mai eficientă și mai puțin costisitoare metodă — iar evitarea dezvoltării în zonele cu risc ridicat este probabil cea mai importantă lecție pe care o putem învăța din experiența regiunilor afectate.

Una dintre cele mai răspândite modalități de *stabilizare a pantelor* este construirea zidurilor de sprijin, structuri concepute pentru a susține versantul și a împiedica deplasarea maselor de sol sau rocă. Aceste ziduri pot lua forme variate, de la construcții masive din beton sau cărămidă, până la gabioane* sau sisteme de piloți lungi din beton, oțel ori lemn, înfipți adânc în sol. Indiferent de material, eficiența lor depinde de modul în care sunt fixate și integrate în versant. Pentru a funcționa corect, zidurile trebuie ancorate solid sub baza pantei, astfel încât să ofere rezistență suplimentară maselor instabile din amonte. În spatele lor se amplasează un strat permeabil de pietriș sau rocă

* Coș de nuiele sau din plasă de sârmă umplut cu pământ, cu pietriș etc., care servește la apărarea malurilor de valuri, la construirea barajelor etc. (DEX 2009)

spartă, menit să permită drenarea apei. Orificiile de drenaj sunt esenţiale: ele reduc presiunea hidrostatică, unul dintre principalii factori care favorizează alunecările. Odată finalizate şi completate cu vegetaţie controlată, aceste structuri pot deveni nu doar funcţionale, ci şi estetic plăcute, integrându-se armonios în peisaj. (figura 6.3. a-c).

a) b)



c)

Figura 6.3. (a) Alunecarea superficială a avut loc la începutul anilor 1990. (b) Un zid de sprijin din piatră cimentată a fost construit în 1999 pentru a remedia problema. (c) Terasamentele din spatele zidurilor de sprijin au fost amenajate peisagistic, aşa cum arată această fotografie din 2001. sursa: (Keller & DeVecchio, 2016)

Prevenirea alunecărilor de teren poate fi costisitoare, însă beneficiile depăşesc cu mult investiţiile. Estimările arată că raportul beneficiu/cost pentru măsurile de prevenire variază între 10 şi 2000, ceea ce înseamnă că fiecare dolar investit poate aduce economii între 10 şi 2000 de dolari prin evitarea pierderilor materiale şi umane.

Chiar dacă măsurile de prevenire pot părea costisitoare, beneficiile lor sunt net superioare investiţiilor iniţiale. Estimările arată un raport beneficiu–cost cuprins între 10 şi 2000: fiecare dolar cheltuit pentru consolidarea versanţilor poate preveni pierderi materiale şi umane de zeci sau chiar mii de ori mai mari. În acest context, evaluarea periodică a pantelor instabile devine o necesitate, mai ales în zonele unde impactul potenţial este ridicat şi unde intervenţiile preventive pot salva vieţi şi resurse economice semnificative.

Pe lângă măsurile inginereşti, sistemele de avertizare timpurie joacă un rol important în gestionarea riscului. Ele nu pot opri declanşarea unei alunecări de teren, dar pot oferi timp preţios pentru evacuarea populaţiei, protejarea bunurilor şi oprirea circulaţiei în zonele periculoase. Pentru a fi eficiente, aceste sisteme trebuie integrate într-o reţea mai amplă de monitorizare, care să includă atât observaţii directe, cât şi tehnologii moderne. Versanţii vulnerabili pot fi inspectaţi periodic pentru identificarea semnelor de instabilitate – fisuri noi, deformări ale solului, afectarea infrastructurii sau apariţia căderilor de pietre. Observaţia directă are avantajul unei intervenţii imediate, însă poate fi dificil de aplicat în condiţii meteorologice severe sau în teren inaccesibil.

În Republica Moldova, astfel de sisteme ar putea deveni extrem de utile în zone precum versanţii Prutului, regiunile colinare din Codrii Centrali sau raioanele în care alunecările sunt frecvente. Implementarea unor reţele de senzori care să urmărească nivelul de umiditate, presiunile interne sau mişcările milimetrice ale terenului, combinate cu imagini obţinute prin drone sau sateliţi, ar permite detectarea timpurie a proceselor gravitaţionale. Informaţiile colectate ar putea fi integrate într-un sistem de alertă rapidă, permiţând autorităţilor să reacţioneze prompt, să reducă impactul social şi economic al acestor fenomene şi să crească siguranţa infrastructurii din zonele expuse.

Procesele gravitaţionale reprezintă una dintre cele mai directe şi mai vizibile forme prin care natura ne aminteşte că relieful este un sistem viu, aflat într-o permanentă transformare. Fie că vorbim despre alunecări de teren, prăbuşiri de blocuri, curgeri de pământ sau avalanşe, toate acestea sunt expresii ale aceleiaşi realităţi fundamentale: *sub influenţa gravitaţiei, materialele de pe versanţi tind să se deplaseze atunci când echilibrul lor intern este perturbat*.

Consecinţele acestor fenomene sunt adesea profunde. Relieful se modifică, ecosistemele sunt perturbate, iar infrastructurile - fie ele drumuri, locuinţe sau reţele tehnice - pot fi afectate sau distruse. De multe ori, cel mai vulnerabil element rămâne însă comunitatea umană. Pierderile de vieţi, locuinţele afectate, relocările forţate şi costurile economice pe termen lung arată cât de puternic poate deveni un proces natural atunci când întâlneşte o zonă slab pregătită pentru a-i face faţă.

În acelaşi timp, studiul acestor procese ne oferă şi un mesaj optimist: *riscurile pot fi reduse*, iar impactul lor poate fi controlat. Măsurile inginereşti, de la drenaje până la ziduri de sprijin şi terasări, pot stabiliza versanţii. Planificarea teritorială responsabilă - care ţine cont de hărţile de hazard şi de

vulnerabilitatea locală - poate preveni amplasarea locuinţelor şi infrastructurilor în zone periculoase. Educaţia, monitorizarea continuă şi sistemele de avertizare timpurie completează acest tablou, oferind comunităţilor instrumente eficiente pentru prevenirea dezastrelor.

Poate cea mai importantă lecţie este aceea că procesele gravitaţionale nu trebuie privite doar ca fenomene izolate, ci ca parte a unei dinamici complexe în care interacţiunea dintre natură şi activitatea umană joacă un rol definitoriu. Stabilitatea versanţilor depinde atât de structura geologică şi de regimul climatic, cât şi de modul în care oamenii gestionează terenurile. Acolo unde intervenţiile sunt realizate cu responsabilitate, versanţii pot rămâne stabili; acolo unde sunt ignorate recomandările ştiinţifice, riscurile cresc inevitabil.

Autoevaluare

1. Explică ce sunt procesele gravitaţionale şi care este rolul lor în modelarea reliefului şi dinamica versanţilor..
2. Care sunt principalele criterii de clasificare a proceselor gravitaţionale şi cum se diferenţiază acestea în funcţie de mecanismul de mişcare?
3. Analizează impactul alunecărilor de teren asupra mediului şi societăţii, evidenţiind diferenţa dintre efectele directe şi cele indirecte.
4. Identifică şi descrie principalele măsuri structurale şi non-structurale care pot fi aplicate pentru prevenirea şi reducerea riscului de alunecare a terenurilor.
5. Argumentează importanţa sistemelor de avertizare şi monitorizare a alunecărilor de teren în contextul Republicii Moldova.
6. Analizează, pe scurt, cazul Rio de Janeiro ca exemplu de oraş expus riscurilor geomorfologice. Ce lecţii pot fi aplicate în contextul local (Moldova)

Bibliografie recomandată

- Bobrowsky, P., 2013. *Encyclopedia of natural hazards.* New York: Springer.
- Dumitriu, D., 2021. Riscuri asociate deplasarilor în masa. În: *Riscuri Geomorfologice.* Iaşi: Universitatea „Al.I.Cuza", pp. 119-154.
- Hyndman, D. & Hyndman, D., 2017. *Natural Hazards and Disasters, Fifth Edition*. Boston, USA: Cengage Learning.
- Shi, P. & Kasperson, R., 2015. *World atlas of natural disaster risk.* New York: Springer.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021. *PreventionWeb.* [Interactiv] Available at: https://www.preventionweb.net/



Tornado și consecințele lui

Sursa: adaptată de autor

RISCURI METEO-CLIMATICE

Rezultatele învățării:

La finalul acestei unități de învățare, studenții vor fi capabili să:

- definească și caracterizeze principalele riscuri meteo-climatice.
- explice mecanismele atmosferice care stau la baza acestor fenomene.
- evalueze impactul riscurilor meteo-climatice asupra mediului, agriculturii, infrastructurii și sănătății populației.
- identifice zonele vulnerabile la nivel local și regional și să argumenteze particularitățile lor climatice.
- propună măsuri de adaptare și reducere a riscurilor bazate pe managementul apei, protecția solului, împăduriri și infrastructuri verzi.
- distingă între adaptare și atenuare și explice rolul fiecăreia în contextul schimbărilor climatice

Termeni cheie: riscuri meteo-climatice; vulnerabilitate climatică; secetă; caniculă, precipitații excedentare

Procesele atmosferice și schimburile de energie sunt determinate de echilibrul energetic al Pământului și sunt legate de climă și vreme. Vremea se referă la condițiile și activitatea din atmosferă într-un anumit loc și timp - temperatură, presiunea aerului, umiditatea, precipitațiile și mișcarea aerului. Învățarea despre procesele meteorologice oferă o bază pentru a înțelege riscurile cu care ne confruntăm în diferite părți ale lumii pentru pericolele meteorologice directe (furtuni, tornade și uragane), împreună cu pericolele care rezultă din vreme. Uraganele, furtunile, tornadele, viscolele, furtunile de gheață, furtunile de praf și valurile de căldură, precum și inundațiile cauzate de precipitațiile intense, sunt toate procese naturale care reprezintă un pericol pentru oameni. Aceste fenomene severe provoacă în fiecare an distrugeri semnificative și pierderi de vieți.

Coliziunea aerului rece arctic care împinge aerul cald și umed din Golful Mexic de-a lungul unui front rece cu tendință nord-est a fost o rețetă perfectă pentru ...

Riscurile meteo-climatice reprezintă ansamblul proceselor atmosferice care, prin intensitatea, frecvența sau durata lor, depășesc limitele normale ale variabilității climatice și produc efecte semnificative asupra societății, economiei și ecosistemelor. Aceste riscuri se manifestă atât pe termen scurt, sub forma fenomenelor meteorologice extreme (furtuni, vijelii, grindină, viscole, caniculă bruscă), cât și pe termen mediu sau lung, ca expresie a anomaliilor climatice persistente (secete, valuri de căldură, deficit pluviometric prelungit, perioade excesiv de umede).

Pe măsură ce schimbările climatice accelerează și variabilitatea atmosferică devine tot mai pronunțată, amplificarea și extinderea acestor riscuri constituie una dintre cele mai presante provocări pentru planificarea teritorială, agricultură, sănătate publică și securitate energetică. În acest context, înțelegerea mecanismelor generatoare, a distribuției lor geografice și a vulnerabilității comunităților expuse devine esențială pentru reducerea efectelor negative și pentru creșterea rezilienței la nivel local și regional.

Riscurile meteo-climatice pot fi privite, în linii mari, prin prisma duratei și a ritmului lor de manifestare. Unele fenomene au un caracter brusc, se dezvoltă rapid și produc efecte într-un timp foarte scurt. Acestea sunt *riscurile meteorologice*, asociate cu episoade de atmosferă instabilă, cu modificări rapide ale presiunii, temperaturii sau umidității. Ele apar, de regulă, sub forma unor evenimente intense, care pot dura de la câteva minute până la câteva zile.

De cealaltă parte se află *riscurile climatice*, acele situații în care atmosfera se abate de la starea obișnuită nu printr-o izbucnire bruscă, ci printr-o evoluție lentă, dar persistentă. Aceste riscuri nu se simt doar într-o zi sau într-o săptămână, ci se întind pe perioade mai lungi și afectează profund sistemele naturale și umane. Spre deosebire de fenomenele meteorologice, care apar și dispar, riscurile climatice au o evoluție graduală, care poate modifica regimul de apă al solului, ritmul vegetației, starea culturilor agricole sau disponibilitatea resurselor de apă.

Cele două tipuri de risc nu pot fi separate complet. Riscurile climatice sunt, de fapt, rezultatul acumulării și mediei în timp a riscurilor meteorologice, reflectând tendințe și abateri pe termen lung ale elementelor de climă. De exemplu, secetele climatice sunt generate de deficite repetate de precipitații meteorologice pe parcursul mai multor luni sau ani.

Deoarece ambele tipuri de risc au aceeași geneză (în atmosfera terestră) și deseori moduri de manifestare similare, în practica geografică se utilizează un termen compus: riscuri meteo-climatice.

Principala deosebire dintre ele constă în:

- durata și ritmul manifestării – riscurile meteorologice sunt scurte și violente;
- persistența efectelor – riscurile climatice au efecte lente, dar cumulative în timp.

Astfel:

- riscurile meteorologice includ fenomene violente și rapide, cum ar fi: aversele, vijeliile, viscolele, tornadele, uraganele;
- riscurile climatice includ procese mai lente și persistente, precum: înghețul, bruma, poleiul, seceta, canicula sau inundațiile prelungite (Bogdan, 2007)

Riscurile meteo-climatice reprezintă una dintre cele mai dinamice și complexe categorii de procese naturale, datorită interacțiunii directe dintre atmosferă, suprafața terestră și activitățile umane. Aceste riscuri reflectă nu doar variabilitatea naturală a climei, ci și vulnerabilitatea crescândă a societății la fenomenele extreme.

În contextul actual al schimbărilor climatice, frecvența și intensitatea evenimentelor meteorologice periculoase - cum sunt ploi torențiale, viscole, valuri de căldură, secete sau furtuni violente - sunt în creștere, amplificând impactul asupra mediului și economiei.

Republica Moldova se află într-o zonă de interacțiune între mai multe mase de aer, ceea ce determină o mare variabilitate a vremii. Alternanța advecțiilor reci continentale cu influențele calde provenind dinspre sud sau sud-vest, precum și interferența ciclonilor mediteraneeni cu anticiclonii est-europeni, creează o dinamică atmosferică complexă. Această poziționare explică atât contrastul pronunțat dintre anotimpuri, cât și apariția frecventă a unor perioade cu vreme extremă.

În ultimele decenii, schimbările climatice au accentuat unele tendințe deja prezente în mod natural în climatul regional. Temperaturile medii anuale au crescut, intervalele de secetă s-au extins, iar frecvența episoadelor cu precipitații intense s-a modificat. În special în sudul și sud-estul țării, verile au devenit mai calde și mai secetoase, iar primăverile – mai imprevizibile. Toate acestea contribuie la creșterea vulnerabilității anumitor regiuni, în special a celor agricole.

Prin urmare, riscurile meteo-climatice trebuie analizate nu doar ca fenomene izolate, ci ca expresii ale unui climat aflat în transformare. Contextul regional oferă cheia înțelegerii modului în care aceste riscuri se formează și de ce anumite zone sunt mai expuse decât altele.

Tipologia riscurilor meteo-climatice

Riscurile meteo-climatice pot fi grupate în mai multe categorii, în funcție de modul lor de manifestare, însă ceea ce le diferențiază cel mai bine este ritmul cu care apar și felul în care se propagă în timp. Unele fenomene sunt bruște, scurte și concentrate, necesitând reacții imediate. Altele evoluează lent,

aproape insesizabil la început, dar prin durata lor ajung să producă consecinţe profunde.

Fenomenele cu desfăşurare rapidă sunt legate, de regulă, de instabilitatea atmosferică. Acestea pot modifica în câteva zeci de minute cursul obişnuit al zilei, aducând cu sine vânturi puternice, precipitaţii intense sau scăderi bruşte de temperatură. Ritmul lor alert este, de cele mai multe ori, provocator pentru autorităţi şi comunităţi, întrucât necesită intervenţii rapide şi mecanisme eficiente de avertizare. De cealaltă parte se află fenomenele care se instalează treptat şi se manifestă ca deviaţii de la starea obişnuită a climei. Acestea nu surprind în mod spectaculos prin debut, ci prin persistenţa lor, afectând resursele de apă, vegetaţia, solul şi activităţile economice pe perioade întinse.

