

Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași

Facultatea de Geografie și Geologie

Școala Doctorală de Geoștiințe



Metode și tehnici geospațiale de evaluare a fenomenelor de risc de excedent hidrologic și de dinamică geomorfologică – Aplicații în bazinul hidrografic Sitna

REZUMAT TEZĂ

Liviu-Marian ALBU

Coordonatori științifici: Prof. Dr. Gheorghe ROMANESCU / Conf. Univ. Dr. Ing. Habil. Lilian NIACȘU

Domeniu - Geografie

Iași, 2025

CUPRINS

ARGUMENT.....	5
INTRODUCERE.....	7
SCOPUL ȘI OBIECTIVELE LUCRĂRII	10
STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT	11
CAPITOLUL 1 – NOȚIUNI ȘI CONCEPTE TEORETICE ȘI METODOLOGICE UTILIZATE ÎN CADRUL STUDIULUI	13
1.1 Riscul natural. Noțiuni și concepte generale.....	13
1.1.1 Riscul hidrologic reprezentat de inundațiile generate de ruperile de baraj	14
1.1.2 Riscul geomorfologic reprezentat de alunecările de teren	15
1.2 Istoricul cercetărilor	15
1.3 Date și programe informatice utilizate.....	16
CAPITOLUL 2 - CADRUL NATURAL.....	17
2.1 Localizarea ariei de studiu	17
2.2 Aspecte geologice și geomorfologice	19
2.3 Aspecte climatice	Error! Bookmark not defined.
2.4 Caracteristici hidrologice	22
2.5 Considerații pedologice.....	Error! Bookmark not defined.
2.6 Modul de utilizare al terenului	Error! Bookmark not defined.
CAPITOLUL 3 – IMPLEMENTAREA UNUI MODEL DE CALCUL HIDRAULIC HEC-RAS PENTRU ANALIZA VULNERABILITĂȚII LA INUNDAȚII. SCENARIU DE MODELARE A RUPERII BARAJULUI CĂTĂMĂRĂȘTI	24
3.1 Introducere	24
3.2 Zona de studiu	24
3.3 Surse de date și metode utilizate	25
3.4 Rezultate și Discuții.....	26
3.5 Concluzii	30
CAPITOLUL 4 – APLICAREA UNUI MODEL AVANSAT DE CALCUL HIDRAULIC HEC-RAS PENTRU ANALIZA VULNERABILITĂȚII LA INUNDAȚII. SCENARIU DE MODELARE A RUPERII BARAJULUI DRĂCȘANI ÎN BAZA UNOR BREȘE CU DIMENSIUNI VARIABLE	31
4.1 Introducere	31
4.2 Zona de studiu	31
4.3 Surse de date și metode utilizate	32

4.3.1	Zona aleasă pentru elaborarea scenariilor de rupere de baraj	32
4.3.2	Achiziția datelor.....	33
4.3.2.1	Generarea Modelului Numeric al Terenului (MNT).....	Error! Bookmark not defined.
4.3.2.2	Datele hidrologice utilizate.....	33
4.3.2.3	Modelul hidraulic de rupere a barajului	34
4.4	Rezultate	35
4.5	Discuții	41
4.5.1	Discuții generale	41
4.5.2	Discuții privind fenomenul de „backwater”.....	Error! Bookmark not defined.
4.5.3	Aspecte temporale.....	43
4.5.4	Aspecte privind atenuarea inundațiilor	43
4.5.5	Validarea rezultatelor	43
4.6	Concluzii	45
CAPITOLUL 5 – UTILIZAREA TEHNICILOR GIS PENTRU CARTOGRAFIEREA		
SUSCEPTIBILITĂȚII LA ALUNECĂRI DE TEREN. APLICAREA METODOLOGIEI AHP		
(ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS) ÎN BAZINUL RÂULUI SITNA, BOTOȘANI,		
ROMÂNIA.....		
5.1	Introducere	46
5.2	Surse de date și metode utilizate	46
5.2.1	Determinarea factorilor	46
5.2.2	Estimarea ponderilor factorilor considerați.....	48
5.3	Rezultate și Discuții.....	49
5.3.1	Validarea rezultatelor	49
5.3.2	Harta susceptibilității la alunecări de teren	51
5.4	Concluzii	52
CAPITOLUL 6 – EVALUAREA SUSCEPTIBILITĂȚII LA ALUNECĂRI DE TEREN PRIN		
APLICAREA ALGORITMUL DE ÎNVĂȚARE AUTOMATĂ SVM (SUPPORT VECTOR		
MACHINE) ÎN BAZINUL HIDROGRAFIC SITNA, BOTOȘANI, ROMÂNIA		
6.1	Introducere	53
6.2	Metodologie și date utilizate.....	53
6.2.1	Inventarul alunecărilor de teren	54
6.2.2	Determinarea factorilor	54
6.2.3	Normalizarea factorilor	57

6.2.4	Secționarea setului de date (<i>dataset split</i>).....	57
6.2.5	Importanța factorilor în cadrul modelului SVM	58
6.2.6	Modelul de învățare automată SVM	59
6.2.7	Evaluarea acurateții modelului SVM	61
6.3	Rezultate și Discuții.....	62
6.3.1	Corelarea variabilelor de intrare.....	62
6.3.2	Modelarea susceptibilității la alunecări de teren	64
6.3.3	Evaluarea performanței modelului SVM	65
6.3.4	Discuții	67
6.4	Concluzii	68
	DISCUȚII FINALE	69
	CONCLUZII FINALE	75
	LISTĂ DE FIGURI.....	76
	LISTĂ DE TABELE.....	79
	BIBLIOGRAFIE.....	80

ARGUMENT

Primul lucru care poate fi remarcat la societatea umană în secolul XXI este acela că nu a fost niciodată în istorie mai mare sau mai mică decât este în prezent. Drept comparație, la sfârșitul secolului XVIII, lumea era mai mică din punct de vedere geografic, prin simplul fapt că până și cei mai educați și bine informați oameni din acele vremuri, precum faimosul om de știință Alexander von Humboldt (1769 – 1859), nu aveau cunoștințe decât despre anumite zone ale Globului. Așadar, se poate presupune că în acea epocă, lumea era mai mică prin prisma cunoașterii geografice puține și mai mare prin necunoașterea acesteia. La pol opus, în secolul XXI, lumea, s-ar putea spune, este mai mică prin prisma cunoașterii geografice amănunțite dar mai mare prin gradul de complexitate pe care îl presupune din punct de vedere geografic și prin prisma necunoscutelor pe care această complexitate le cuprinde, atât la nivel de ansamblu cât și la nivel funcțional.