În această abordare, tipologia riscurilor devine mai puţin o listă de fenomene şi mai mult un mod de a înţelege dinamica atmosferei. De multe ori, fenomenele rapide şi cele lente se influenţează reciproc. Un episod de secetă prelungită, de exemplu, poate intensifica efectele unui val de căldură, iar o perioadă de instabilitate atmosferică poate transforma câteva ploi obişnuite în precipitaţii torenţiale. Atmosfera funcţionează ca un sistem integrat, în care fiecare abatere poate amplifica sau atenua un alt proces.

Riscuri hidrice (legate de precipitaţii). Riscurile hidrice sunt asociate excedentului pluviometric, adică situaţiilor în care cantităţile de precipitaţii depăşesc capacitatea de infiltrare şi de scurgere naturală a terenului.

Acestea se manifestă sub formă de:

- ploi abundente de durată, generate de fronturi atmosferice sau cicloni extratropicali;
- ploi torenţiale de scurtă durată, specifice convecţiei estivale;
- episoade de ploi mixte (ploaie + zăpadă topită) în perioadele de tranziţie sezonieră.

Efecte şi riscuri asociate:

- inundaţii în albiile râurilor şi pe versanţi;
- viituri rapide (flash floods) în bazine mici;
- intensificarea eroziunii şi torenţialităţii;
- alunecări de teren cauzate de suprasaturarea solului.

În Republica Moldova, episoadele de precipitaţii extreme sunt frecvente în lunile mai-iulie, când convecţia termică este puternică. Evenimente notabile s-au produs în iunie 2008 şi iunie 2023, când ploi de peste 100 mm/24h au generat viituri locale şi pierderi economice importante.

Indicatorii utilizaţi pentru evaluarea acestor riscuri sunt RAI (Rainfall Anomaly Index), SPI pozitiv (Standardized Precipitation Index) şi indici derivaţi din teledetecţie precum NDWI sau NDMI, care permit estimarea gradului de umiditate a solului şi a vegetaţiei.

Riscuri asociate secetei şi deficitului pluviometric. Seceta constituie unul dintre cele mai frecvente şi costisitoare riscuri climatice pentru spaţiul sud-est european. Ea este definită ca o perioadă prelungită de deficit de precipitaţii, care provoacă scăderea umidităţii solului, reducerea debitului apelor şi afectarea ecosistemelor şi a activităţilor economice.

Se disting mai multe tipuri de secetă:

- secetă meteorologică, determinată de lipsa precipitaţiilor faţă de media multianuală;
- secetă pedologică, când umiditatea solului scade sub nivelul necesar culturilor agricole;
- secetă hidrologică, caracterizată prin reducerea semnificativă a nivelului apelor de suprafaţă şi subterane;
- secetă socio-economică, care se referă la efectele asupra populaţiei şi economiei.

Factorii determinanţi includ regimul pluviometric, evapotranspiraţia potenţială, textura solului, panta şi gradul de acoperire vegetală. În Republica Moldova, secetele severe (de exemplu, 2007, 2012, 2020) au afectat peste 70% din suprafaţa agricolă, fiind corelate cu perioadele de anomalii termice pozitive.

Pentru evaluarea şi monitorizarea secetei se folosesc indici cantitativi: SPI, SPEI, PNI, DI (De Martonne), dar şi indicatori satelitari precum NDMI (Normalized Difference Moisture Index) sau NDWI (Normalized Difference Water Index).

Efectele secetei includ scăderea randamentului culturilor, pierderea stratului fertil, reducerea resurselor de apă şi apariţia riscului de incendii de vegetaţie.

Riscuri termice sunt asociate extremelor de temperatură - atât pozitive (valuri de căldură), cât şi negative (valuri de frig).

Ele sunt rezultatul deviaţiilor mari de la media climatologică multianuală şi pot fi agravate de fenomene sinoptice persistente, cum ar fi blocajele anticiclonale.

Valurile de căldură se caracterizează prin temperaturi ridicate, de obicei >32 °C, menţinute pe o perioadă de cel puţin 3–5 zile consecutive. Efectele lor

includ stres termic, creşterea mortalităţii, reducerea productivităţii agricole şi intensificarea evaporării.

Valurile de frig apar atunci când masele de aer polar sau arctic persistă mai multe zile, provocând scăderea bruscă a temperaturilor sub limita de îngheţ, pierderi agricole şi disfuncţii în reţelele energetice.

În Republica Moldova, riscurile termice se manifestă frecvent în contextul creşterii amplitudinii variabilităţii climatice. Valurile de căldură din iulie 2012 şi 2022 au atins valori maxime absolute de peste +39 °C, în timp ce episoadele de ger sever (ianuarie 2006, februarie 2012) au coborât sub -25 °C.

Riscuri dinamice – furtuni, cicloane şi instabilitate atmosferică. Riscurile dinamice sunt generate de procesele atmosferice intense asociate circulaţiei aerului şi variaţiilor de presiune. Acestea includ: cicloane tropicale şi extratropicale, furtuni convective, vânturi puternice, grindină şi tornade locale.

Cicloanele tropicale (uragane, taifunuri) apar în regiunile oceanice calde, dar pot influenţa indirect clima Europei prin transport de umezeală şi modificarea circulaţiei atmosferice.

Cicloanele extratropicale sunt specifice zonelor temperate, având o mare importanţă pentru regiunea Europei de Est. Ele aduc ploi intense, vânturi de peste 70 km/h şi scăderi bruşte de temperatură. În bazinul Mării Negre, astfel de sisteme pot genera episoade de vreme severă (ex. ciclonul „Daniel”, septembrie 2023).

Furtunile convective şi norii Cumulonimbus pot produce grindină, descărcări electrice şi rafale violente de vânt (downbursts). Aceste fenomene sunt din ce în ce mai frecvente în perioada caldă a anului, pe fondul încălzirii globale şi al instabilităţii atmosferice crescute.

Efectele acestor riscuri includ distrugerea culturilor, afectarea infrastructurii şi pierderi economice semnificative. Prevenirea implică sisteme eficiente de monitorizare radar şi avertizare timpurie, precum şi educaţia populaţiei privind comportamentul în situaţii de furtună severă.

Riscuri complexe şi interdependenţe. În realitate, fenomenele meteo-climatice rareori acţionează separat. Interacţiunea dintre ele generează riscuri complexe, cu efecte cumulative:

- combinaţia secetă + val de căldură → stres hidric şi incendii de vegetaţie;
- ploi torenţiale + topirea zăpezii → inundaţii şi alunecări de teren;
- ger + vânt puternic → viscol şi izolare a comunităţilor.

Astfel de fenomene compuse sunt din ce în ce mai frecvente în contextul schimbărilor climatice, care amplifică atât intensitatea, cât şi frecvenţa extremelor meteorologice.

Riscurile meteo-climatice reflectă instabilitatea şi variabilitatea sistemului climatic actual, accentuate de schimbările antropice şi de încălzirea globală. În Republica Moldova, principalele riscuri sunt secetele frecvente, precipitaţiile torenţiale, valurile de căldură şi episoadele de frig extrem. Evaluarea şi gestionarea acestor riscuri necesită monitorizarea continuă a parametrilor climatici, utilizarea indicatorilor standardizaţi şi integrarea rezultatelor în planificarea teritorială şi strategiile de adaptare la schimbările climatice.

Riscuri termice

Riscurile termice reprezintă ansamblul fenomenelor meteorologice asociate extremelor de temperatură, care produc deviaţii semnificative faţă de valorile medii multianuale. Ele includ atât valurile de căldură, caracterizate prin temperaturi anormal de ridicate, cât şi valurile de frig, specifice perioadelor de iarnă. Aceste fenomene au un impact major asupra sănătăţii populaţiei, productivităţii agricole, infrastructurii şi ecosistemelor, fiind amplificate în ultimele decenii de schimbările climatice globale.

Caracterizarea generală a riscurilor termice. Temperatura aerului este unul dintre principalii indicatori ai stării atmosferei, iar variaţiile ei extreme determină reacţii complexe ale sistemului climatic şi biosferei. Riscurile termice apar atunci când valorile maxime sau minime ale temperaturii depăşesc pragurile critice de confort termic pentru om, plante sau animale.

În Republica Moldova, climatul temperat-continental favorizează o amplitudine termică ridicată, cu ierni reci şi veri foarte calde. Din acest motiv, teritoriul este expus atât la episoade de frig sever, cât şi la valuri de căldură. În ambele situaţii, riscurile cresc atunci când extremele termice se prelungesc pe o durată de mai multe zile sau sunt însoţite de alte fenomene (secetă, vânturi puternice, umiditate ridicată).

Valurile de căldură. Creşterea frecvenţei şi intensităţii valurilor de căldură reprezintă una dintre cele mai evidente manifestări ale schimbărilor climatice regionale. În ultimele decenii, Republica Moldova s-a confruntat cu episoade tot mai persistente de temperaturi extreme, generate de schimbările din dinamica atmosferei şi amplificate de particularităţile geografice şi pedogeomorfologice ale teritoriului. Valurile de căldură se produc din combinarea unor factori sinoptici – precum blocajele atmosferice sau advecţiile

de aer tropical – cu procese locale, între care radiaţia solară intensă, uscăciunea accentuată şi efectul de „insulă termică urbană”. Aceste episoade determină nu doar disconfort termic şi riscuri pentru sănătatea populaţiei, ci şi consecinţe grave asupra ecosistemelor, economiei şi infrastructurii.

Conform OMM, un val de căldură reprezintă o perioadă de minimum trei zile în care temperatura maximă depăşeşte semnificativ media multianuală, de regulă cu cel puţin +5°C. În Republica Moldova, pragul de disconfort termic este atins în jurul valorilor de 32–35°C, dar în ultimii 20 de ani au fost înregistrate constant maxime absolute de peste 38–40°C. Analizele climatice recente arată că maximele termice tind să se deplaseze spre nordul republicii, unde valorile extreme depăşesc uneori recordurile istorice.

Geneza şi mecanismele sinoptice ale valurilor de căldură. Studiile sinoptice realizate în ultimii ani indică faptul că valurile de căldură care afectează Republica Moldova sunt asociate cu prelungirea sau intensificarea anticiclonilor subtropicali (Azoric, Est-European, Africano-Mediteraneean). Persistenţa acestor formaţiuni barice determină transportul maselor de aer tropical continental sau maritim spre Europa de Sud-Est, iar în condiţii de cer senin şi vânt slab insolaţia locală amplifică şi mai mult încălzirea.

Situaţiile atmosferice caracteristice includ:

- dorsale de altitudine extinse din nord-vestul Africii (anii 2007, 2012), care transportă aer tropical extrem de cald spre regiunea Mării Negre;
- blocaje atmosferice de tip B-1 şi B-2, ce împiedică pătrunderea maselor de aer mai rece şi menţin vremea caniculară pe durate îndelungate;
- circulaţia maritim-tropicală MT-1, cu advecţie de aer cald şi umed dinspre Marea Mediterană, ce produce temperaturi ridicate şi disconfort termic accentuat.

Episodul din 2007 ilustrează perfect această situaţie: dorsala africană a generat temperaturi la 850 hPa de peste +25°C, concretizate la sol în peste +40°C, iar în 2012 acelaşi mecanism a produs recordul absolut de +42.4°C la staţia Făleşti. În 2015 şi 2022, transportul de aer tropical a fost combinat cu deficit sever de precipitaţii, ceea ce a amplificat atât efectele asupra agriculturii, cât şi durata perioadelor de caniculă.

Efecte asupra populaţiei şi economiei. Valurile de căldură sunt unele dintre cele mai periculoase fenomene meteorologice pentru sănătate: cresc morbiditatea cardiovasculară, riscul de insolaţie, deshidratare şi hipertermie, în special la persoanele vârstnice sau vulnerabile. Temperaturile ridicate atât

ziua, cât şi noaptea determină apariţia caniculei, definită prin maxime ≥33°C şi minime ≥20°C.

Pe lângă impactul asupra populaţiei, valurile de căldură produc:

- accelerarea evapotranspiraţiei şi intensificarea secetei pedologice;
- pierderi semnificative în agricultură – de exemplu, în 2012 producţia de cereale a scăzut cu peste 60%;
- risc major de incendii de vegetaţie;
- avarii la infrastructura rutieră şi feroviară (dilatarea materialelor);
- stres termic asupra animalelor şi diminuarea productivităţii zootehnice.

Totodată, în mediul urban, efectul de „insulă termică" accentuează temperaturile nocturne, ceea ce împiedică răcirea naturală şi prelungeşte perioadele de disconfort termic.

Valurile de frig - mecanisme şi consecinţe. În opoziţie cu valurile de căldură, valurile de frig reprezintă episoade în care temperaturile scad cu peste 5°C sub media sezonieră şi se menţin astfel câteva zile consecutiv. În Republica Moldova, acestea se produc cel mai frecvent iarna, atunci când anticiclonul est-european şi invaziile de aer arctic determină condiţii de ger persistent.

Cauzele principale includ:

- pătrunderea maselor de aer polar sau arctic din nord-est;
- radiaţie nocturnă puternică în condiţii de cer senin;
- blocaje barice ce împiedică advecţia aerului mai cald.

Valurile de frig au consecinţe severe: îngheţarea culturilor, distrugerea plantaţiilor viticole şi pomicole, avarii la reţelele de apă, întreruperi în transporturi şi riscuri grave pentru sănătate (hipotermie, degerături). Episoadele din ianuarie 2006 şi februarie 2012 reprezintă exemple de ger extrem, cu temperaturi de -27…-29°C şi perioade de frig persistent ce au prelungit efectele negative până în primăvară, prin îngheţuri târzii.

Riscuri combinate şi efecte cumulative. În contextul schimbărilor climatice, riscurile termice tind să se manifeste din ce în ce mai frecvent în asociere cu alte fenomene extreme. Combinaţia dintre temperaturi ridicate, lipsa precipitaţiilor şi vânturi uscate determină apariţia secetelor severe şi a incendiilor de vegetaţie. În zonele urbane, efectul de insulă termică amplifică impactul valurilor de căldură asupra sănătăţii publice.

De asemenea, alternanţa dintre episoadele de îngheţ şi dezgheţ accentuează degradarea infrastructurii şi instabilitatea versanţilor, iar iernile

mai blânde, urmate de răciri bruşte, cresc vulnerabilitatea ecosistemelor şi reduc rezistenţa speciilor agricole la stres termic.

Analizele climatologice pentru Republica Moldova arată o tendinţă clară de creştere a temperaturii medii anuale, cu aproximativ +1.2°C în perioada 1961–2020, cel mai accentuată în lunile de vară şi de iarnă.

În acelaşi timp, numărul zilelor foarte calde (≥35°C) a crescut de peste două ori, iar durata valurilor de căldură s-a extins. În schimb, numărul zilelor de îngheţ a scăzut semnificativ.

Această evoluţie confirmă scenariile climatice RCP 4.5 şi RCP 8.5, conform cărora regiunile sudice ale Republicii Moldova vor fi expuse, până la mijlocul secolului XXI, la creşterea frecvenţei valurilor de căldură, intensificarea secetei şi scăderea rezervei de apă disponibilă.

Riscurile termice, deşi naturale, sunt amplificate de factorii antropici şi de urbanizarea necontrolată. În acest context, gestionarea eficientă a riscurilor termice implică:

- monitorizarea continuă a temperaturilor extreme prin reţele meteorologice automate;
- dezvoltarea sistemelor de avertizare timpurie pentru populaţie;
- promovarea planurilor de adaptare locală (inclusiv măsuri pentru protecţia populaţiei vulnerabile şi a culturilor agricole);
- extinderea suprafeţelor verzi urbane şi utilizarea materialelor cu albedo ridicat pentru reducerea efectului de insulă termică;
- educaţia climatică şi campanii de conştientizare privind comportamentul în perioadele de caniculă sau frig extrem.

Prin înţelegerea mecanismelor de formare, a efectelor şi a tendinţelor climatice, riscurile termice pot fi integrate în strategiile de management integrat al riscurilor naturale şi în politicile de adaptare la schimbările climatice.