Secolul XXI poate fi definit ca fiind unul complex din punct de vedere geografic și care este propulsat de motoarele vitezei și eficienței, ambele fiind sincronizate din ce în ce mai echilibrat odată cu debutul, la mijlocul secolului al XX-lea, a Erei Informaționale, în care ne aflăm în prezent. Dacă la începutul Revoluției Industriale, cărbunele era materia primă care alimenta progresul lumii de atunci, în Era Informațională, mai mult ca sigur se poate considera că materia primă este oferită de date (data). La fel ca alte domenii de cunoaștere, în epoca curentă, Geografia ca știință a beneficiat de o explozie de date, care poartă denumirea de date geospațiale (geospatial data) și care au generat o dezvoltare fără precedent a cunoașterii geografice – sau geospațiale – de la debut până în prezent, perioadă de timp ce ar putea fi negreșit considerată o adevărată Epocă de Aur a Geoștiințelor.

Această dezvoltare masivă poate fi observată practic în fiecare ramură a Geografiei, care inevitabil a generat relații din ce în ce mai strânse atât între ramurile componente cât și în relație cu alte domenii de cunoaștere, conducând într-un final la fenomenul de interdisciplinaritate și transdisciplinaritate în științele geografice.

Dacă acum trei secole, motorul cu abur era unul dintre simbolurile progresului societății umane, în prezent, din perspectiva geoștiințelor, se poate presupune că componenta informațională a Geografiei, denumită Sisteme Informaționale Geografice (GIS) ocupă un loc temeinic în

„bagajul” de cunoștințe al geografului, alături de hartă și busolă. Prin folosirea tehnologiilor GIS, geograful are acum capacitatea de a analiza spațiul geografic într-o manieră și la un nivel de detaliu și complexitate cum nu a putut vreodată, sporind astfel capacitatea sa de evaluare, diagnoză și mai ales, prognoză.

Riscurile naturale sunt bine cunoscute în contemporaneitate prin prisma dinamicii și efectului pe care îl au asupra societății umane și activităților aferente omului. Într-o lume complexă aflată în continuă dezvoltare, necesitatea evaluării impactului riscurilor naturale pentru a putea planifica pe termen mediu și lung este imperativă. Prin prisma fenomenelor hidrologice și geomorfologice, care reprezintă în fapt două dintre cele mai distructive fenomene atât din perspectiva impactului asupra vieților umane cât și din perspective socio-economice, evaluarea susceptibilității producerii unor riscuri asociate precum și bilanțurile aferente acestora devin tot mai necesare, atât pentru înțelegerea fenomenelor cât și pentru planificarea de scenarii de ameliorare a efectelor acestora, mai ales în contextul schimbărilor climatice cu care omenirea se confruntă în prezent.

Domeniul de studiu privind riscurile naturale din punct de vedere geografic este unul vast și caracterizat de dinamism, în funcție de zona de studiu dată. În lucrarea de față, analizele se vor axa pe abordarea potențialelor riscuri hidrologice și geomorfologice dintr-o zonă bine delimitată, folosind metodologii tehnice specifice subiectului ales, atât pentru cunoașterea cât și pentru lărgirea orizontului cunoașterii impactului fenomenelor cu caracteristici hidrologice și geomorfologice în zona de studiu aleasă.

INTRODUCERE

Dimensiunea magnitudinii unui hazard natural este dat de impactul pe care l-ar putea avea într-un anumit moment și spațiu. Cum societatea contemporană deține caracteristicile unui sistem complex deschis, șocurile generate de hazardurile naturale sunt direct proporționale cu impactul acestora, putând provoca pagube însemnate. În acest sens, cunoașterea și conștientizarea riscurilor generate sunt esențiale pentru sporirea rezilienței comunităților la dezastre (Nikolić, Benvenuti, & Chiozzi, 2023) și pentru minimizarea impactului economic al acestora, estimat de către Banca Mondială la 520 de miliarde de dolari anual, la nivel global (Banca Mondială, 2016).

În ceea ce privește fenomenele de risc geomorfologic, producerea lor se poate solda cu un impact semnificativ pentru comunitățile rurale și infrastructura construită pe versanții regiunilor deluroase și muntoase, mai ales în contextul extinderii intravilanelor în acele zone, crescând astfel nivelurile de hazard și risc (Hearn & Hart, 2011; Nadim et al. 2006).

Studiul alunecărilor de teren cuprinde o literatură științifică densă, mai ales pe tematica impactului asupra mediului antropic, ce include efectele asupra vieților și activităților umane, a infrastructurii, rețelelor de utilități și facilităților industriale, însă cu puține referințe privind modul de influențare a mediului natural (Schuster & Highland, 2007). Impactul asupra apelor curgătoare este dat prin curgerile de debrite (Butler, 2001), proces considerat un factor important în bugetele de sedimente ale bazinelor hidrografice (Benda, 1990) ce pot ulterior accentua ratele de colmatare a lacurilor de acumulare amenajate pe râul principal, prin curgeri noroioase sau avalanșe de debrite (Geertsema et al., 2006), prin procese de alunecare (Clague&Evans, 1994) etc. Alunecările de teren pot influența proprietățile solului prin expunerea materialului parental (orizontul C) prin erodarea orizontului organic (O) și A (Geertsema, Highland, & Vagueouis, 2009). Un alt efect important este cel al schimbării texturii solurilor, prin aport de material suplimentar sau îndepărtarea celui prezent (Schwab et al., 2004). De asemenea, alunecările de teren pot influența și chimia solurilor într-un sit dat (Zarin and Johnson, 1995; Hugget, 1998).

Eroziunea solurilor și degradarea terenurilor, în ansamblu, reprezintă o problemă care a căpătat o atenție din ce în ce mai sporită din partea cercetătorilor, atât la nivel național (Niacsu et al., 2022, 2021, 2019, 2012; Radoane & Vespremeanu-Stroe, 2016; Pravalie et al., 2017; Patriche et al., 2006) cât și internațional (Gashaw et al., 2018; Hu et al., 2015; Boardman, 2006). Pe

teritoriul României, aproximativ 43% din totalul suprafețelor agricole sunt situate pe versanți cu înclinare mai mare de 5%. Media înclinării versanților utilizați în agricultură din România este de aproximativ 9.2%, ceea ce înseamnă că aproximativ 35% din totalul de terenul arabil este poziționat pe versanți cu înclinare mai mare de 5% (Sevastel et al., 2010). În acord cu cele menționate mai sus, se poate presupune astfel că principala problemă agricolă în România privind zonele deluroase este dată de eroziunea solurilor.