Riscuri atmosferice dinamice

Riscurile atmosferice dinamice sunt generate de procesele de mişcare şi de instabilitate ale maselor de aer din troposferă, care duc la formarea sistemelor ciclonice, a fronturilor atmosferice şi a furtunilor convective. Aceste fenomene determină variaţii rapide ale presiunii, temperaturii, direcţiei şi vitezei vântului, fiind responsabile pentru o parte importantă a situaţiilor de risc meteorologic la nivel global şi regional.

În Republica Moldova, riscurile dinamice se manifestă în special sub forma vânturilor puternice, furtunilor convective, vijeliilor, grindinii şi viscolelor, fiind

asociate atât cu circulaţia generală a atmosferei, cât şi cu procesele locale de instabilitate. Deşi intensitatea lor este, în general, moderată comparativ cu regiunile tropicale, efectele pot fi semnificative asupra agriculturii, infrastructurii şi ecosistemelor.

Cicloni tropicali şi extratropicali.

Ciclonul tropical este una dintre cele mai spectaculoase şi mai complexe manifestări ale atmosferei, recunoscut uşor după forma sa de spirală largă, desfăşurată uneori pe sute sau chiar mii de kilometri. În imaginile satelitare apare ca o vastă nebuloasă în rotaţie, alcătuită din benzi de nori care se curbează în jurul centrului şi converg către o zonă circulară compactă. Această zonă reprezintă *„ochiul" ciclonului*, o regiune surprinzător de calmă, în contrast puternic cu violenţa fenomenelor care o înconjoară.

În jurul ochiului se ridică un adevărat zid de nori cumulonimbus, nori masivi care pot ajunge până la tropopauză şi care dau ciclonului aspectul său caracteristic, dramatic. În interiorul lor au loc mişcări ascendente intense, care întreţin furtuni puternice, descărcări electrice şi ploi torenţiale. Deşi baza acestor nori este întunecată, semn al umezelii şi al densităţii ridicate, vârfurile lor sunt luminoase, reflectând altitudinile mari la care se formează.

Ochiul ciclonului, deşi liniştit, este totuşi expresia unei presiuni atmosferice extrem de scăzute. Aici se regăsesc unele dintre cele mai mici valori de presiune înregistrate vreodată pe glob, în jurul a 870 hPa în Pacificul de Nord-Vest. Dimensiunea ochiului variază considerabil şi poate oferi indicii despre intensitatea fenomenului: un ochi îngust sugerează un ciclon violent, în vreme ce extinderea sa semnalează adesea slăbirea treptată a sistemului.

În esenţă, ciclonul tropical este o perturbare atmosferică cu „miez cald", ceea ce înseamnă că energia internă provine din eliberarea masivă de căldură în timpul condensării vaporilor de apă. Acest proces pune în mişcare curenţi verticali extrem de puternici şi generează o imensă cantitate de energie, care se reflectă în intensitatea vânturilor şi a precipitaţiilor. În funcţie de stadiul său de dezvoltare, ciclonul poate prezenta viteze ale vântului de peste 60 km/h, iar pe măsură ce înaintează spre latitudini mai mari, aceste viteze pot creşte.

Impactul cicloanelor tropicale este puternic şi adesea devastator. Vânturile violente, ploile abundente şi furtunile generate pot provoca pagube severe atât pe uscat, cât şi pe mare. Tocmai de aceea, pentru evaluarea potenţialului distructiv, a fost elaborată *scara Saffir-Simpson*, care clasifică uraganele în cinci categorii, de la fenomene moderate până la evenimente extreme. Pe măsură ce se înaintează pe această scară, viteza vântului creşte

exponenţial, iar pagubele trec de la deteriorări superficiale până la distrugeri aproape totale ale construcţiilor, vegetaţiei şi infrastructurii.

Cicloanele de intensitate redusă afectează în special vegetaţia şi zonele de coastă, provocând doborâri de arbori, avarii la clădiri uşoare şi inundaţii locale. Pe măsură ce intensitatea creşte, valurile generate depăşesc considerabil nivelul normal al mării, inundând zonele joase cu câteva ore înainte de sosirea centrului furtunii. În stadiile superioare, fenomenul devine o forţă de o magnitudine impresionantă: vânturile pot atinge sau chiar depăşi 250 km/h, iar precipitaţiile pot doborî recorduri istorice, cum s-a întâmplat în Insula Réunion, unde în 24 de ore s-au acumulat cantităţi de apă apropiate de două metri.

În categoria maximă, ciclonul tropical capătă o putere aproape indescriptibilă. Rafalele care depăşesc 300 km/h transformă obiectele obişnuite în proiectile, iar presiunea exercitată de vânt poate atinge valori uriaşe, capabile să smulgă acoperişuri, să prăbuşească structuri şi să devasteze zone întinse. În aceste condiţii, nu doar vântul şi ploile pun în pericol viaţa oamenilor, ci şi valurile uriaşe, care înaintează adânc spre interiorul uscatului, producând inundaţii de proporţii.

Prin *amploarea, durata şi forţa lor*, cicloanele tropicale se numără printre cele mai impresionante şi mai periculoase fenomene atmosferice de pe planetă. Ele arată, mai mult decât orice alt fenomen, puterea extraordinară a atmosferei şi capacitatea ei de a genera, într-un interval scurt, transformări dramatice ale mediului (Păltineanu, et al., 2008).

Formarea unui ciclon tropical este posibilă doar atunci când atmosfera şi oceanul reuşesc să ofere simultan un set de condiţii foarte precise. Totul începe cu existenţa unui câmp depresionar în straturile joase ale atmosferei, o zonă cu presiune scăzută care creează cadrul iniţial pentru dezvoltarea unei circulaţii în spirală. În aceste regiuni, aerul cald şi umed de deasupra oceanului începe să urce, declanşând convecţia. Curenţii ascendenţi generează acumulări dense de nori şi furtuni, însă doar când pulsaţiile aerului tropical sunt suficient de puternice se poate forma un turbion incipient, „sămânţa” unui viitor ciclon.

Energia care alimentează fenomenul provine aproape exclusiv din suprafaţa oceanului. Temperaturile ridicate ale apei, de peste 26-27°C, permit evaporarea intensă şi încărcarea aerului cu o cantitate mare de căldură latentă. Această energie este motorul ciclonului şi trebuie să fie furnizată constant, motiv pentru care formarea şi maturizarea cicloanelor se produc în special la sfârşitul verii şi toamna, când oceanele ating valorile maxime de încălzire. Pentru ca sistemul să se dezvolte pe verticală, atmosfera trebuie să ofere un

mediu stabil, lipsit de forfecări puternice ale vântului sau intruziuni de aer rece, care ar slăbi structura ascendentă.

Un *rol decisiv* îl are și rotirea sistemului, care depinde de forța Coriolis. Aceasta este prea slabă în vecinătatea Ecuatorului pentru a permite ciclogeneza, motiv pentru care fenomenul nu se formează în zona ecuatorială propriu-zisă. Pe măsură ce ne îndepărtăm de această bandă, rotirea devine suficient de puternică pentru a intensifica turbionul și pentru a concentra convergența maselor de aer în jurul unui centru de presiune scăzută. De aceea, cicloanele tropicale își au originea aproape exclusiv în regiunile oceanice calde și decad rapid odată ce ating uscatul, pierzând sursa de energie care le susține.

La scara întregii planete, cicloanele tropicale nu se distribuie uniform, iar această inegalitate reflectă diferențele mari dintre regiunile oceanice și cele continentale. În fiecare an se formează aproximativ 80–-90 de furtuni tropicale, însă aproape două treimi iau naștere în Emisfera Nordică. Această predominanță se explică prin raportul mai mare dintre suprafețele de uscat și cele de apă, care generează contraste termice și barice favorabile ciclogenezei, dar și prin dinamica musonilor și a alizeelor care modelează circulația atmosferică tropicală.

Cea mai activă zonă de pe Glob este nord-vestul Oceanului Pacific, unde se formează anual aproape o treime dintre toate furtunile tropicale, multe dintre ele transformându-se în taifunuri de mare intensitate. Apele foarte calde și interacțiunea dintre Musonul Chinez și Alizeul Pacific creează aici un mediu ideal pentru formarea și menținerea sistemelor ciclonice. Traiectoriile lor tind adesea să se curbeze spre nord-est, afectând cu regularitate China, Filipinele și Japonia înainte de a se estompa la contactul cu continentul asiatic.

Nordul Oceanului Indian reprezintă o altă zonă importantă de activitate ciclonica, deși mai puțin intensă. Aici cicloanele sunt strâns legate de migrația sezonieră a Ecuatorului Termic, care favorizează ciclogeneza în lunile mai–iunie și octombrie–noiembrie. Golful Bengal rămâne cea mai activă subregiune, în timp ce coastele vestice ale Indiei și Golful Oman sunt afectate mai rar, întrucât dinamica musonilor și prezența uscatului limitează dezvoltarea sistemelor.

În Atlanticul de Nord și în Marea Caraibilor cicloanele se formează mai ales în sezonul cald, fiind influențate de alizeele maritime și de structura Ecuatorului Termic Vertical. Depresiile tropicale provenite din Africa de Vest sunt principala sursă pentru aceste sisteme, iar puținele care reușesc să traverseze oceanul pot evolua în uragane puternice. Ele tind apoi să se recurbe spre nord-est, atingând adesea coastele Statelor Unite, ale Golfului Mexic sau ale Americii

Centrale, înainte de a-şi pierde intensitatea odată cu trecerea pe uscat (Păltineanu, et al., 2008).

Furtuna este o cupolă de apă care se deplasează pe uscat în apropierea peretelui ocular al uraganului. Pe măsură ce o furtună face căderi de teren, mareele pot inunda cele mai populate zone de-a lungul ţărmului. Furtuna provoacă inundaţii cu apă sărată, care pot contamina rezervele de apă potabilă de suprafaţă şi subterană. Mai mult, inundaţiile provocate de furtuni spală drumurile şi lasă străzile pline de nisip şi moloz. În fiecare an, o medie de zece furtuni tropicale, dintre care şase devin uragane, se dezvoltă peste Oceanul Atlantic, Marea Caraibelor sau Golful Mexic. În timp ce multe dintre acestea rămân peste ocean, aproximativ cinci uragane lovesc coasta SUA la fiecare 3 ani (Schmidt, 2001). Pierderile de vieţi omeneşti şi de bunuri asociate cu uraganele şi furtunile sunt foarte mari. Uraganul Texas din 1900 (categoria 4) a ucis cel puţin 8.000 de indivizi din Oraşul Galveston; uraganul Okeechobee din 1928 (categoria 4) a ucis cel puţin 2.500 de persoane; ciclonul din Bangladesh din 1970 a ucis cel puţin 300.000 de persoane (Hyndman & Hyndman, 2017). Câteva exemple de uragane recente cele mai mortale sunt: uraganul Andrew, uraganul Katrina, uraganul Rita şi uraganul Ike. Sezonul uraganelor atlantice din 1992 a lovit Bahamas, sudul Floridei şi sud-vestul Louisianei. Uraganul a ucis 40 de persoane şi a provocat pagube de 26.5 miliarde de dolari. Uraganul Katrina (categoria 3) a lovit coasta de sud a SUA (florida de sud, părţi din Miami şi Golful Mexic), în sezonul atlantic din 2005. Uraganul a ucis cel puţin 1.500 de persoane şi a avariat 81 de miliarde de dolari. Uraganul Rita (categoria 3) a căzut pe uscat în Golful de Coastă al SUA în sezonul uraganelor atlantice din 2005, a ucis 120 de persoane (impact direct şi indirect) şi a provocat daune de 11.3 miliarde de dolari. Uraganul Ike a provocat distrugeri extinse în Haiti, Republica Dominicană, Insulele Turks şi Caicos, sud-estul Bahamas, Cuba şi părţi din sud-estul Texasului, vestul Louisianei şi Arkansas (SUA) în 2008. Evenimentul a ucis 195 de persoane, iar pagubele au fost de 29.5 miliarde de dolari (Keller & DeVecchio, 2016). Precipitaţiile abundente ar putea fi, de asemenea, foarte periculoase pentru viaţă şi proprietate. Ploile torenţiale asociate cu sistemele meteorologice tropicale în mişcare lentă sau staţionare pot produce suficientă apă pentru a îneca animalele şi a distruge agricultura. Inundaţiile de apă dulce pot provoca la fel de multe decese înec ca inundaţii furtuna val. Pe lângă inundaţii, ploile intense pot avea un efect dezastruos asupra agriculturii prin înecarea culturilor şi creşterea probabilităţii de

îmbolnăviri şi infestări cu dăunători în culturile supravieţuitoare (Bobrowsky, 2013, p. 484).

Tornade. Interacţiunea dintre masele de aer cu proprietăţi contrastante – aer cald şi umed provenit din regiunile tropicale şi aer rece şi uscat din zonele temperate sau polare – generează o gamă variată de fenomene meteorologice extreme. Printre acestea se numără furtunile convective, ploi intense, vânturi puternice, furtuni de grindină, fulgere şi, în condiţii favorabile, tornade sau viituri rapide.

Tornada reprezintă una dintre cele mai violente manifestări ale atmosferei, fiind definită ca o coloană de aer care se roteşte rapid în jurul unei axe verticale, cu un diametru variabil şi o formă caracteristică de pâlnie. În emisfera nordică, rotaţia se produce de obicei în sens invers acelor de ceasornic, datorită forţei Coriolis. Interiorul tornadei este caracterizat printr-o presiune extrem de scăzută şi viteze foarte mari ale vântului în pereţii vortexului, ceea ce determină o capacitate distructivă remarcabilă.

Coliziunea aerului rece arctic cu masele de aer cald şi umed venite din Golful Mexic, a creat condiţiile perfecte pentru formarea unor supercelule violente. La ora 14:40, sirenele de tornadă au început să urle în Moore, Oklahoma, iar următoarele 39 de minute aveau să devină unele dintre cele mai dramatice din istoria recentă a oraşului.
În acea după-amiază, Sandra Adams şi mama ei de 88 de ani s-au adăpostit într-o cadă, în timp ce vântul lovea locuinţa cu o furie greu de imaginat. Lumina s-a stins, resturi au început să cadă peste ele, iar lumea s-a redus la un zgomot asurzitor şi la întuneric. Când totul s-a liniştit, au observat o rază de lumină: casa dispăruse complet. Captive sub ruine, au aşteptat până când un băiat de 13 ani le-a descoperit şi a strigat după ajutor, reuşind împreună cu vecinii să le scoată dintre dărâmături. În acelaşi timp, un alt locuitor s-a ascuns cu doi copii într-o cadă acoperită cu o saltea, în timp ce tornada îi spulbera locuinţa; o mamă şi fiica ei au fugit spre adăpostul subteran al unei vecine, avertizate la timp de mesajele de la TV. La Şcoala Elementară Plaza Towers, fără un adăpost antitornadă, profesori şi elevi s-au ghemuit pe coridoarele interioare, exact cum repetaseră la exerciţii: majoritatea au supravieţuit, deşi şapte copii şi-au pierdut viaţa.
Tornada, care a atins viteze ale vântului de 340 km/h, a lăsat în urmă o bandă de distrugere de 27 km lungime şi peste 2 km lăţime, măturând case, şcoli, un spital şi mii de locuinţe. Douăzeci şi cinci de persoane au murit, peste 12000 de case au fost avariate sau distruse, iar pagubele au depăşit două miliarde de dolari. Povestea supravieţuitorilor din Moore rămâne astăzi un exemplu puternic despre importanţa pregătirii, solidarităţii şi reacţiei rapide în faţa fenomenelor extreme.

Tornadele pot apărea izolat, în cadrul furtunilor supercelulare, sau pot fi generate în benzile de ploaie ale cicloanelor tropicale şi extratropicale, în special la contactul dintre aerul cald şi cel rece. Viteza de deplasare a tornadelor variază de la staţionar până la peste 110 km/h, având o valoare medie de

aproximativ 50 km/h, însă viteza vântului în interiorul vortexului poate depăşi 400 km/h în cazurile extreme.

Efectele tornadelor sunt multiple şi se manifestă prin:

- distrugerea structurilor slabe sub acţiunea vânturilor intense;
- ridicarea şi transportul obiectelor de dimensiuni variabile pe distanţe mari;
- mobilizarea deşeurilor şi resturilor care, antrenate în mişcarea rotativă, acţionează ca proiectile capabile să deterioreze structuri solide;
- pierderi de vieţi omeneşti şi avarii extinse asupra infrastructurii, terenurilor agricole şi mediului construit.

De-a lungul timpului, numeroase tornade devastatoare au fost raportate în Statele Unite ale Americii, în special în regiunea cunoscută sub numele de „Tornado Alley", care cuprinde statele Texas, Oklahoma, Kansas şi Missouri, dar şi în Australia, unde sunt denumite local Willi Willi sau Dust Devil. Printre cele mai violente evenimente istorice se numără:

- tornada din 18 martie 1925, care a traversat statele Montana, Illinois, Indiana şi Kentucky, provocând 734 de victime şi pagube de peste 16 milioane USD (Brooks & Doswell, 2000);
- tornadele din 5-6 aprilie 1936, care au afectat Mississippi şi Georgia, cu aproximativ 419 decese şi pierderi materiale de 16 milioane USD;
- tornada din 11 mai 1953 la Waco (Texas), soldată cu 114 morţi şi 41 milioane USD daune;
- evenimentele din 8 iunie 1953, când tornadele din Flint şi Beecher (Michigan) au produs 116 victime şi distrugeri majore;
- seria de tornade din 11 aprilie 1965, care a lovit Michigan, Ohio şi Indiana, cu peste 128 de morţi şi pierderi de 105 milioane USD;
- super-tornada din 3 aprilie 1974, care a afectat Ohio, Alabama, Indiana şi Kentucky, producând 183 de victime şi pagube de 262 milioane USD.

Aceste date istorice evidenţiază caracterul local, dar extrem de distructiv al tornadelor, care se disting de alte fenomene atmosferice prin durata scurtă, intensitatea ridicată şi imprevizibilitatea lor. Studiul acestor fenomene are o importanţă majoră în domeniul meteorologiei aplicate şi al gestionării riscurilor climatice, deoarece permite îmbunătăţirea sistemelor de avertizare timpurie şi reducerea vulnerabilităţii comunităţilor expuse.

Deşi Republica Moldova nu este afectată direct de cicloanele tropicale, resturile acestora (post-tropicale) pot pătrunde în Europa Centrală şi de Est, aducând ploi intense şi instabilitate atmosferică. Cicloni extratropicali de

origine atlantică, mediteraneeană sau pontică determină frecvent episoade de vreme severă în regiune, mai ales în perioadele de tranziție sezonieră (primăvară-toamnă).

Furtuni convective și fenomene asociate. Furtunile convective sunt fenomene atmosferice locale sau regionale, generate de ascensiunea rapidă a aerului cald și umed, care condensează și formează nori Cumulonimbus. Aceste sisteme produc ploi torențiale, grindină, trăsnete, vânturi de rafală (downbursts) și, uneori, tornade.

Condiții favorizante

- instabilitate atmosferică accentuată (gradient termic vertical ridicat);
- prezența unei surse de umiditate la sol și a unei mase de aer rece la altitudine;
- forțare dinamică (front rece, ciclon local, efect orografic).

În perioada caldă a anului (mai–august), aceste condiții sunt frecvent îndeplinite în Republica Moldova, în special în regiunile de deal și podiș, unde relieful favorizează convecția termică.

Efecte și riscuri

- vânturi convective violente, ce pot depăși 25–30 m/s (90–110 km/h);
- grindină de dimensiuni variabile (5–50 mm), care provoacă distrugerea culturilor și a acoperișurilor;
- ploi torențiale de scurtă durată, cu peste 30–50 mm în 1 oră, ce generează inundații locale;
- descărcări electrice frecvente, cu pericol de incendii și avarii electrice.

Evenimente semnificative s-au înregistrat în mai 2013, iunie 2020 și iulie 2022, când grindina a afectat mii de hectare de culturi agricole în raioanele Căușeni, Hâncești, Nisporeni și Orhei.

Orajele: formare, repartiție și manifestări. Orajul este un fenomen atmosferic complex, asociat norilor de tip Cumulonimbus și caracterizat prin descărcări electrice repetate, vizibile sub formă de fulgere și însoțite de tunete. Apariția lui este legată de o atmosferă instabilă, bogată în vapori de apă, în care volume importante de aer cald și ușor se ridică rapid, se răcesc, iar umezeala condensează în nori de furtună. În funcție de contextul sinoptic, orajele pot apărea izolat sau organizat, pot fi însoțite sau nu de precipitații, dar de cele mai multe ori aduc cu ele averse intense, uneori grindină, rafale violente de vânt și contraste termice pronunțate.

Din punct de vedere al mecanismului de formare, se disting două tipuri principale de oraje. Orajele de mase de aer, numite și *oraje convective* sau de

evoluție diurnă, se dezvoltă mai ales în sezonul cald, când suprafața terestră se încălzește puternic în timpul zilei. Aerul de la sol devine mai cald decât aerul din straturile superioare, se ridică, condensează și generează celule orajoase care ating maturitatea spre sfârșitul după-amiezii. *Orajele frontale* sunt asociate trecerii unui front rece, care împinge aerul cald de la sol în sus, forțându-l să se ridice brusc. Aceste oraje sunt adesea mai organizate și pot forma „linii de vijelii" ce mătura suprafețe extinse, deplasându-se odată cu frontul atmosferic.

Dezvoltarea unui oraj poate fi urmărită prin evoluția unei celule orajoase. În stadiul de Cumulus, mișcările ascendente domină: aerul cald și umed se ridică, vaporii de apă condensează, iar căldura latentă eliberată alimentează ascensiunea. Norul crește în înălțime, uneori până la tropopauză, căpătând forma caracteristică de Cumulonimbus, cu vârf în nicovală. Pe măsură ce picăturile de apă și cristalele de gheață devin tot mai grele, ele nu mai pot fi susținute de curenții ascendenți și încep să cadă, generând curenți descendenți de aer rece și umed. Aceasta marchează maturitatea celulei: apar aversele, eventual grindina, iar la sol se simt adesea rafale puternice de vânt. În etapa finală, aerul rece descendent și precipitațiile slăbesc instabilitatea, curenții ascendenți se diminuează, norul se fragmentează, iar cerul se înseninează după câteva ore.

La scară continentală, Europa este relativ puțin afectată de oraje în comparație cu alte regiuni ale lumii, precum America de Nord. În multe zone europene se înregistrează sub 40 de zile cu oraj pe an, iar în regiunile nordice, precum Irlanda, Scoția sau nordul Scandinaviei, numărul scade chiar sub 10. În vestul și sudul continentului, frecvența crește: anumite regiuni din Germania, Austria, Elveția, Spania sau zonele montane din Franța și Italia pot depăși 30–35 de zile cu oraj pe an, în special în sezonul cald. De-a lungul coastelor Mării Mediterane, toamna este adesea o perioadă favorabilă, deoarece apa mării rămâne mai caldă decât uscatul; pătrunderea maselor de aer rece peste aceste ape calde intensifică contrastul termic și declanșează oraje costiere și maritime. În România, activitatea orajoasă este moderată: în zona montană se înregistrează aproximativ 35–40 de zile cu oraj pe an, iar în Delta Dunării și pe litoral, în jur de 20 de zile, cu un maxim de frecvență în lunile mai–iulie.

Din punct de vedere al ritmului diurn, cele mai multe oraje convective se produc spre sfârșitul după-amiezii, când încălzirea de la sol și instabilitatea aerului ating valorile maxime. Orajele frontale, asociate fronturilor reci, se pot produce în orice moment al zilei sau al nopții, dar violența lor este adesea mai mare la sfârșitul după-amiezii și noaptea. În timpul verii, orajele formate ziua

deasupra munţilor pot fi antrenate spre câmpii seara şi noaptea, menţinându-şi intensitatea chiar şi după miezul nopţii, susţinute de procese radiative în partea superioară a norului.

Fulgerul şi tunetul sunt manifestările cele mai spectaculoase ale orajului. Fulgerul reprezintă o descărcare electrică între regiuni cu sarcini de semn opus, fie în interiorul aceluiaşi nor, fie între nor şi sol. Distribuţia neuniformă a sarcinilor electrice în nor conduce la diferenţe mari de potenţial, iar când acestea depăşesc un anumit prag, aerul devine brusc conductor, formând un canal luminos. Cea mai mare parte a activităţii electrice are loc în interiorul norului, dar fulgerele de la nor la sol sunt cel mai uşor de observat şi, de aceea, cele mai cunoscute. Tunetul este sunetul produs de dilatarea explozivă a aerului încins de fulger, care poate atinge temperaturi de ordinul a zeci de mii de grade Celsius. Diferenţa dintre viteza luminii şi viteza sunetului explică decalajul dintre percepţia fulgerului şi a tunetului; numărând secundele dintre cele două şi împărţind la trei, se poate estima, aproximativ, distanţa în kilometri până la oraj.

Acest ansamblu de procese - dinamica aerului, formarea norilor, manifestările electrice şi acustice - face din oraj un fenomen spectaculos, dar şi potenţial periculos, care merită înţeles atât din perspectivă ştiinţifică, cât şi din punct de vedere al gestionării riscurilor meteo-climatice.

Grindina - formare, evoluţie şi impact. Grindina este una dintre cele mai spectaculoase şi mai distructive manifestări asociate orajelor. Imaginea unui peisaj verde de vară care, în câteva minute, se acoperă cu un strat alb de gheaţă ilustrează foarte bine brutalitatea acestui fenomen. Primele semne apar adesea în timpul unei averse puternice, când lumina capătă o tentă albăstruie sau lăptoasă. La scurt timp, ploaia este înlocuită de zgomotul specific al boabelor de gheaţă care lovesc acoperişurile, maşinile şi solul, transformând drumurile şi câmpurile într-un covor alunecos de gheaţă. Deşi episodul durează, de regulă, doar câteva minute, efectele pot fi considerabile: culturi agricole distruse, livezi şi vii rase pur şi simplu de pe faţa pământului, ferestre sparte, acoperişuri perforate, animale rănite sau omorâte.

Originea grindinei trebuie căutată în interiorul norilor Cumulonimbus, acolo unde curenţii ascendenţi sunt suficient de puternici pentru a ridica picături de apă în straturi ale atmosferei unde temperatura este sub 0°C. În aceste condiţii, apa nu îngheaţă imediat, ci rămâne suprarăcită, având nevoie de particule minuscule solide – „nuclee de congelare” – pentru a se transforma în gheaţă. În jurul acestor nuclee se formează iniţial granule fine, asemănătoare

zăpezii, apoi particule mai dense, cunoscute sub numele de măzăriche, şi, în final, boabele propriu-zise de grindină. Pe măsură ce sunt purtate în sus şi în jos de curenţii verticali din nor, aceste boabe trec prin mai multe cicluri de îngheţare şi topire parţială, depunând straturi succesive de gheaţă. De aceea, secţionate, ele pot semăna cu un „bulb de ceapă", cu alternanţe de gheaţă translucidă şi opacă.

Dimensiunea grindinei depinde în mod direct de forţa curenţilor ascendenţi. Atâta timp cât curentul de aer este suficient de puternic pentru a susţine boaba în aer, aceasta continuă să crească, acumulând noi straturi de gheaţă. Când greutatea devine prea mare sau boaba este deviată în curenţii descendenţi, ea cade spre sol. De aici rezultă diversitatea impresionantă a mărimilor, de la particule mici, abia mai mari decât picăturile de ploaie îngheţată, până la exemplare comparabile cu ouăle de găină, portocalele sau chiar mingi de tenis ori de golf. Literatura de specialitate menţionează, atât în Europa, cât şi în alte regiuni ale lumii, episoade cu boabe de grindină de câteva sute de grame, capabile să provoace pagube grave clădirilor şi să rănească oameni şi animale.

Deşi grindina este un fenomen relativ rar la scara tuturor orajelor - se estimează că doar o mică parte dintre acestea produc efectiv căderi de grindină -, anumite regiuni sunt mult mai expuse decât altele. În Europa, sud-vestul Franţei, unele zone montane din Alpi şi Carpaţi sau anumite regiuni din Europa Centrală sunt cunoscute prin frecvenţa şi intensitatea episoadelor cu grindină. În astfel de teritorii, o singură celulă orajoasă poate mătura o bandă de câţiva kilometri lăţime şi zeci de kilometri lungime, lăsând în urmă un peisaj marcat de frunze sfâşiate, ramuri rupte şi culturi devastate. Grosimea stratului de grindină atinsă în urma unor astfel de episoade poate ajunge, în cazuri extreme, la zeci de centimetri, menţinându-se pe sol ore sau chiar zile, în ciuda temperaturilor estivale.

În România, grindina este un fenomen prezent mai ales în sezonul cald, în intervalul mai–august, cu o durată obişnuită a averselor de la câteva minute până la un sfert de oră. Frecvenţa creşte odată cu altitudinea: zonele de câmpie înregistrează, în medie, una–două zile pe an cu grindină, în timp ce regiunile deluroase şi mai ales cele montane pot avea câteva zile suplimentare cu astfel de episoade. Cronicile meteorologice menţionează numeroase episoade severe, în care boabele de grindină au atins dimensiunea unui ou de găină, formând straturi de gheaţă de zeci de centimetri şi provocând atât pagube materiale importante, cât şi victime în rândul animalelor şi, uneori, al oamenilor.

Pe teritoriul Republicii Moldova, frecvenţa grindinei este controlată de un ansamblu de factori regionali şi locali, între care contrastul termic şi baric, gradul de instabilitate al maselor de aer, configuraţia reliefului şi particularităţile vegetaţiei joacă un rol decisiv. Grindina este mai frecventă în regiunile cu altitudine mai ridicată, unde încălzirea accentuată a suprafeţei terestre favorizează dezvoltarea curenţilor ascendenţi puternici. Se observă astfel diferenţe semnificative între câmpiile joase, unde fenomenul este relativ rar, şi zona centrală a republicii, caracterizată printr-un relief fragmentat şi o circulaţie atmosferică activă. De exemplu, în Câmpia Moldovei de Sud se înregistrează aproximativ 1.3-1.4 zile cu grindină pe an, în timp ce în Podişul Moldovei Centrale, în arealele Codrilor, frecvenţa creşte până la 2.1 zile pe an.

În contrast, zonele joase şi umede - cum sunt văile largi ale Prutului şi Nistrului sau regiunile din jurul lacurilor de acumulare - înregistrează valori minime, deoarece aici predomină curenţii descendenţi şi inversiunile termice care inhibă formarea curenţilor verticali necesari pentru dezvoltarea convecţiei. Astfel, localităţi precum Olăneşti, Comrat sau Cahul au o frecvenţă mult mai redusă a grindinei, variind între 0.1 şi 1.3 zile pe an. Frecvenţa maximă anuală poate totuşi depăşi de două până la patru ori valorile medii, dar aceste maxime nu apar simultan în toate regiunile, reflectând diferenţele marcate ale contrastelor locale. În câmpiile sudice, valorile extreme ating 3-4 zile pe an, în timp ce în zona centrală şi platourile nordice pot fi înregistrate până la 7-8 zile într-un an, cum s-a întâmplat la Cornești în 1955, un record de opt zile de grindină.

Sectorul central al republicii evidenţiază cea mai mare vulnerabilitate, fiind zona de interferenţă a circulaţiilor vestice şi estice şi, totodată, regiunea cu cel mai accentuat relief deluros. Această structură favorizează dezvoltarea convecţiei şi a turbulenţei atmosferice în stratul inferior, ceea ce explică numărul ridicat de zile cu grindină şi caracterul activ al nebulozităţii convective. Regiunile cu vulnerabilitate medie includ Câmpia Nistrului Inferior şi extremitatea sud-vestică a republicii, reprezentată de Colinele Tigheciului. Pe baza acestor particularităţi, a fost elaborată o hartă a vulnerabilităţii la grindină, utilizată ulterior de Serviciul de Intervenţie Activă asupra Proceselor Hidrometeorologice, confirmând relevanţa practică a acestor analize pentru sistemele de protecţie antigrindină din Republica Moldova.

Pericolul asociat grindinei nu este legat doar de distrugerile agricole sau de avariile la bunuri, ci şi de riscul direct pentru viaţă. Viteza de cădere a boabelor poate depăşi zeci de kilometri pe oră, iar în cazul exemplarelor mari,

energia impactului devine suficientă pentru a sparge geamuri sau a provoca traumatisme severe. De-a lungul timpului, în special în regiuni dens populate din Asia, dar și în alte părți ale lumii, au fost consemnate episoade dramatice, cu zeci sau chiar sute de victime. Chiar dacă astfel de situații sunt rare, ele ilustrează foarte clar dimensiunea de risc a acestui fenomen.