Studiul riscurilor hidro-geomorfologice, mai ales în contextul schimbărilor climatice, a trecut printr-o serie de schimbări de paradigmă în ultimele două decenii, în special prin îmbrățișarea conceptelor de management al riscului la inundații (Flood Risk Management – FRM) și a guvernării riscului la inundații (Flood Risk Governance – FRG) (Dordi et al., 2022). Acest mod de abordare mai integrat al fenomenelor hidro-geomorfologice cu caracter extrem se datorează în principal pagubelor economice produse, în contextul nivelului de dezvoltare socio-economic contemporan precum și a impactului fenomenelor naturale asupra societății, inundațiile fiind răspunzătoare între anii 2005 – 2020 de pagube în valoare de 250 miliarde de dolari (Wang et al., 2022; Tariq et al., 2020).

Studiul ruperilor de baraj ca fenomen de risc hidrologic se realizează în contextul pericolului foarte ridicat ca aceste structuri să cedeze, demers ce oferă exemple concrete din care se pot extrapola soluții sau abordări pentru viitoare scenarii similare (ICOLD, 1973; Charles, Tedd, & Warren, 2011). Printre posibilele aspecte legate de subiectul siguranței barajelor (Adamo et al., 2021; Adamo et al., 2020), evaluarea riscului la inundații asociate cu un potențial de prăbușire parțială sau totală este relevant și strict necesar, în acord cu ghidurile tehnice naționale la nivel global (ICOLD European Club, 2018; FEMA, 2013a,b; European Council, 2007).

Râul Sitna este un afluent de dreapta al Jijiei, având un bazin de recepție cu o suprafață calculată în cadrul acestui studiu la 939.87 km². Din punct de vedere hidrologic, în baza consultării literaturii de specialitate (care, s-ar putea spune, este precară) privind această zonă precum și a datelor hidrologice disponibile, a reieșit că râul Sitna nu are un istoric semnificativ al manifestărilor hidrologice cu caracter extrem, acestea fiind atenuate de amenajările hidrotehnice din lungul cursului principal cât și de cele amplasate pe afluenți.

Din perspectivă geomorfologică, zona de studiu a fost de cele mai multe ori menționată în studii de anvergură, care au tratat bazine hidrografice (Jijia, Prut) sau regiuni (Câmpia Moldovei) cu referință la forme de relief componente, în cadrul cărora s-au înregistrat alunecări de teren și procese de eroziune a solurilor, fără să existe studii care să cuprindă strict bazinul Sitnei.

Progresele înregistrate în ultimele două decenii (cel puțin) în domeniul geoinformaticii, precum și la nivel metodologic în abordarea studiului riscurilor naturale, oferă posibilitatea dezvoltării unei priviri de ansamblu mult mai detaliată asupra a ce este și ce ar putea fi, la un moment dat, într-o zonă dată. Folosind Sistemele Informaționale Geografice precum și metodologii adaptate la aceste tehnologii, cum ar fi analizele multicriteriale ([Saati, 1988](#)), utilizarea inteligenței artificiale (Machine Learning) ([Cortes & Vapnik, 1995](#); [Huang & Zhao, 2018](#)) sau modelarea hidraulică computerizată ([Hydrologic Engineering Center, 2021](#)) zonele vulnerabile la hazarduri geomorfologice și hidrologice pot fi evidențiate și ulterior cartografiate pentru a le putea gestiona eficient și durabil.

Lucrarea de față va urmări astfel identificarea și aplicarea unor metodologii eficiente de evaluare a vulnerabilității la riscuri geomorfologice (în cazul de față cel al alunecărilor de teren) și hidrologice (ruperi de baraj) precum și utilizarea rezultatelor în evidențierea zonelor cu potențial de expunere la aceste hazarduri, din bazinul râului Sitna.

SCOPUL ȘI OBIECTIVELE LUCRĂRII

Principalul scop a lucrării de doctorat este reprezentat de utilizarea de seturi de date de rezoluție ridicată și metodologii noi și eficiente de analiză pentru evidențierea zonelor vulnerabile la riscuri hidro-geomorfologice din bazinul hidrografic Sitna.

În mod specific, scopul formulat cuprinde următoarele obiective:

- (1) identificarea și cartografierea zonelor vulnerabile la alunecări de teren, folosind metodologii computerizate ce iau în considerare o serie de variabile determinante
- (2) realizarea de hărți de hazard la inundații în acord cu rezultatele generate de simularea fenomenului de rupere de baraj, în scopul identificării rezultatelor de interes pentru autoritățile cu putere decizională, în cazul în care astfel de scenarii ar deveni iminente

Finalitatea obiectivelor specifice enunțate mai sus vor conduce la:

- (a) o cunoaștere în detaliu a zonei de studiu din perspectiva vulnerabilității la riscurile hidro-geomorfologice identificate și analizate
- (b) generarea de materiale cartografice pentru evidențierea ponderii și extinderii spațiale pe care acestea le pot avea
- (c) o mai bună înțelegere a interacțiunii dintre variabilele determinante și cum pot influența gradul de vulnerabilitate la hazard
- (d) identificarea unor metode eficiente de calcul și estimare a impactului pe care aceste hazarduri le-ar putea avea
- (e) oferirea de suport informațional autorităților locale și regionale pentru alcătuirea unei imagini de ansamblu a zonei de studiu privind atât potențialul cât și susceptibilitatea la a fi afectată de fenomene de risc hidrologic și geomorfologic, în contextul dezvoltării durabile, a informării publicului sau pentru a fi folosite ca punct de reper în viitoare studii mai amănunțite, folosind date mai recente, mai precise și/sau modele de calcul mai performante

STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT

Lucrarea de doctorat a fost structurată în 6 capitole, ce descriu atât cadrul geografic cât și metodologiile de calcul geospațial aplicate. Capitolele sunt după cum urmează:

Capitolul 1 oferă o introducere în noțiunile ce definesc conceptele de hazard, vulnerabilitate și risc, cu referire la riscurile hidro-geomorfologice de tipul inundațiilor, cauzate de ruperile de baraj și de alunecări de teren.

Capitolul 2 structurează într-o serie de sub-capitole, cadrul geografic al zonei de studiu, dată de bazinul hidrografic al râului Sitna, însumând o serie de variabile de interes, atât pentru analizele aplicate cât și pentru trecerea în revistă a unor aspecte relevante privind arealul studiat și fenomenele de risc abordate.

Capitolul 3 este primul studiu de caz elaborat și detaliază scenariul creării unei breșe de aproximativ 30% din volumul barajului Acumulării Cătămărăști, poziționat în amonte de Municipiul Botoșani precum și impactul generat de producerea unei inundații în urma ruperii barajului Cătămărăști, evidențiat prin clasele de utilizare a terenului afectate de stratul de apă rezultat, a construcțiilor afectate precum și de grosimea/adâncimea acestuia.