În ansamblu, grindina reprezintă expresia extremă a proceselor fizice care au loc în interiorul norilor de furtună: instabilitate accentuată, curenți verticali puternici, temperaturi foarte scăzute în troposfera superioară și prezența apei suprarăcite. În contextul riscurilor meteo-climatice, ea ocupă un loc aparte prin caracterul său brusc, localizat, dar extrem de distructiv, transformând în câteva minute o după-amiază obișnuită de vară într-un episod cu consecințe economice și sociale considerabile.

Tornade și fenomene extreme de vânt. Deși tornadele sunt mai rare în Europa de Est, în ultimii ani s-au înregistrat mai multe cazuri confirmate în România, Ucraina și Republica Moldova. Acestea sunt generate de furtuni supercelulare, cu mișcări de rotație intensă ale coloanei de aer, care produc pagube severe pe arii restrânse.

Pe lângă tornade, vijeliile și rafalele descendente (downbursts) constituie riscuri frecvente. Ele pot provoca doborârea arborilor, avarii la linii electrice și deteriorarea construcțiilor ușoare.

În contextul Republicii Moldova, episoade de vânt puternic sunt asociate adesea cu trecerea fronturilor reci (primăvara și toamna) sau cu instabilitatea de vară. Vitezele maxime pot atinge 28-32 m/s (100-115 km/h), în special în regiunile sudice și estice, unde câmpurile deschise favorizează accelerarea curenților de aer.

Furtuni de iarnă și viscole. În sezonul rece, circulația atmosferică determină adesea viscole, ninsori abundente și depuneri de gheață.

Viscolul apare atunci când viteza vântului depășește 15 m/s, iar ninsoarea este însoțită de transport masiv de zăpadă. Pe fondul topografiei deluroase și al câmpurilor deschise, Republica Moldova este predispusă la blocaje rutiere și izolare temporară a localităților rurale.

Exemple notabile:

- iarna 2012, când stratul de zăpadă a depășit 80 cm în centrul țării;
- februarie 2018, cu ninsori și vânturi de peste 100 km/h în sudul republicii.

Aceste evenimente afectează transportul, infrastructura electrică și agricolă, necesitând măsuri rapide de intervenție și deszăpezire.

În ultimele decenii, datele climatice arată o creştere a frecvenţei fenomenelor de instabilitate atmosferică în Europa de Sud-Est. Tot mai des, furtunile convective ating intensităţi severe, iar ploile torenţiale produc inundaţii rapide. Schimbările climatice contribuie la:

- creşterea conţinutului de umiditate din atmosferă;
- accentuarea contrastelor termice la scară regională;
- migrarea traiectoriilor cicloniilor mediteraneeni spre nord-est.

Aceste procese determină o sezonalitate mai extinsă a riscurilor dinamice – episoade de vreme severă putând apărea atât primăvara devreme, cât şi toamna târziu.

Fenomenul inundaţiilor este strâns legat de dinamica proceselor atmosferice extreme. Cicloanele, furtunile violente şi ploile torenţiale sunt, de fapt, expresia unor mecanisme atmosferice intense, care mobilizează cantităţi mari de energie şi umezeală. Atunci când aceste procese se manifestă simultan într-un spaţiu restrâns – fie prin advecţii masive de aer umed, fie prin convecţie puternică şi formarea norilor Cumulonimbus – rezultatul poate fi o cădere bruscă şi abundentă de precipitaţii. În asemenea situaţii, sistemele naturale şi cele antropice sunt puse sub presiune: râurile reacţionează rapid, pantele versanţilor nu mai pot reţine apa, iar solurile, deja saturate, îşi pierd capacitatea de infiltraţie. Astfel se creează premisa unui fenomen hidrologic major – inundaţia.

Inundaţia reprezintă invadarea unor suprafeţe de teren în mod normal uscate de către apele revărsate ale râurilor, fluviilor, lacurilor sau mărilor. Ea poate fi favorizată de ploi excesive, furtuni puternice, topirea rapidă a zăpezilor sau de fenomene hidrodinamice precum blocajele cu sloiuri ori ridicarea nivelului mării în contextul depresiunilor barice profunde. Pe măsură ce se acumulează un surplus de apă în bazinul hidrografic, nivelul cursurilor de apă creşte progresiv, atingând mai întâi cota de atenţie, apoi cota de inundaţie, moment în care zonele adiacente sunt submerse. Luncile, câmpiile agricole şi terenurile construite pot fi complet acoperite de apă, iar populaţia şi animalele pot fi puse în pericol, mai ales atunci când fenomenul survine brusc sau pe timpul nopţii.

Pe parcursul istoriei, inundaţiile au fost întâlnite atât ca fenomene distructive, cât şi ca evenimente regenerative. Civilizaţiile vechi, precum cea egipteană, au valorificat revărsările Nilului pentru fertilizarea solurilor şi pentru irigaţii, în timp ce mitologiile lumii evocă frecvent caracterul devastator al marilor inundaţii. În epoca modernă, acumularea apei în lacurile de baraj şi

în rezervoarele hidrotehnice poate atenua parţial efectele secetei şi poate fi folosită pentru producerea energiei, însă gestionarea acestor structuri rămâne esenţială pentru prevenirea riscului de rupere sau deversare necontrolată.

Cauzele inundaţiilor sunt diverse şi reflectă interacţiunea dintre atmosferă, relief şi activitatea umană. Cele mai severe episoade apar atunci când precipitaţiile intense acoperă simultan o mare parte a unui bazin hidrografic, iar solul – saturat în urma ploilor anterioare sau a topirii zăpezilor – nu mai poate reţine apa. Intensitatea şi durata ploilor sunt factori decisivi: o ploaie torenţială de 50 mm căzută în câteva ore poate produce inundaţii rapide chiar şi în zonele joase, în timp ce aceeaşi cantitate distribuită pe durata unei zile are efecte mult mai reduse. De asemenea, pantele abrupte, solurile argiloase, gradul ridicat de compactare şi defrişările favorizează scurgerea de suprafaţă în detrimentul infiltraţiei, accelerând translaţia apei spre văi şi râuri.

Inundaţiile pot rezulta şi din cauze locale sau antropice: sistemele urbane de drenaj subdimensionate, obturarea văilor naturale prin construcţii, ruperea digurilor sau distrugerea barajelor pot transforma un episod pluvial intens într-un dezastru. Furtunile violente din zonele montane pot menţine norii de precipitaţii deasupra unui teritoriu mai multe ore, generând viituri rapide care depăşesc debitul normal al râurilor de zeci de ori. În schimb, în regiunile costiere, depresiunile barice puternice şi vânturile asociate pot împinge apa mării spre ţărm, producând inundaţii marine chiar şi fără precipitaţii abundente.

În orice situaţie, inundaţia rămâne una dintre cele mai complexe, imprevizibile şi periculoase manifestări hidrologice, aflându-se la intersecţia dintre atmosfera în permanentă transformare, particularităţile geografice ale teritoriului şi presiunea activităţilor umane asupra mediului.

Prevenire şi reducerea riscurilor. Gestionarea riscurilor atmosferice dinamice presupune o combinaţie de măsuri tehnice, instituţionale şi educaţionale:

- modernizarea sistemelor de avertizare meteorologică şi integrarea lor cu platformele digitale naţionale;
- dezvoltarea infrastructurii de protecţie împotriva grindinii şi a vânturilor puternice;
- întărirea reţelelor electrice şi a construcţiilor expuse;
- instruirea populaţiei privind comportamentul în caz de furtuni severe;
- cooperare transfrontalieră în monitorizarea cicloniilor şi a sistemelor convective.

Riscurile atmosferice dinamice reflectă caracterul instabil şi energetic al atmosferei, fiind printre cele mai spectaculoase, dar şi periculoase manifestări meteorologice. În contextul încălzirii climatice globale, aceste riscuri vor deveni tot mai frecvente şi mai greu de gestionat, necesitând o abordare integrată între observaţie, prognoză, educaţie şi adaptare.

Seceta – fenomen complex

Seceta reprezintă riscul ecologic cu cea mai mare stabilitate, care poate avea efecte pe termen lung, în special asupra populaţiei din mediul rural, dependentă de activitatea agricolă, ramură economică supusă permanent capriciilor vremii.

Modificările climatice globale (creşterea temperaturii medii, schimbarea regimului şi cantităţilor de precipitaţii) şi defrişările au determinat, în ultimele decenii, o creştere a suprafeţelor afectate de deşertificare la nivelul întregii planete. De aceea, deşertificarea este considerată ca fiind cel mai mare flagel care ameninţă Terra. Necesitatea de a aborda problemele deşertificării a fost subliniată la Conferinţa Naţiunilor Unite privind Mediul Înconjurător şi Dezvoltarea de la Rio de Janeiro (1992), în urma căreia a fost elaborată Convenţia privind Combaterea Deşertificării (CCD), adoptată la Paris pe 17 iunie 1994 şi intrată în vigoare la 26 decembrie 1994. Începând din 1997 şi România este una dintre ţările semnatare ale acestei convenţii (Legea 629/1997). Pe plan mondial, conform datelor prezentate de Convenţia privind Combaterea Deşertificării, o treime din suprafaţa globului revine terenurilor supuse aridizării şi deşertificării. Este afectată o populaţie de peste un miliard de oameni, din 110 ţări de pe toate continentele, inclusiv 5 ţări din cadrul Uniunii Europene. Costul anual al deşertificării este apreciat la 42 miliarde dolari. La recomandarea Naţiunilor Unite, ziua de 17 iunie a fost dedicată „Combaterii deşertificării, secetei şi degradării terenurilor". În acest fel, comunitatea internaţională încearcă, prin marcarea unei date calendaristice, să sensibilizeze opinia publică din întreaga lume şi, în special, pe cei care promovează politici de administrare a suprafeţelor de teren să acţioneze în direcţia diminuării efectelor deşertificării, secetei şi degradării terenurilor (Chiriac, et al., 2004).

Seceta/deşertificarea. Seceta este o perioadă prelungită, anormal de uscată, de la deficienţa de umiditate. Seceta creează efecte negative asupra alimentării cu apă, a calităţii apei, a hidroenergeticii, a vegetaţiei, a solurilor, a animalelor şi a oamenilor. Aceasta rezultă din perturbări pe scară largă ale modelelor de circulaţie atmosferică care pot persista luni sau ani. Toate secetele

provin din prea puține precipitații (de exemplu, secetă meteorologică), dar vulnerabilitatea crește pe măsură ce modelele de utilizare a terenurilor și a apei se schimbă. Seceta are loc odată cu fluctuațiile vremii globale. Cea mai cunoscută neregulă climatică recurentă la fiecare câțiva ani este cunoscută sub numele de El Niño. El Niño este un leagăn extrem într-o schimbare recurentă a presiunii aerului peste Oceanul Pacific numită Oscilația sudică. Multe secete care afectează estul și nordul Australiei sunt considerate ca rezultat direct al unui leagăn puternic în Oscilația sudică. În ultimii 60 de ani, seceta a afectat SUA, Canada, Australia, China și Magnolia. Deși locația variază, seceta are loc în fiecare an în SUA și are ca rezultat efecte economice, sociale și de mediu grave. Pe baza studiului FEMA din 1995, pierderile anuale asociate cu seceta din SUA au fost estimate la între 6 miliarde de dolari și 8 miliarde de dolari (FEMA, 1995). În anii 1950, multe zone din SUA, care se întindea de la mijlocul vestului până la Marile Câmpii și spre sud în New Mexico, s-au confruntat cu condiții severe de secetă. Seceta s-a domolit în majoritatea zonelor odată cu ploile de primăvară din 1957. Seceta s-a caracterizat prin precipitații scăzute și temperaturi excesiv de ridicate. Seceta a devastat producția agricolă și a degradat terenurile din aceste regiuni. Din nou, în anii 1980 (1987-1989), seceta a afectat multe zone din SUA. Seceta s-a intensificat în nordul Marilor Câmpii, s-a răspândit în mare parte din jumătatea estică a SUA și a afectat zonele primare de cultivare a porumbului și a boabelor de soia. Vara anului 1988 este bine cunoscută pentru incendiile forestiere extinse care au ars în vestul Americii de Nord, inclusiv incendiul catastrofal Yellowstone. În plus față de condițiile uscate, valurile de căldură din vara anului 1988 au doborât recorduri de temperatură de lungă durată în multe zone metropolitane din vestul și nord-estul statului. Combinând pierderile de energie, apă, ecosisteme și agricultură, costul total al secetei a fost estimat la 39 de miliarde de dolari (Coch, 1995). Vestul Canadei s-a confruntat, de asemenea, cu secetă în 1988, iar pierderea în acest caz a fost estimată la peste 1,8 miliarde de dolari. În anii 1980 și 1990, multe părți ale Australiei s-au confruntat cu o secetă. În perioada 1979-1983, zone foarte mari din centrul și estul Australiei au înregistrat precipitații scăzute. Deși nu s-au produs decese umane cunoscute din cauza foametei sau a bolii, impactul total al evenimentului a fost estimat la 7 miliarde de dolari la acel moment. Seceta a afectat producția de cereale, bumbac și zahăr și a cauzat pierderi de animale, precum și tone de sol vegetal. Din nou, din 1991 până la sfârșitul anului 1995, o secetă prelungită și severă a avut loc în majoritatea părților din nord-estul New South Wales și Queensland. Nivelul apei a scăzut în

rezervoarele majore din zonă din cauza precipitaţiilor scăzute. Deficitul de apă a afectat semnificativ agricultura până la o pierdere de 5 miliarde de dolari. Deşertificarea, transformarea treptată a terenurilor arabile şi locuibile în deşert, este una dintre cele mai importante provocări de mediu în viitor. Schimbările climatice şi utilizarea necorespunzătoare a terenurilor sunt factori care contribuie. În fiecare an, deşertificarea şi seceta reprezintă o pierdere de 42 de miliarde de dolari a productivităţii alimentare la nivel mondial (UNEP, 2004; Sivakumar, 2006). În China, aproape 20% din suprafaţa terenului este deşertică. Ca urmare a unei combinaţii de practici agricole precare, secetă şi cerere crescută de apă subterană, deşertificarea a devenit, fără îndoială, cea mai importantă provocare de mediu din China. Din cauza efectelor creşterii deşertificării, fermierii îşi abandonează terenurile, iar intensitatea furtunilor de nisip creşte.

Ariditatea reprezintă unul dintre cele mai persistente şi mai severe riscuri climatice, deoarece afectează simultan disponibilitatea apei, funcţionarea ecosistemelor şi productivitatea agricolă. În contextul încălzirii globale, numeroase scenarii climatice arată că regiunile sudice ale Europei şi mari areale din America de Nord vor experimenta episoade tot mai accentuate de uscăciune, secetă atmosferică şi hidrologică, precum şi o diminuare a resurselor de apă. România, în special în zonele sudice şi sud-estice, este proiectată să resimtă o intensificare a aridităţii în perioada de vegetaţie, cu consecinţe asupra agriculturii, infrastructurii şi gestionării apei. În acest context, evaluarea aridităţii nu este doar o nevoie academică, ci un element esenţial pentru planificarea durabilă a resurselor de apă şi pentru înţelegerea evoluţiei peisajului geografic.

Pentru caracterizarea aridităţii au fost propuse, de-a lungul timpului, numeroase metode şi indicatori, fiecare oferind o perspectivă particulară asupra raportului dintre precipitaţii, temperatură şi evapotranspiraţie. Printre cei mai utilizaţi se numără factorul de ploaie al lui Lang, indicele De Martonne, indicele lui Thornthwaite sau indicele UNESCO (1979), fiecare adaptat unor condiţii climatice specifice. O contribuţie importantă în clasificarea regiunilor aride este sistemul lui Köppen, care delimitează tipul principal de climat uscat (B) în două mari subtipuri: BS, semiarid (stepic), şi BW, arid (deşertic). Regiunile semiaride (BS) primesc mai multe precipitaţii decât deşerturile propriu-zise, fiind asociate vegetaţiei ierboase, spinoase sau suculente, în timp ce subtipul BW, caracteristic Saharei, Peninsulei Arabice sau Australiei centrale, se remarcă prin precipitaţii extrem de reduse, umiditate atmosferică scăzută şi

amplitudini termice diurne pronunţate. Diferenţierea latitudinală între zonele subtropicale şi cele temperate se face prin indicii h (BSh) şi k (BSk).