Capitolul 4 reprezintă al doilea studiu de caz, care, în mod esențial, este concretizat prin dezvoltarea metodologiei de modelare hidraulică a ruperilor de baraj aplicată în cazul Acumulării Cătămărăști. În acest sens, modelul de calcul dezvoltat în acest capitol a fost gândit într-o formulă mult mai analitică și tehnică, pentru a putea surprinde nu doar ruperea de baraj ci și modul în care riscul hidrologic este influențat de diverși parametri, precum dimensiunea breșei. Metodologia dezvoltată a fost aplicată pe volumul de apă cuprins de Lacul Drăcșani și presupune modelarea hidraulică a debitelor generate de ruperea progresivă a barajului Sulița (prin generarea de breșe de 1%, 5%, 10%, 20% ... 100% din volumul barajului), și cuantificarea unor variabile precum numărul de construcții afectate de inundațiile generate, suprafața totală inundată, timpul de propagare al inundației, timpul de evacuare al lacului, etc.

Capitolul 5 este primul din cele 2 studii de caz ce abordează riscurile geomorfologice din zona de studiu considerate relevante pentru a fi analizate și se concretizează prin alcătuirea unei

metodologii AHP (Analytical Hierarchy Process) pentru evidențierea zonelor expuse la a fi afectate de acțiunea alunecărilor de teren.

Capitolul 6 și totodată ultimul studiu de caz dezvoltat și aplicat în cadrul lucrării de față reprezintă o analiză a susceptibilității la alunecări de teren folosind algoritmi de actualitate din domeniul învățării automate (Machine Learning). Metodologia constă dintr-o serie de etape specifice acestui tip de direcție și presupune crearea unei baze de date cu variabilele necesare, validarea ponderii factorilor relevanți în analiză, segregarea datelor pentru testare și antrenare model de calcul, antrenarea modelului propriu-zis și în final, calculul distribuției spațiale a valorilor de susceptibilitate în zona de studiu. Validarea rezultatelor a fost realizată printr-o serie de indici statistici calculați atât pe baza datelor de intrare, a rezultatelor generate cât și în baza alunecărilor de teren identificate în zona de studiu. Finalitatea a constat în cartografierea stratului rezultat și implicit reprezentarea spațială a susceptibilității fenomenului analizat.

CAPITOLUL 1 – NOȚIUNI ȘI CONCEPTE TEORETICE ȘI METODOLOGICE UTILIZATE ÎN CADRUL STUDIULUI

Analiza hazardurilor naturale reprezintă un efort complex de determinare și evaluare a capacității naturii de a influența societatea omenească, prin variabilitatea, dinamica și impactul acestora asupra activităților umane. Întrucât riscurile naturale sunt diverse prin tipologia de care aparțin precum și prin modul de manifestare, analiza acestora a necesitat încă de la începuturi, un bagaj consistent de cunoștințe pentru a se încerca elaborarea unor direcții de abordare pentru a înțelege modurile de desfășurare a acestora, având ca rezultat posibilitatea realizării de previziuni în legătură cu începutul, sfârșitul și cel mai important, impactul unui fenomen natural la un moment dat și într-un spațiu dat.

În prezent, studiul fenomenelor naturale extreme precum și a riscurilor pe care acestea le provoacă sau le pot provoca beneficiază de o abordare interdisciplinară și transdisciplinară, cercetători din toate domeniile studiind amănunțit impactul pe care aceste fenomene îl pot determina, precum și evaluarea potențialelor pagube pe care acestea le-ar putea genera. În mod evident, nu există politici consistente sau definitive de prevenire a acestor riscuri, din cauza dificultății cuantificării și modelării acestor fenomene și rezultatele lor, însă demersurile științifice, tehnice, politice, sociale și economice urmează o direcție care în mod automat, iau în considerare existența acestor fenomene extreme precum și probabilitatea și magnitudinea pe care acestea le-ar putea înregistra, urmate de propuneri de soluții pe termen scurt și mediu cel puțin (Shah et al., 2020; EMBC, 2020).

1.1 Riscul natural. Noțiuni și concepte generale

Noțiunea de *risc* reprezintă un concept abstract și complex, care este de fapt rezultatul prezenței unui fenomen natural extrem într-o dimensiune spațială și temporală. Deoarece în primă instanță riscul include un fenomen, nu se poate vorbi despre acest concept în mod izolat ci trebuie privit ca un tot unitar care este format din componente.

Prin urmare, riscul își are punctul de pornire din conceptul de *hazard*, care este definit ca fiind *un fenomen, proces, situație sau activitate care are potențialul de a fi vătămător populației afectate și distrugător societății și mediului, fiind definit de locația acestuia, de magnitudine, geometrie, frecvență și probabilitatea de a se petrece* (Bobrowsky, 2013).

Prezența unui anumit tip de hazard și a unui element care poate fi vătămat de efectele acestuia implică existența unui anumit grad de *vulnerabilitate*, termen care este un concept cheie în cercetările privind hazardurile naturale, fiind definit ca *potențialul unui sistem fizic de a fi afectat sau a suferi pierderi* (Bobrowsky, 2013).

Urmând o formulare matematică, prin însumarea conceptelor de *hazard* și *vulnerabilitate*, rezultă astfel conceptul de *risc* (Figura 1), acesta din urmă fiind definit în mod diferit de către disciplinele variate care îl abordează sau consideră, în funcție de obiectul de studiu și implicările aferente.

Un alt concept des întâlnit în literatura științifică este cel de *susceptibilitate*, care în esență presupune situația unui element din spațiu de a fi susceptibil la un alt element sau fenomen din spațiul înconjurător. În termeni ce vizează domeniul hazardurilor naturale, susceptibilitatea se referă la tendința unei zone sau regiuni date de a fi afectată de impactul unor procese de hazard, cum ar fi inundațiile, cutremure, alunecări de teren, procese de subsidență etc (Domínguez-Cuesta, 2013).

În ce privește domeniul de studiu al hazardurilor naturale, conceptul de risc este definit cel mai comun ca reprezentând interacțiunea dintre un *hazard*, care poate fi o inundație, o alunecare de teren, o furtună puternică și *vulnerabilitatea* unui element, grup de elemente sau sistem care este expus aceluiași hazard (UNDRO, 1980; Cardona, 1990; UN/ISDR, 2004, 2009; Birkmann, 2006, citați de Bobrowsky, 2013).