Indicele de ariditate De Martonne. Indicele de ariditate De Martonne (Iar.DM) este unul dintre cei mai utilizaţi indicatori pentru aprecierea gradului de uscăciune a unui climat, fiind definit ca raport între suma precipitaţiilor anuale şi temperatura medie anuală, la care se adaugă constant 10°C la numitor, pentru a permite aplicarea lui şi în regiuni cu temperaturi medii negative. Valori reduse ale indicelui indică un climat mai secetos, în timp ce valorile mari corespund condiţiilor umede. În România, repartiţia spaţială a Iar.DM arată o variabilitate pronunţată: cele mai aride regiuni sunt estul Dobrogei, unde valorile coboară sub 20, în timp ce cea mai mare parte a Câmpiei Române, estul Podişului Moldovei, Câmpia de Vest şi vestul Podişului Transilvaniei se încadrează, în general, între 20 şi 30, ceea ce, în clasificarea lui De Martonne, corespunde climatului subumed. Valorile de 40–50 apar în zona deluroasă şi subcarpatică, unde precipitaţiile şi evapotranspiraţia de referinţă sunt, în linii mari, în echilibru, iar în regiunile montane indicele depăşeşte 60–100, indicând condiţii umede până la foarte umede. Chiar dacă percepţia comună este că sudul şi estul ţării sunt „uscate”, clasarea lor în categoria subumedă subliniază mai degrabă caracterul fragil al echilibrului hidric, ceea ce explică de ce agricultura de mare randament în aceste zone depinde tot mai mult de irigaţii. Indicele poate fi calculat şi la scară lunară, iar variaţia lui pe parcursul perioadei de vegetaţie reflectă bine etajarea altitudinală şi sezonalitatea aridităţii.

Evapotranspiraţia de referinţă (ETo). Evapotranspiraţia de referinţă, notată ETo, exprimă cererea evaporativă a atmosferei pentru o suprafaţă standard de iarbă scurtă, bine aprovizionată cu apă, şi este astfel un parametru pur climatic, independent de un anumit tip de cultură. Ea combină, într-un singur concept, evaporarea apei de la suprafaţa solului şi a apei libere cu transpiraţia plantelor, fiind controlată de radiaţia solară, temperatură, umiditatea aerului şi viteza vântului. În practică, ETo se estimează astăzi aproape exclusiv prin metoda Penman–Monteith, considerată standard internaţional, deoarece integrează atât componenta energetică (bilanţul de radiaţie), cât şi pe cea aerodinamică (transportul de vapori prin vânt) şi caracteristicile unei vegetaţii de referinţă. Spre deosebire de ETo, evapotranspiraţia culturilor (ETc) depinde de specie, faza de vegetaţie, arhitectura plantei şi condiţiile de sol, fiind obţinută prin înmulţirea ETo cu un coeficient de cultură (Kc). În acest fel, ETo devine veriga de legătură dintre climat şi gestionarea apei în agricultură: ea permite estimarea consumului de

apă al culturilor, dimensionarea irigațiilor și evaluarea deficitului climatic de apă, fiind esențială în analiza aridității și a riscurilor hidrice într-un context de încălzire climatică.

Studiu de caz: Secetele catastrofale din 2007 și 2012 în Republica Moldova

Seceta reprezintă unul dintre cele mai severe riscuri meteo-climatice cu care se confruntă Republica Moldova, fiind un fenomen de natură complexă, cu efecte hidrologice, pedologice și agricole profunde. În contextul încălzirii climatice regionale, frecvența și intensitatea acestor episoade s-au amplificat semnificativ în ultimii 20 de ani. Cultura floarea-soarelui, larg răspândită pe teritoriul republicii și importantă pentru economia agrară, este puternic dependentă de regimul de umiditate în perioada critică de formare și umplere a semințelor. Analiza secetelor din 2007 și 2012 permite evidențierea modului în care anomaliile termice și pluviometrice se traduc direct în pierderi de producție, reflectând vulnerabilitatea structurii agricole la variabilitatea climatică.

Context climatic și selectarea fenomenului analizat. *Republica Moldova se situează într-o zonă de tranziție climatică, sensibilă la procese atmosferice care favorizează deficitul de umiditate: verile calde și adesea secetoase, absența influențelor oceanice moderatoare și circulația predominant continentală. Secetele constituie 12.5% din totalul hazardurilor naturale raportate în țară, iar culturile de câmp – în special floarea-soarelui - sunt deosebit de vulnerabile la variațiile de temperatură și precipitații în lunile mai-august. În acest context, episoadele severe din 2007 și 2012 sunt studiate ca exemple reprezentative ale modului în care schimbările climatice intensifică riscurile agrometeorologice, afectând un sector agricol cu importanță strategică.*

Seceta din 2007 – un episod de intensitate extremă*. Seceta începută la sfârșitul anului 2006 s-a amplificat dramatic în intervalul mai–iulie 2007, când precipitațiile au constituit doar 30% din normă, iar perioadele fără ploaie au persistat până la 73 de zile. Temperatura medie a aerului (+21…+23°C) a depășit normele cu 3-4°C, iar numărul de zile cu temperaturi ≥35°C a fost de 10-12, acompaniat de o valoare record absolută de +41.5°C (SM Camenca). În luna iulie, precipitațiile au lipsit aproape complet în sud, iar CHT a variat între 0.2–0.5, valori specifice secetei puternice și foarte puternice.*

Etapa critică de dezvoltare a floarea-soarelui (formarea capitulului și umplerea semințelor) a coincis cu această perioadă de stres sever, determinând capitule mici, scăderea numărului de semințe și o reducere drastică a producției. Roada medie la nivel de țară a fost de 7 q/ha – cu 54% mai mică decât în 2006, iar 80% din teritoriul republicii a fost afectat.

Seceta din 2012 – cea mai severă din ultimul secol*. Vara anului 2012 a fost caracterizată de anomalii termice de +3.0…+4.5°C și de un deficit pluviometric sever (35-70% din normă). Temperaturile de peste +30°C au persistat între 39-62 zile (de 2-3 ori mai mult decât norma), iar cele ≥35°C s-au înregistrat 16-35 zile - un record*

instrumentar. Rezervele de umiditate din sol au scăzut la 5-30 mm în stratul de 0.5 m, iar CHT în iunie–august s-a situat în intervalul 0.1-0.5, ceea ce indică secetă foarte puternică. Impactul asupra culturii a fost major: floarea-soarelui a înflorit și a maturat prematur, iar diametrul capitulelor a scăzut semnificativ (14-19 cm). Producția medie a coborât la 10 q/ha, cu 6 q/ha mai puțin decât în anul precedent, iar seceta a afectat peste 90% din teritoriul țării și circa 79% din suprafața cultivată.

Cartografierea roadei în profil administrativ evidențiază diferențe regionale marcante:

- *Nordul republicii a fost cel mai puțin afectat, cu valori de peste 15 q/ha în raioanele Ocnița, Briceni, Dondușeni.*
- *Regiunile central-vestice și sud-vestice au avut recolte de 5-10 q/ha.*
- *Sudul, sud-estul și partea centrală au înregistrat cele mai mici producții (<5 q/ha), reflectând atât stresul climatic, cât și rezervele reduse de apă acumulată în sezoanele anterioare.*

Cele două secete au provocat pierderi economice directe de peste 3 miliarde USD, depășind intensitatea secetei istorice din 1946.

Secetele din 2007 și 2012 reprezintă exemple elocvente ale amplificării riscurilor hidrice și climatice în Republica Moldova, pe fondul încălzirii regionale și globalizării procesului de aridizare.

Impactul asupra culturii floarea-soarelui a fost sever, reducând recolta cu 37-54% față de anii precedenți.

Indicatorii agrometeorologici (CHT, temperaturile extreme, deficitul pluviometric) corelează strâns cu variația producției agricole, justificând utilizarea lor în avertizarea timpurie.

Analiza spațială a arătat o vulnerabilitate accentuată în sudul și centrul republicii, zone unde adaptarea prin irigație, soiuri rezistente și tehnologii moderne devine esențială.

Schimbări climatice și amplificarea riscurilor

Privind din perspectivă istorică, studierea atmosferei și a oceanelor se află printre primele preocupări științifice ale omului. Referințe la fenomene meteorologice apar în Vedele indiene și în tăbliţele cuneiforme din spațiul Tigrului și Eufratului. Filosofii greci au încercat să explice cauzele vremii și ale climei: Hipocrate, în Aer, ape și locuri (~400 î.Hr.), oferă probabil prima climatografie, iar Aristotel, în Meteorologica (~350 î.Hr.), realizează un tratat timpuriu de meteorologie. Termenul „climatologie” provine din gr. κλίμα (înclinare), o trimitere la raportul dintre latitudine și distribuția energiei solare. Odată cu epoca marilor descoperiri geografice, devine evident că structurile climatice nu sunt simple benzi latitudinale, ci configurații spațiale complexe, modelate de circulația generală a atmosferei, procesele continentale și oceanice (Bojariu et al., 2015).

Sistemul climatic cuprinde atmosfera, oceanul, criosfera (zăpadă, gheaţă marină, gheţari, permafrost), litosfera şi biosfera, fiecare având timpi de răspuns diferiţi la perturbaţii: de la săptămâni–luni (atmosfera, stratul oceanic de suprafaţă) până la sute–mii de ani (oceanul adânc, calotele de gheaţă, permafrostul) şi chiar milioane de ani (ciclul lung al carbonului) (Bojariu et al., 2015).

Schimbări climatice şi semnificaţia lor actuală. Schimbările climatice reprezintă una dintre cele mai complexe provocări ale secolului XXI, afectând toate componentele mediului şi ale economiei. Fenomenele extreme – secete, valuri de căldură, inundaţii, furtuni violente – devin mai frecvente şi mai intense. Conform IPCC (AR6, 2021), temperatura medie globală a crescut cu cca+1.1°C faţă de perioada preindustrială, cu ritmuri de încălzire mai rapide în interiorul continentelor. În Europa de Sud-Est şi, implicit, în Republica Moldova, schimbările se manifestă prin creşterea temperaturii medii anuale, modificarea regimului precipitaţiilor, accentuarea aridităţii şi amplificarea riscurilor climatice compuse.

Tendinţe climatice observate în Republica Moldova (1961–2020)

La scara Republicii Moldova, schimbările climatice nu mai reprezintă un concept abstract, ci un proces vizibil, măsurabil şi resimţit în fiecare an. Analiza ultimelor şase decenii arată o transformare profundă a climatului regional, iar hărţile climatice pentru temperatură şi precipitaţii, comparate pe trei intervale distincte, conturează clar direcţia în care evoluează atmosfera.

Un climat tot mai cald - o tranziţie clar observabilă pe hartă. Seria celor trei hărţi ale temperaturii medii anuale (1961–1990, 1981–2010, 1991–2020) constituie una dintre cele mai elocvente reprezentări cartografice ale intensificării procesului de încălzire climatică în Republica Moldova (figura 7.1). În intervalul de referinţă 1961–1990, distribuţia spaţială a temperaturii se caracteriza printr-un gradient termic nord–sud bine definit, valorile medii anuale situându-se predominant între 8 şi 9°C, cu minimele înregistrate în nordul republicii şi maximele moderate în sud. În decadele următoare, această configuraţie termică începe să se modifice treptat, astfel că, în perioada 1981–2010, suprafeţele încadrate în intervalele termice superioare se extind semnificativ, indicând creşterea temperaturii medii anuale pe mari porţiuni din teritoriul ţării.

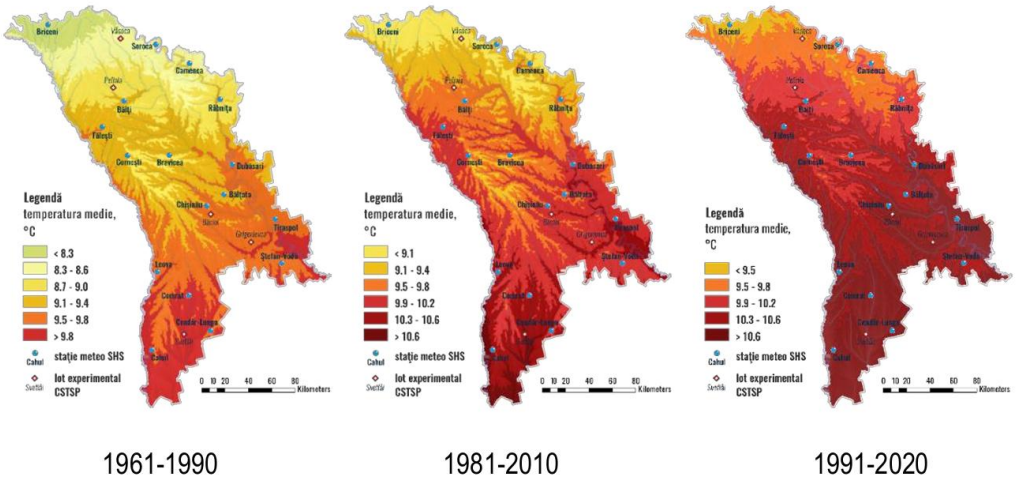


Figura 7.1 Temperatura medie anuală a aerului (Duca, et al., 2023)

Tendința devine și mai evidentă pentru perioada 1991-2020, unde distribuția temperaturilor medii multianuale reflectă generalizarea intervalelor >9.5°C pe aproape întreg teritoriul republicii. Sudul depășește constant pragul de 10°C, iar centrul și inclusiv unele sectoare nordice tind să se apropie de aceste valori. Această evoluție confirmă creșterea medie de aproximativ +1.2°C față de intervalul de referință, cu intensificări pronunțate în sezonul cald și în sezonul rece.

Creșterea temperaturii medii se manifestă printr-o serie de modificări conexe ale regimului termic: extinderea numărului de zile de vară și tropicale, creșterea frecvenței nopților calde și reducerea duratei sezonului cu îngheț cu 15–25%. Un aspect deosebit de relevant este amplificarea valurilor de căldură, care nu doar că apar mai frecvent, ci și prezintă durate mai mari - de la 3-4 zile în perioada 1961–1990, la 7–10 zile în intervalele recente.

Hărțile cantității anuale de precipitații (figura 7.2) prezintă un tablou climatic aparent mai puțin spectaculos, însă o analiză atentă relevă transformări importante în structura regimului pluviometric. În intervalul 1961–1990, nordul și zona centrală împădurită (Codrii) se distingeau prin aporturi pluviometrice superioare, depășind frecvent 600 mm anual, în timp ce sudul păstra caracteristici mai uscate, dar fără tendințe accentuate de aridizare.

În perioada 1981-2010, cartografia indică o extindere vizibilă a suprafețelor din sud și sud-est în categoria <500 mm/an, semnalizând o diminuare progresivă a resurselor pluviometrice în aceste regiuni. Aceeași tendință se accentuează perioada 1991-2020, unde sudul republicii se stabilizează în intervalul 500-525 mm/an, conturând tot mai clar tranziția către

un climat cu trăsături semiaride. În contrast, regiunea nordică îşi menţine nivelurile relativ ridicate ale precipitaţiilor, depăşind adesea 600 mm/an.