Din multitudinea de definiții care au fost propuse pentru conceptul de *risc*, se poate extrapola faptul că riscul natural reprezintă probabilitatea ca un spațiu dat în care se află o așezare umană sau un loc în care omul își desfășoară activitățile să fie afectată de un fenomen natural extrem, care să impactiveze negativ elementele aceluiași spațiu, influențând în această manieră echilibrul societății umane și activităților sale din acel spațiu.

1.1.1 Riscul hidrologic reprezentat de inundațiile generate de ruperile de baraj

Din punct de vedere hidrologic, inundația poate fi definită ca o creștere anormală a nivelului unui râu, lac sau în lungul unei zone costiere, care rezultă ulterior în acoperirea cu apă a zonelor învecinate și care întrerupe activitățile desfășurate în acele zone (Ward, 1978).

Spre deosebire de inundațiile generate de viituri sau creșterea nivelului apei în zonele de coastă, inundațiile provocate de ruperile de baraj diferă prin cauze, viteză de propagare a undei de viitură, intensitate, dimensiunea hazardului și managementul riscului presupus. Potrivit studiilor efectuate de [Romanescu \(2013\)](#), o inundație generată de ruperea unui baraj reprezintă un risc hidrologic aparte datorat desfășurării rapide și cu potențial catastrofal pentru zonele din aval.

1.1.2 Riscul geomorfologic reprezentat de alunecările de teren

Alunecările de teren sunt printre cele mai semnificative fenomene de hazard geomorfologic, cu impact atât în mediul natural cât și cel antropic. Acestea au loc atunci când un volum de pământ sau rocă se deplasează pe un plan înclinat în urma acționării gravitației terestre și a cărei mișcare de obicei este declanșată de factori precum precipitații, cutremure sau activități umane ([Sidle et al., 2006](#)).

Riscul la alunecări de teren implică în general o combinație de variabile participante și potențialele consecințe pe care un asemenea eveniment le-ar putea genera ([Fuchs et al., 2007](#)). Evaluarea riscului reprezentat ține cont atât de susceptibilitatea unei zone date la alunecări de teren cât și de expunerea locuitorilor, proprietăților și infrastructurii critice la acest tip de hazard ([Schneider et al., 2020](#)). Variabilele care influențează dezvoltarea alunecărilor de teren includ topografia, utilizarea terenurilor și condițiile climatice ([Davis et al., 2015](#)).

1.2 Istoricul cercetărilor

În ceea ce privește aria bazinului hidrografic al râului Sitna, majoritatea studiilor au avut un caracter general, acestea vizând mai ales zone geografice sau unități hidrografice care au prezentat un interes mai ridicat pentru cercetători, un exemplu fiind bazinul hidrografic al râului Jijia (din care Sitna face parte) precum și unități majore de relief, cum sunt Câmpia Moldovei și Podișul Moldovei. În acest sens, din cauza apartenenței zonei de studiu la Câmpia Moldovei, fără a se remarca prin anumite particularități specifice la nivel geografic, studii delimitative privind bazinul hidrografic al Sitnei sunt aproape absente.

Perspectiva evaluării riscurilor hidrologice și geomorfologice în literatura științifică publicată la nivel internațional este foarte densă, numărul rezultatelor fiind impresionant, acest fapt datorându-se și avansului tehnologiei și metodologiilor aplicate în geostiințe în general și în analiza

riscurilor naturale în special. În această situație, în analiza riscurilor hidrologice se remarcă o serie de lucrări importante precum cele publicate de către Carrara et al. (1991), Guzzetti et al. (1999), Fell et al. (2008), Guzzetti et al. (2012), Kundzewicz et al. (2014), în cazul riscurilor geomorfologice, cu precădere riscurile la alunecări de teren, remarcându-se Fraccarollo&Toro (1995), Sanders (2007) și Donat et al. (2016) și la eroziunea solurilor (Wischmeier & Smith, 1978; Morgan, 2009; Borrelli et al., 2017).

1.3 Date și programe informatice utilizate

Baza de date utilizată în generarea straturilor care au servit ulterior ca sprijin în realizarea materialelor cartografice a derivat în primul rând din modelul numeric al terenului în format GRID (raster). Datele reprezintă esență un model numeric derivat din date LiDAR și care are o rezoluție ridicată (1x1 metri), fapt care a permis ulterior generarea unor derivate rasteriale de mare fidelitate comparativ cu realitatea topografică din teren și care au servit aplicațiilor metodologice dezvoltate și utilizate în cadrul acestui studiu. Setul de date LiDAR utilizat a fost pus la dispoziție de către Administrația Bazinală de Apă Prut – Bârlad.

Date vectoriale precum rețeaua hidrografică, cumpăna de ape a râului Sitna și corpurile de apă au fost generate în baza modelului numeric al terenului și a funcțiilor dedicate din componența programului ArcMap, etc.

CAPITOLUL 2 - CADRUL NATURAL

2.1 Localizarea ariei de studiu

Bazinul hidrografic al râului Sitna este localizat în partea nord-estică a României (Figura 6). Este situat în sectorul mijlociu al bazinului Jijiei și este un afluent de dreapta al Jijiei, care la rândul ei este afluent de dreapta al râului Prut. Bazinul hidrografic are o extindere de 939.87 km², suprafață ce a fost calculată folosind un model numeric al terenului de înaltă rezoluție derivat din date LiDAR.

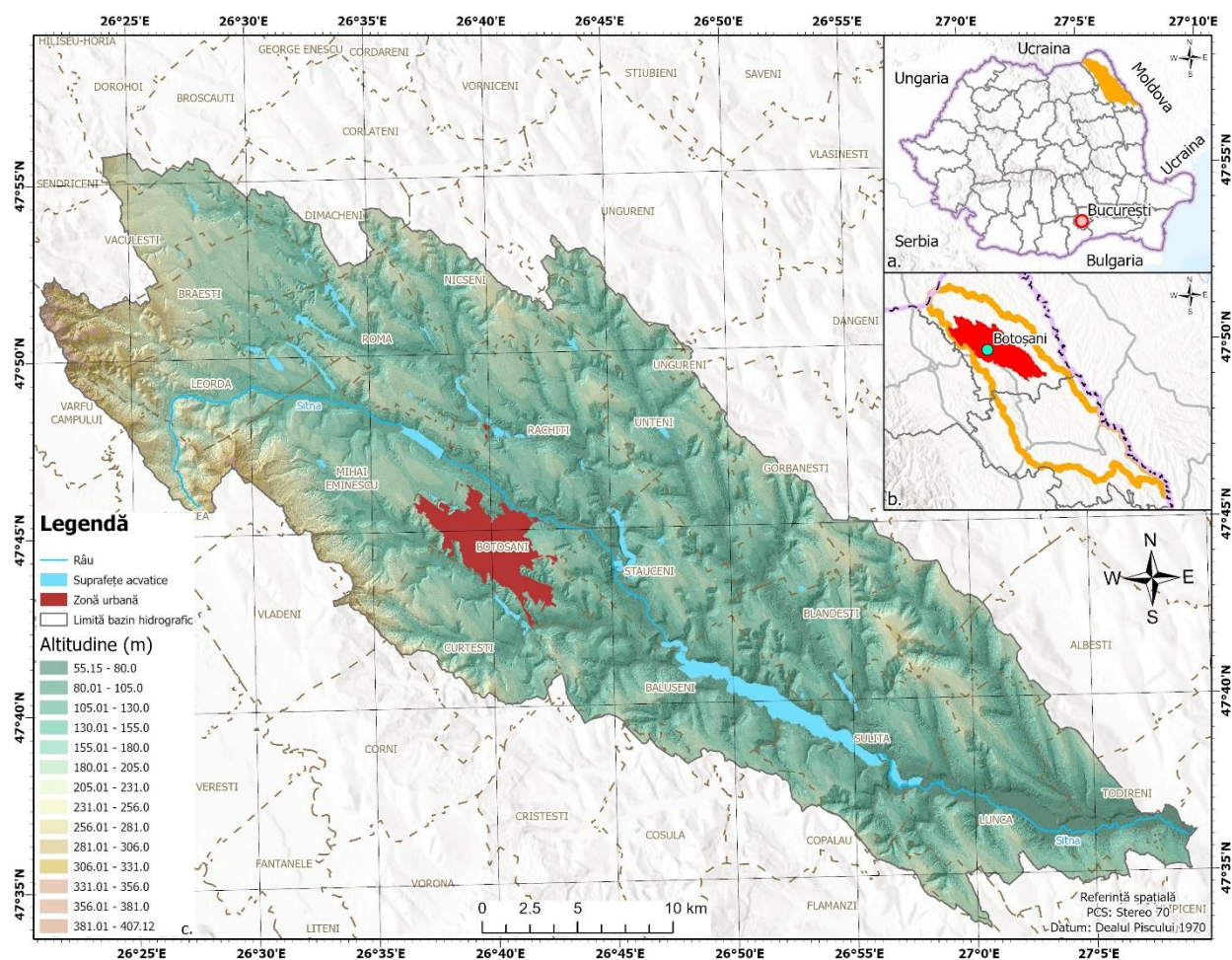


Figura 1 - Localizarea geografică a bazinului hidrografic Sitna (a – localizarea bazinului râului Jijia în cadrul României; b – încadrarea bazinului râului Sitna în bazinul Jijiei; c – privire generală asupra bazinului râului Sitna)

Perimetrul bazinului hidrografic al Sitei (lungimea cumpenei de ape) are o valoare de 348.81 km lungime. În ceea ce privește poziționarea bazinului (Figura 7), în partea nordică, interfluviul ce trasează cumpăna de ape delimitează sectorul superior al râului Sitna de bazinul

Jijiei. Linia perimetrului vestic delimitează bazinul Sitnei de Dealurile Hăpăi și Colinele Bucecea-Vorona, în vecinătatea cărora se desfășoară spre aval culoarul Siretului. În partea sud-vestică și sudică, formele de relief delimitate sunt date de Depresiunea Botoșanilor, Dealurile Copălău și Colinele Miletinului, pe unde valea râului Miletin a fost sculptată de-a lungul timpului de râul cu același nume. În partea nord-estică și de est, bazinul Sitnei se învecinează cu Culmea Vulturului și Dealurile Cozancea, fiind cuprinse și drenate de râul Jijia prin intermediul văii cu același nume.

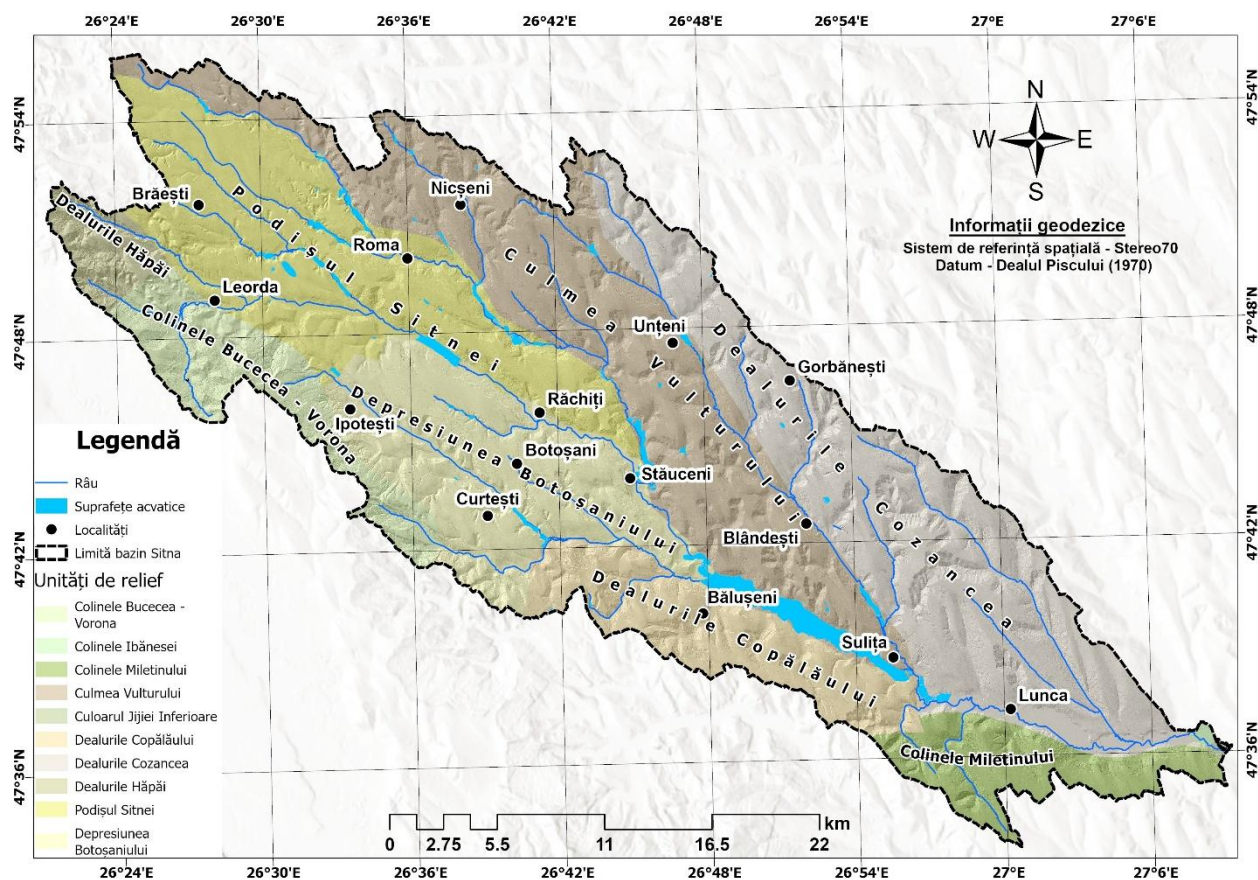


Figura 2 - Unitățile de relief cuprinse în suprafața bazinului hidrografic Sitna (prelucrare după Grigore Posea și Lucian Badea, 1984)