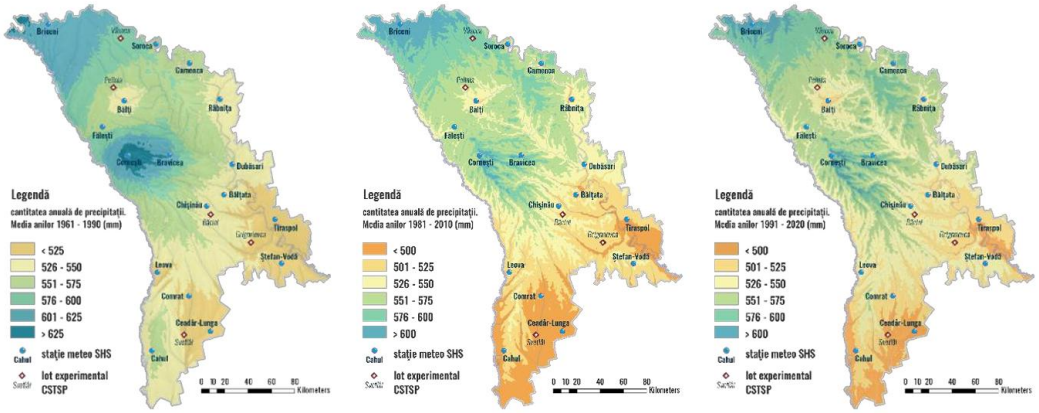


Figura 7.2. Cantitatea anuală de precipitaţii

Această aparentă stabilitate în cantitatea totală anuală maschează însă modificări esenţiale în distribuţia sezonieră şi în caracterul precipitaţiilor. Datele instrumentale arată scăderi consecvente ale precipitaţiilor în sezonul de primăvară şi vară - perioade critice pentru culturile agricole - concomitent cu o creştere a aportului pluviometric în sezonul rece. În acelaşi timp, intensitatea şi frecvenţa ploilor torenţiale cresc, ceea ce contribuie la accentuarea riscurilor hidrologice: inundaţii rapide, eroziune, scăderea infiltraţiei şi reîncărcării apelor subterane.

Privite în ansamblu, cele două serii de hărţi scot în evidenţă o modificare profundă a climatului Republicii Moldova: un climat sistematic mai cald, în care verile tind să devină mai uscate, iar iernile mai umede; un climat mai variabil, mai instabil, predispus la manifestări extreme precum valuri de căldură prelungite, secete pedologice severe, incendii de vegetaţie, dar şi ploi intense urmate de inundaţii rapide.

Această transformare confirmă tranziţia regională către un regim climatic dominat de riscuri compuse şi de incertitudini crescute, cu implicaţii directe asupra resurselor de apă, sănătăţii populaţiei, biodiversităţii, şi în mod particular asupra agriculturii - sector puternic expus atât temperaturilor extreme, cât şi deficitului estival de umiditate.

Scenariile climatice pentru secolul XXI completează tabloul descris anterior.

Dacă emisiile globale sunt reduse rapid (scenariul RCP 2.6), Republica Moldova ar putea înregistra o creştere termică relativ moderată de +1.5°C, cu un regim pluviometric apropiat de cel actual.

În scenariul mediu (RCP 4.5), temperaturile ar putea creşte cu +2.5°C, iar precipitaţiile estivale s-ar reduce cu 10-15%.

În scenariul pesimist (RCP 8.5), încălzirea poate depăşi +4–5°C, însoţită de secete severe, reducerea precipitaţiilor de vară cu 20–25% şi incendii vegetale extinse.

Indiferent de scenariu, direcţia generală este clară: creşterea aridităţii, diminuarea resurselor de apă în sezonul cald şi amplificarea riscurilor climatice compuse (căldură + secetă + incendii, ploi violente + inundaţii rapide).Tabelul 6.1. Scenariile climatice şi efectele estimate pentru Republica Moldova

Scenariu	**Descriere**	**Efecte estimate pentru Republica Moldova (2100)**
RCP 2.6	Scenariu optimist (reducere rapidă a emisiilor)	Creştere termică de +1.5°C; regim pluviometric relativ stabil; secete moderate
RCP 4.5	Scenariu mediu de stabilizare	Creştere termică de +2.5°C; scădere a precipitaţiilor de vară cu 10–15%; creşterea frecvenţei valurilor de căldură
RCP 8.5	Scenariu pesimist (emisii ridicate)	Creştere termică de +4–5°C; reducere cu 20–25% a precipitaţiilor estivale; secete severe şi incendii extinse

Implicaţii probabile: ariditate în creştere, deficit hidric estival, riscuri combinate (căldură + secetă + incendii), precipitaţii intense şi inundaţii rapide mai frecvente, ierni mai scurte şi sezon cald extins – cu efecte asupra agriculturii şi ecosistemelor.

Pe măsură ce schimbările climatice se manifestă tot mai vizibil, *adaptarea* devine o necesitate strategică pentru Republica Moldova, iar procesul trebuie să fie unul continuu şi bine fundamentat. Un Plan Naţional de Adaptare, actualizat periodic, reprezintă nucleul acestor eforturi, orientând politicile sectoriale în funcţie de evoluţia riscurilor climatice. Modernizarea reţelelor meteorologice şi hidrologice, elaborarea hărţilor locale şi regionale de vulnerabilitate şi dezvoltarea unor sisteme eficiente de monitorizare sunt esenţiale pentru înţelegerea şi anticiparea fenomenelor extreme. În acelaşi timp, managementul durabil al apei - prin lucrări de retenţie, extinderea şi modernizarea sistemelor de irigaţii, precum şi prin protecţia solului şi extinderea suprafeţelor împădurite - devine unul dintre pilonii centrali ai

rezilienței teritoriale. Procesul este completat de acțiuni de educație și conștientizare, orientate spre comunități, administrații publice și sistemul de învățământ.

Tabelul 6.2. Indici utilizați pentru evaluarea secetelor

Indice	Formula / Parametru principal	Descriere și utilizare
SPI (Standardized Precipitation Index)	abaterea standardizată a precipitațiilor față de media multianuală	permite analiza secetei pe diferite scări temporale (1, 3, 6, 12 luni); valori negative indică secetă
SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index)	diferența dintre precipitații și evapotranspirația potențială	evidențiază influența temperaturii asupra bilanțului hidric
PNI (Pluviometric Normalized Index)	raport între precipitațiile observate și media multianuală	exprimă intensitatea secetei meteorologice la nivel lunar
DI (De Martonne Aridity Index)	P/(T + 10), unde: P = precipitațiile medii anuale (în milimetri, mm) T = temperatura medie anuală (în grade Celsius, °C)	indică gradul de ariditate; valori <10 semnalează condiții semiaride
NDMI / NDWI (Normalized Difference Moisture / Water Index)	indici satelitari calculați din imaginile Sentinel/Landsat	măsoară conținutul de umiditate al vegetației și solului; permit monitorizarea spațială a secetei

Pe partea de *atenuare*, diminuarea emisiilor de gaze cu efect de seră necesită o tranziție graduală, dar fermă, către surse regenerabile de energie și creșterea eficienței energetice în industrie, transport și sectorul rezidențial. Extinderea suprafețelor împădurite și protejarea ecosistemelor cu rol de absorbție a carbonului sunt măsuri cu dublu beneficiu: reduc emisiile și cresc capacitatea teritoriului de a amortiza fenomene precum seceta și eroziunea. Agricultura joacă un rol important în reducerea presiunii climatice, prin adoptarea unor practici cu emisii scăzute – lucrări minime ale solului, rotația culturilor, utilizarea biomasei – care îmbunătățesc fertilitatea solului și optimizează consumul de resurse.

Schimbările climatice funcționează ca un veritabil multiplicator de risc, amplificând frecvența și intensitatea secetelor, valurilor de căldură, precipitațiilor extreme, dar și - la scară globală - fenomene din sfera criosferei, precum avalanșele glaciare sau eliberarea carbonului din permafrost. În aceste

condiţii, adaptarea devine o prioritate naţională. Integrarea analizei riscurilor climatice în planificarea teritorială, în strategiile agricole, în politicile energetice şi în educaţia ecologică reprezintă o condiţie esenţială pentru dezvoltarea durabilă.

Prin combinarea informaţiilor climatice, satelitare şi statistice într-un sistem integrat de monitorizare–avertizare–răspuns şi prin investiţii consistente în reziliența teritorială – irigaţii, retenţie, împăduriri, infrastructuri verzi - Republica Moldova îşi poate reduce vulnerabilitatea, poate proteja securitatea alimentară şi poate asigura un cadru favorabil unei dezvoltări sustenabile pe termen lung.

Autoevaluare

1. Definiţi pe scurt „risc climatic" şi „risc meteorologic" şi precizaţi criteriul esenţial care le diferenţiază.
2. Daţi două exemple pentru fiecare categorie: a) riscuri meteorologice; b) riscuri climatice. Explicaţi de ce le încadraţi astfel.
3. Explicaţi relaţia cauzală dintre riscurile meteorologice şi apariţia riscurilor climatice (ex.: cum pot deficitele repetate de precipitaţii genera secetă climatică).
4. Enumeraţi cele patru mari categorii de riscuri meteo-climatice descrise în text şi asociaţi fiecăreia câte un efect principal asupra mediului sau societăţii.
5. Argumentaţi, în 6 - 8 rânduri, care sunt cele mai relevante riscuri meteo-climatice pentru Republica Moldova şi ce factori fizico-geografici explică această vulnerabilitate.
6. Alegeţi un eveniment complex (ex.: val de căldură + secetă sau ploi torenţiale + topire de zăpadă) şi descrieţi lanţul de efecte (minim 3 verigi) asupra agriculturii şi infrastructurii.

Bibliografie recomandată

- Bobrowsky, P., 2013. *Encyclopedia of natural hazards.* New York: Springer.
- Bojariu, R. & et.al., 2015. *Schimbările climatice : de la bazele fizice la riscuri şi adaptare.* Bucureşti: Printech.
- Chiriac, D., Humă, C. & Bleahu, A., 2004. *Efectele socioeconomice ale secetei şi fenomenelor asocioate asupra comunităţilor umane din România,* Bucureşti: Academia Română.
- Păltineanu, C., Lungu, M. & Mihăilescu, I. F., 2008. *Riscuri climatice şi hidrologice.* Bucureşti: Editura Universitară.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021. *PreventionWeb.* [Interactiv] Available at: https://www.preventionweb.net/



MANAGEMENTUL RISCULUI DE DEZASTRE

Rezultatele învățării:

La finalul acestei unități de învățare, studenții vor fi capabili să:

- definească și să explice conceptul de dezastru, riscuri naturale și mecanismele prin care acestea afectează societatea.
- descrie componentele fundamentale ale managementului riscurilor: prevenire, pregătire, răspuns și recuperare.
- evalueze factorii care amplifică vulnerabilitatea teritorială: urbanizare necontrolată, degradarea mediului, schimbări climatice.
- identifice măsuri practice de reducere a riscului la nivel comunitar, regional și național, inclusiv elemente de planificare durabilă.
- argumenteze importanța educației, informării publice și culturii siguranței în limitarea consecințelor dezastrelor.

Termeni cheie: risc; reziliență; prevenire; vulnerabilitate; răspuns la dezastru

Dezastrele nu sunt doar fenomene naturale spectaculoase, ci rezultatul întâlnirii dintre procese extreme și vulnerabilitatea societății. Intensificarea activităților umane, urbanizarea accelerată și schimbările climatice transformă aceste evenimente în provocări tot mai frecvente și mai costisitoare. Managementul riscului de dezastre ne arată că impactul lor nu este inevitabil: prin prevenire, planificare și educație, comunitățile pot deveni reziliente și pot limita pierderile. Înțelegerea modului în care hazardele, expunerea și vulnerabilitatea se combină pentru a genera un dezastru este esențială într-o lume aflată în continuă schimbare. Capitolul explorează mecanismele prin care societatea poate anticipa, gestiona și depăși aceste situații critice, transformând reacția în prevenție și vulnerabilitatea în capacitate de adaptare. În final, studentul va descoperi că gestionarea dezastrelor este nu doar o obligație instituțională, ci și o responsabilitate civică și o condiție fundamentală pentru dezvoltarea durabilă.

Concepte și principii generale

Societatea umană funcţionează într-un echilibru permanent între activităţile economice, sociale şi mediul înconjurător. Acest echilibru poate fi însă perturbat de evenimente neobişnuite, cu manifestare violentă, generate fie de procese naturale, fie de acţiuni umane scăpate de sub control. Atunci când astfel de fenomene depăşesc capacitatea comunităţilor şi a instituţiilor de a răspunde în condiţii obişnuite şi provoacă pierderi de vieţi omeneşti, distrugeri materiale semnificative sau afectări severe ale mediului, vorbim despre dezastre. Specificul lor este caracterul brusc, surprinzător şi intens, care produce dereglări majore în funcţionarea normală a unei colectivităţi şi generează efecte cu impact pe termen lung.

Un dezastru nu înseamnă doar victime sau clădiri prăbuşite. El produce o ruptură profundă în viaţa socială şi economică: activităţile sunt paralizate pentru perioade îndelungate, serviciile publice devin disfuncţionale, iar nevoile de bază - alimentaţia, apa potabilă, locuinţa, asistenţa medicală - devin dificil de asigurat. În acelaşi timp, starea morală şi psihologică a comunităţii este serios afectată, ceea ce amplifică vulnerabilităţile şi întârzie revenirea la normalitate.

Riscurile naturale - cele care apar fără intervenţia directă a omului - includ o gamă largă de fenomene capabile să genereze dezastre: cutremure, alunecări de teren, inundaţii, secete prelungite, furtuni şi viscole, incendii de vegetaţie, epidemii şi epizootii. Manifestarea lor depinde de dinamica internă a Terrei şi de comportamentul sistemelor atmosferice, hidrologice şi biologice. În lipsa unei pregătiri adecvate, aceste fenomene pot afecta profund comunităţile, accentuând vulnerabilitatea economică şi socială a teritoriilor expuse.

În acest context, managementul riscului de dezastre devine un domeniu fundamental pentru protecţia populaţiei şi pentru planificarea teritorială modernă. El reprezintă ansamblul proceselor şi măsurilor orientate spre prevenirea, reducerea, monitorizarea şi gestionarea efectelor fenomenelor periculoase asupra societăţii, mediului şi economiei. Conceptual, riscul este rezultatul interacţiunii dintre hazard (probabilitatea producerii unui fenomen periculos), expunere (elementele socio-economice aflate în aria potenţial afectată) şi vulnerabilitate (capacitatea sistemului de a rezista şi de a răspunde). Riscul poate fi diminuat fie prin reducerea hazardului, acolo unde este posibil, fie - mai ales - prin scăderea vulnerabilităţii şi creşterea rezilienţei sistemelor sociale, economice şi de mediu.

La nivel internaţional, Cadrul Sendai pentru Reducerea Riscului de Dezastre 2015–2030 marchează trecerea de la logica gestionării dezastrelor

(„disaster response") la cea a gestionării riscului de dezastre („disaster risk management"). Accentul se mută de la intervenţia de urgenţă către prevenţie, planificare, guvernanţă şi investiţii în reziliență. În această viziune, dezastrele nu sunt simple fatalităţi, ci rezultatul unei combinaţii de factori asupra cărora societatea poate acţiona: localizarea construcţiilor, modul de utilizare a terenurilor, calitatea infrastructurii, nivelul de educaţie al populaţiei, capacitatea instituţională şi cooperarea intersectorială.

Esenţa reducerii riscului constă, aşadar, în înţelegerea faptului că un fenomen natural extrem devine dezastru doar dacă loveşte o comunitate nepregătită sau expusă excesiv. Politicile publice pot limita acest risc prin măsuri de planificare a teritoriului, norme de construcţie adaptate hazardurilor, protecţia ecosistemelor, consolidarea infrastructurilor critice şi dezvoltarea unor sisteme de avertizare timpurie. În paralel, pregătirea populaţiei este esenţială: cunoaşterea regulilor de comportare în situaţii de urgenţă, exerciţiile de simulare, educaţia şcolară şi formarea unei culturi a protecţiei civile pot reduce semnificativ numărul victimelor şi amploarea pagubelor.

Managementul riscului de dezastre acoperă toate etapele ciclului de gestionare: prevenirea şi reducerea riscului, pregătirea pentru situaţii de urgenţă, răspunsul propriu-zis şi recuperarea post-dezastru. Intervenţia – etapă cel mai des asociată cu protecţia civilă – implică mobilizarea rapidă a structurilor specializate, căutarea şi salvarea persoanelor aflate în pericol, acordarea primului ajutor, evacuarea zonelor expuse şi restabilirea minimă a funcţiilor vitale ale infrastructurii. Ulterior, reconstrucţia şi revenirea la normalitate oferă oportunitatea de a „reconstrui mai bine" (Build Back Better), evitând reproducerea vulnerabilităţilor anterioare.