Punctul de izvor al râului Sitna este localizat în estul Podișului Sucevei, mai exact în Dealul Brăești, la altitudinea de 261 m, cu vărsare în râul Jijia, în dreptul localității Hlipiceni, la altitudinea de 56 m. Pe linia de scurgere a râului de la izvor la punctul de confluență, Sitna urmează o direcție nord-vest sud-est, pe o lungime de 95 km (Pantazică, 1974). Plecând de la această referință, s-a încercat validarea informației, în primă fază folosind hărțile topografice 1:25000 ce acoperă zona de studiu, iar lungimea estimată prin digitizarea râului Sitna a fost de 78 km.

Pentru o precizie mai ridicată, lungimea râului Sitna a fost determinată ulterior pe baza generării automate a rețelei hidrografice folosind un model numeric al terenului derivat din date LiDAR cu rezoluția de 1x1 metri, iar astfel a rezultat că râul principal parcurge de la izvor la vărsare în Jijia o distanță de aproximativ 78.2 km. În cadrul acestui studiu, s-a considerat că aceasta din urmă este cea mai precisă lungime calculată și implicit cea corectă.

Bazinul hidrografic se înscrie în tipul de orientare generală pe direcția NV-SE și prezintă o suprafață mai lată în sectorul central, urmând apoi să se îngusteze în sectorul inferior, dezvoltând totodată o lățime mai pronunțată a albiei majore.

2.2 Aspecte geologice și geomorfologice

Descrieri geologice privind bazinul hidrografic al râului Sitna se înscriu în studiile geologice efectuate în cadrul Podișului Moldovei, împărtășind particularități similare. În acest sens, apariția ca uscat a Podișului Moldovei a debutat odată cu exondarea din mio-pliocen, care s-a făcut de la nord la sud, în același timp, cursurile vechi ale râurilor ce izvorăsc din Carpații Orientali (Suceava, Moldova, Ozana, Cracău, Bistrița etc) începeau să-și croiască văile pe direcția sud-est, în timp ce de la nord avansau către sud râurile Siret și Prut. Văile celorlalte râuri au ajuns să se formeze ulterior, prin transformări care explică actuala configurație a bazinelor hidrografice ce modelează Podișul Moldovei în prezent ([Ionesi, 1994](#); [Băcăuanu, 1968](#)).

Potrivit informațiilor extrase din Harta Geologică a României, scara 1:200 000, structurile geologice din bazinul hidrografic al râului Sitna sunt formate predominant din depozite de marne argiloase cu intercalații de nisipuri de vârstă Volhiniană în cea mai mare parte a bazinului și de vârstă Bessarabiană în sectorul inferior al bazinului ([Figura 10](#)).

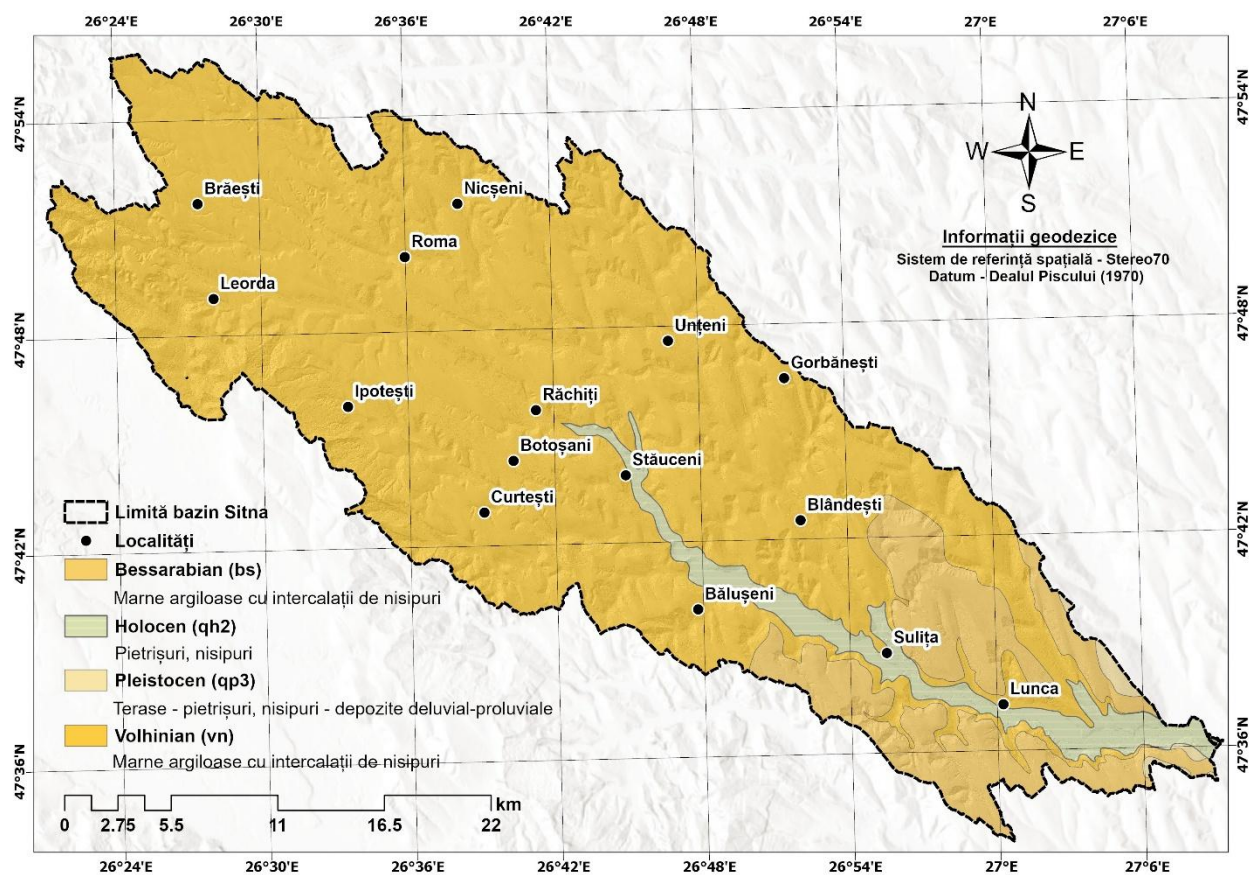


Figura 3 - Harta geologică a bazinului hidrografic Sitna (după Comitetul de Stat al Geologiei, 1968, harta 1:200 000)