În contextul schimbărilor climatice, managementul riscului capătă o dimensiune suplimentară. Creşterea temperaturilor, modificarea regimului precipitaţiilor şi intensificarea fenomenelor extreme – valuri de căldură, secete, ploi torenţiale, inundaţii rapide – amplifică riscurile existente şi generează noi tipuri de vulnerabilităţi. Investiţiile în infrastructuri verzi, gestionarea durabilă a resurselor de apă, extinderea zonelor împădurite şi protejarea ecosistemelor devin elemente-cheie în reducerea riscurilor hidrometeorologice. Evaluarea riscului, bazată pe observaţii climatologice pe termen lung, modelări hidrologice, analize geospaţiale şi scenarii climatice (RCP), capătă un caracter prospectiv şi fundamentează planificarea adaptării la nivel naţional şi local.

În esenţă, gestionarea riscului de dezastru înseamnă anticipare, educaţie, responsabilitate şi colaborare. Ea implică reducerea expunerii, consolidarea

infrastructurilor, modernizarea instrumentelor de monitorizare şi avertizare timpurie şi, mai ales, cultivarea unei conştiinţe colective a prevenţiei. O comunitate informată şi pregătită este întotdeauna mai sigură şi mai rezilientă în faţa provocărilor viitorului.

Reducerea riscului de dezastre în Republica Moldova

În Republica Moldova, managementul riscului de dezastre se desfăşoară într-un context marcat de vulnerabilităţi structurale şi de resurse limitate. Deşi ţara nu se află în proximitatea marilor zone tectonice sau a regiunilor cu uragane şi taifunuri, ea este expusă unui spectru larg de hazarde: secete prelungite, inundaţii, ploi torenţiale, alunecări de teren, ninsori abundente, depuneri de polei, valuri de căldură şi episoade severe de grindină. Degradarea terenurilor, fragmentarea puternică a reliefului, defrişările, urbanizarea accelerată şi valorificarea agricolă intensivă a peste 90% din suprafaţa ţării fac ca multe fenomene obişnuite să depăşească rapid pragul de normalitate şi să se transforme în evenimente cu impact socio-economic major.

Istoria recentă a ţării este marcată de episoade care au evidenţiat limitele capacităţii de reacţie: inundaţiile severe din 2008, uraganele şi grindina devastatoare ale anilor 1994 şi 2002–2007, secetele catastrofale care au redus drastic producţia agricolă, ninsorile şi depunerile masive de polei, precum şi valurile de căldură şi arşiţă care afectează aproape anual sudul şi centrul republicii. Din punct de vedere hidrometeorologic, intensitatea fenomenelor extreme s-a amplificat, iar frecvenţa lor a crescut de la câteva evenimente severe pe an în perioada istorică la 6–10 episoade în ultimele decenii. Toate acestea confirmă o vulnerabilitate structurală în creştere.

Cadrul instituţional al reducerii riscului de dezastre în Republica Moldova implică mai multe actori. Inspectoratul General pentru Situaţii de Urgenţă (IGSU) are rolul central în organizarea intervenţiei şi coordonarea răspunsului la dezastre, gestionând structurile de protecţie civilă şi serviciile de salvare. Serviciul Hidrometeorologic de Stat (SHS) monitorizează şi prognozează fenomenele meteorologice, climatice şi hidrologice, furnizând avertizări timpurii şi buletine specializate esenţiale pentru prevenire. Agenţia „Apele Moldovei" coordonează managementul resurselor de apă şi lucrările de protecţie hidraulică, iar autorităţile publice locale, prin comitetele teritoriale pentru situaţii excepţionale, au responsabilitatea elaborării planurilor de risc şi a măsurilor preventive la nivel comunitar. Cooperarea internaţională se realizează prin mecanismele Uniunii Europene, sistemele de avertizare ale

Organizației Meteorologice Mondiale și platformele de observare a Pământului, precum Copernicus.

Acest cadru instituțional oferă premise pentru un management integrat al riscului, însă eficiența sa depinde de capacitatea operațională, fluxul informațional și nivelul de pregătire al autorităților și al populației. În practică, modelul de gestionare a dezastrelor în Republica Moldova a fost, mult timp, predominant reactiv: accentul s-a pus pe lichidarea consecințelor post-eveniment, adesea cu costuri foarte ridicate, în timp ce investițiile în prevenție, adaptarea planificării teritoriale la riscuri și consolidarea infrastructurilor de protecție au rămas insuficiente. În condițiile resurselor financiare limitate, argumentul economic devine clar: prevenirea costă mult mai puțin decât reconstrucția.

Reducerea riscului de dezastre în Republica Moldova presupune, prin urmare, trecerea de la o logică a intervenției la una a reziliență. Este nevoie de un sistem integrat de monitorizare - avertizare - răspuns, bazat pe date meteorologice și hidrologice actualizate, pe studii interdisciplinare privind variabilitatea climatică, pe evaluări sistematice ale vulnerabilității localităților, infrastructurilor și sectoarelor economice. La fel de importantă este educația pentru risc: modul în care oamenii înțeleg avertizările, își cunosc propriile vulnerabilități și aplică regulile de comportament în situații de urgență poate reduce semnificativ pierderile de vieți omenești și pagubele materiale.

În contextul încălzirii globale, dezastrele din Republica Moldova trebuie privite ca rezultate ale interacțiunii dintre hazardele naturale, presiunea antropică și capacitatea instituțională de răspuns. Adaptarea devine astfel un pilon esențial al politicilor publice: managementul durabil al apei, protecția solului, împăduririle, modernizarea rețelelor meteo, planificarea urbană responsabilă și integrarea riscurilor climatice în strategiile de dezvoltare naționale și locale. Dezastrele nu pot fi eliminate, dar impactul lor poate fi considerabil diminuat prin investiții inteligente, coordonare interinstituțională și o societate bine informată și conștientă.

Perspective contemporane asupra gestionării riscurilor

Gestionarea riscurilor și dezastrelor a devenit, în ultimele decenii, una dintre cele mai importante preocupări ale societății moderne. Transformările accelerate ale mediului, intensificarea activităților economice și presiunea tot mai mare asupra ecosistemelor naturale au creat un context în care fenomenele extreme nu mai pot fi privite ca episoade izolate, ci ca părți integrale ale realității contemporane. Dezastrele nu sunt doar evenimente rare și

excepţionale; ele reprezintă manifestarea vulnerabilităţii unui sistem social atunci când este expus la forţele naturii sau la efectele neintenţionate ale activităţii umane.

În acest sens, societatea este chemată să îşi regândească relaţia cu hazardele naturale. Experienţa internaţională arată că dezastrele nu se produc doar pentru că fenomenele sunt intense, ci pentru că ele întâlnesc comunităţi expuse, slab pregătite, cu o infrastructură fragilă şi o cultură preventivă insuficient dezvoltată. Vulnerabilitatea, aşadar, este elementul care transformă un eveniment natural într-un dezastru. Aceasta nu este statică: ea se construieşte în timp, prin defrişări, ocuparea necontrolată a luncilor inundabile, degradarea solurilor, urbanizare fără respectarea regulilor de siguranţă, sărăcie, inechitate şi acces limitat la informaţie.

Înţelegerea acestor dinamici impune o abordare profund modernă: riscul nu trebuie tratat ca o fatalitate, ci ca o realitate gestionabilă. Prevenirea devine astfel cheia centrală. Nu este suficientă intervenţia rapidă în momentul producerii unui dezastru - deşi aceasta rămâne vitală - ci este nevoie de un demers continuu de anticipare, educaţie şi planificare (Surdeanu, 2002). Cartografierea hazardelor, evaluarea vulnerabilităţilor, analiza expunerii şi integrarea rezultatelor în politicile de dezvoltare sunt condiţii esenţiale ale unui sistem eficient. Numai astfel poate fi evitată repetarea catastrofelor în aceleaşi areale, cu aceleaşi consecinţe de fiecare dată.

Gestionarea riscurilor depăşeşte, însă, sfera tehnică. Ea implică oamenii - modul în care înţeleg pericolele, modul în care reacţionează şi modul în care participă la construirea unei culturi comunitare a siguranţei. Educaţia pentru protecţie civilă, informarea corectă, exerciţiile de simulare şi responsabilizarea populaţiei au un rol determinant în reducerea numărului de victime şi în eficientizarea intervenţiei. De asemenea, funcţionarea mass-mediei devine crucială în momentele critice: informaţia rapidă, verificată şi lipsită de senzaţionalism este adesea la fel de importantă ca intervenţia salvatorilor.

Răspunsul la dezastru este componenta cea mai vizibilă - mobilizarea rapidă a echipelor specializate, asistenţa medicală, evacuarea, adăpostirea populaţiei şi restabilirea funcţionalităţii infrastructurilor critice. Dar adevărata măsură a rezilienţei unei societăţi se vede în capacitatea de a învăţa din fiecare eveniment şi de a transforma reconstrucţia într-un proces inteligent (Sorocovschi, 2008). Principiul „Build Back Better" exprimă tocmai această abordare: reconstrucţia nu trebuie să reproducă vulnerabilităţile anterioare, ci să creeze un mediu mai sigur, mai robust şi mai adaptat riscurilor viitoare.

În plus, schimbările climatice conferă gestionării riscurilor o dimensiune nouă, mult mai complexă. Creşterea temperaturilor, variabilitatea precipitaţiilor, intensificarea secetelor, valurilor de căldură şi precipitaţiilor extreme generează riscuri combinate şi fenomene în cascadă. Sistemele tradiţionale de protecţie devin insuficiente în faţa acestei dinamici, iar politicile de adaptare trebuie integrate în toate domeniile: planificare urbană, agricultură, gestionarea resurselor de apă, infrastructură, sănătate publică, protecţia ecosistemelor.

Într-o lume aflată în schimbare, gestionarea riscurilor devine astfel o responsabilitate împărţită între instituţii, comunităţi şi indivizi. Instituţiile trebuie să ofere coordonare, monitorizare, legislaţie şi capacitate de intervenţie; comunităţile trebuie să participe activ la pregătire şi prevenire; cetăţenii trebuie să adopte un comportament responsabil, să se informeze şi să reacţioneze adecvat la avertizări. Doar această combinaţie poate transforma un teritoriu vulnerabil într-unul rezilient.

În concluzie, managementul riscurilor şi dezastrelor nu este doar un domeniu tehnic, ci un proces societal profund. El implică înţelegerea legăturilor dintre hazard, expunere şi vulnerabilitate, cultivarea unei culturi a prevenţiei, construirea unor instituţii eficiente şi adaptarea continuă la un climat în schimbare. Dezastrele nu pot fi eliminate complet, dar impactul lor poate fi redus semnificativ prin cunoaştere, cooperare şi anticipare. În ultimă instanţă, reziliența unei societăţi este măsura maturităţii sale în raport cu mediul în care trăiește și cu provocările viitorului.

Autoevaluare

1. Cum se diferențiază hazardul de risc și de ce vulnerabilitatea reprezintă elementul central în apariția dezastrelor?
2. De ce prevenirea și pregătirea sunt considerate mai eficiente și mai puțin costisitoare decât intervenția post-dezastru?
3. În ce mod schimbările climatice modifică profilul riscurilor naturale în Republica Moldova?
4. Care este rolul instituțiilor naționale (de ex. IGSU, SHS, autoritățile locale) în gestionarea integrată a riscurilor?
5. Cum contribuie educația, informarea și cultura siguranței la reducerea impactului dezastrelor asupra populației?
6. De ce este important ca reconstrucția post-dezastru să fie însoțită de măsuri de modernizare și adaptare, și nu doar de refacerea la starea inițială?

BIBLIOGRAFIE

Bălteanu, D., Cheval, S. & Şerban, M., fără an Evaluarea şi cartografierea hazardelor naturale şi tehnologice la nivel local şi naţional. Studii de caz. *Insitutul de Geografie al Academiei Române*, pp. 3-25.

Bejan, I. şi alţii, 2023. *Atlas. Factorii abiotici de mediu şi securitatea ecologică.* Chişinău: Institutul de Ecologie şi Geografie.

Benedek, J., 2004. Fenomenele de risc geografic din perspectiva amenajării teritoriului. *Riscuri şi catastrofe,* Volumul III, pp. 69-78.

Bobrowsky, P., 2013. *Encyclopedia of natural hazards.* New York: Springer.

Bogdan, O., 2007. *Hazarde meteo-climatice: geneză şi vulnerabilitate cu aplicaţii la România.* Sibiu: Editura Universităţii „Lucian Blaga".

Bojariu, R. & et.al., 2015. *Schimbările climatice : de la bazele fizice la riscuri şi adaptare.* Bucureşti: Printech.

Chiriac, D., Humă, C. & Bleahu, A., 2004. *Efectele socioeconomice ale secetei şi fenomenelor asocioate asupra comunităţilor umane din România,* Bucureşti: Academia Română.

Duca, M. şi alţii, 2023. *Cultura de floarea-soarelui în contextul schimbărilor climatice.* Chişinău: Universitatea de Stat din Moldova.

Dumitriu, D., 2021. Hazarduri vulcanice. În: *Riscuri geomorfologice.* Iaşi: Universitatea „Alexandru Ioan Cuza", Iaşi.

Dumitriu, D., 2021. Riscuri asociate deplasarilor în masa. În: *Riscuri Geomorfologice.* Iaşi: Universitatea „Al.I.Cuza", pp. 119-154.

Gerritsen, H., 2005. What Happened in 1953? The Big Flood in the Netherlands in. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Science,* pp. 1271-1291.

Grecu, F., 2009. *Hazarde şi riscuri naturale.* Bucureşti: Editura Universitară.

Hociung, C., 2013. *Riscuri şi hazarde naturale. Suport de curs.* Suceava: Editura Lidana.

Hyatt, N., 2004. *Guidelines for Process Hazards Analysis, Hazards Identification & Risk Analysis.* Ontario, Canada: Dyadem Press.

Hyndman, D. & Hyndman, D., 2017. *Natural Hazards and Disasters, Fifth Edition.* Boston, USA: Cengage Learning.

Keller, E. & DeVecchio, D., 2016. *Natural hazards : earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes. Fourth Edition.* University of California, Santa Barbara: Routledge.

Keller, E. & DeVecchio, D., 2016. *Natural hazards : earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes. Fourth Edition.* University of California, Santa Barbara: Routledge.

Keller, E., DeVecchio, D. & Clague, J., 2015. *Natural hazards: earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes. Third Canadian edition.* Toronto: Pearson Education.

Mac, I. & Petrea, D., 2003. Sisteme geografice la risc. *Riscuri şi catastrofe,* pp. 13-26.

Păltineanu, C., Lungu, M. & Mihăilescu, I. F., 2008. *Riscuri climatice şi hidrologice.* Bucureşti: Editura Universitară.

Puţuntică, A., 2008. *Fenomenele meteorologice de risc de pe teritoriul Republicii Moldova. Teză de doctor.* Chişinău: s.n.

Rusu, C., 2006. *Impactul riscurilor hidro-climatice şi pedo-geomorfologice asupra mediului în bazinul Bârladului.* Iaşi: Universitatea „Al.I.Cuza" Iaşi.

Shi, P. & Kasperson, R., 2015. *World atlas of natural disaster risk.* New York: Springer.

Singh, R. & Bartlett, D., 2018. *Natural hazards : earthquakes, volcanoes, and landslides.* Florida: Talor & Francis.

Sorocovschi, V., 2008. Gestiunea riscurilor şi catastrofelor. Un punct de vedere. *Riscuri şi Catastrofe,* VII(5), pp. 32-42.

Surdeanu, V., 2002. Gestionarea riscurilor - o necesitate a timpurilor noastre. *Riscuri şi Catastrofe,* Volumul I, pp. 37-42.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021. *PreventionWeb.* [Interactiv] Available at: https://www.preventionweb.net/

Watts, C., 2006. *Natural Disaster.* London: Dorling Kindersley Limited.

DOMENCO RODION

PROCESE ȘI FENOMENE NATURALE DE RISC

NOTE DE CURS

Aprobat spre tipar 30.12.2025	Formatul hârtiei 60x84 1/16.
Hârtie ofset. Tipar ofset	Tiraj 20 exemplare
Coli de tipar 15,6.	Comanda nr. 63.

Centrul Editorial-Poligrafic al USM,
str. A. Mateevici, 60, Chișinău, MD-2009
e-mail: editurausm@gmail.com