Evoluția geomorfologică a reliefului bazinului hidrografic al râului Sitna se află în strânsă legătură cu depozitele geologice prezente în arealul de studiu, impunându-se prin particularități întâlnite în zona Podișului Moldovei. La nivelul văilor, se remarcă distribuția văilor structurale de tip consecvent, subsecvent și obsecvent, cu o pondere ridicată a văilor consecvente în bazinul hidrografic al râului Sitna, dominând ca lungime a rețelei hidrografice (Posea, 2005).

Conform datelor derivate din MNT (Figura 11) se remarcă o prezență generală (55.81% din suprafața bazinului) a valorilor sub 8.75% ($<5^0$) ale pantelor mai ales în zonele de luncă și au, la nivelul zonei de studiu, o prezență mai ridicată în sectorul superior și central al bazinului și mai puțin în sectorul inferior. Din cauza acțiunii eroziunii areolare și liniare, fragmentarea reliefului este ridicată, evidențiată și prin densitatea rețelei de văi la nivel de bazin, fapt care explică și prezența unor valori ridicate (peste 8.75%) ale pantelor în restul bazinului hidrografic. Dintre acestea, suprafețele cele mai mari care înregistrează valori ridicate ale pantelor sunt distribuite în

partea stângă a râului, cele mai ridicate valori fiind distribuite în partea dreaptă datorită reliefului deluros și cu altitudini mai ridicate.

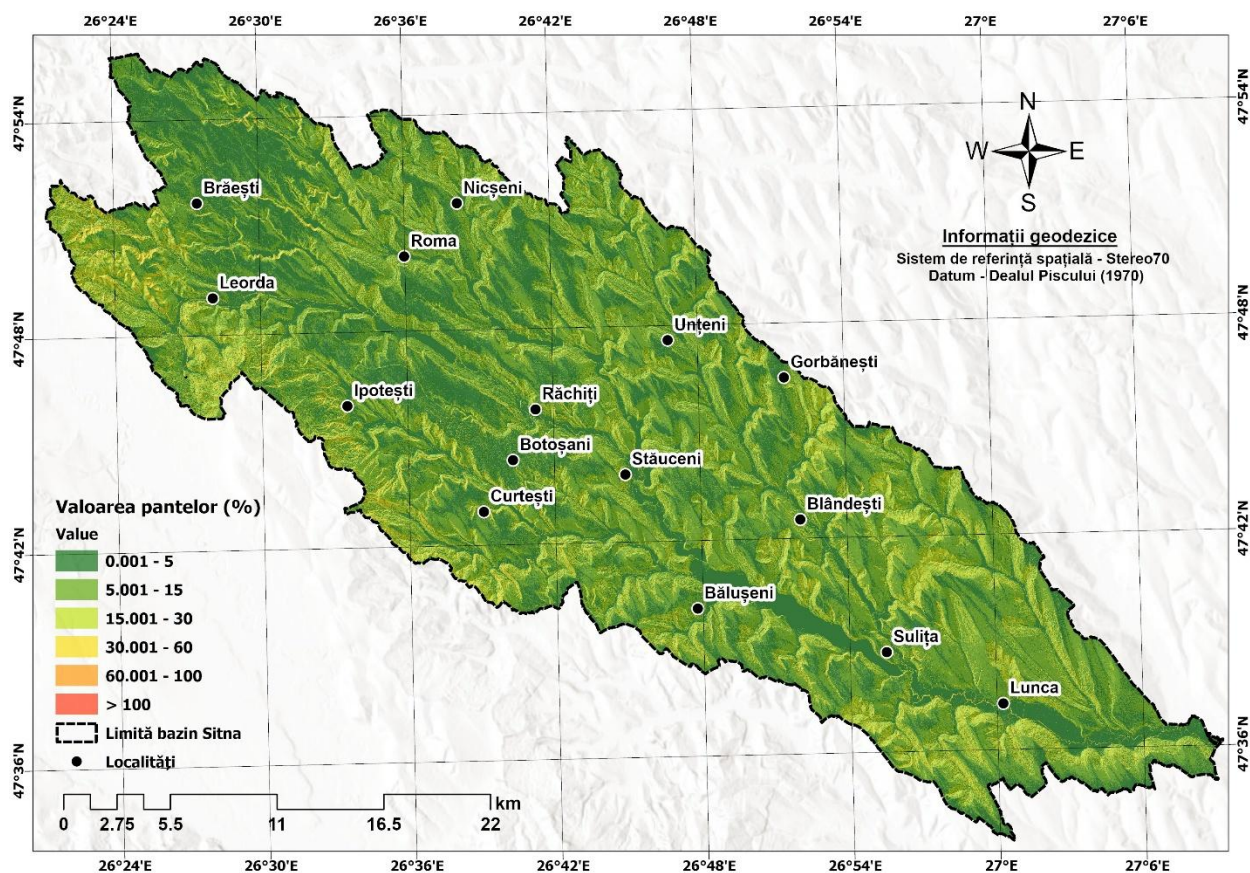


Figura 4 - Harta valorilor și distribuției pantelor în cadrul bazinului hidrografic al râului Sitna

2.3 Caracteristici hidrologice

Râul Sitna izvorăște în apropiere de Șaua Bucecea – Mândrești (Dealul Brăești) de la altitudinea de 261 m (Ujvari, 1972). Acesta prezintă un debit mediu multianual de 2.3 m³/s, înregistrat la stația hidrometrică Todireni, conform calculelor bazate pe un șir de date hidrometrice ce se întind pe o perioadă cuprinsă între 1950 – 2017, pus la dispoziție de către Administrația Bazinală de Apă Prut – Bârlad.

Tabelul 1. Debitele medii lunare multianuale (1950 - 2017) pentru bazinul hidrografic al râului Sitna (m³/s)

Stația hidrometrică	IAN	FEB	MAR	APR	MAI	IUN	IUL	AUG	SEPT	OCT	NOV	DEC	MEDIA
Todireni	1.5	2.6	4.5	4.0	2.2	2.5	2.5	1.6	1.7	1.9	1.3	1.4	2.3
Drăcșani	1.2	1.9	3.1	2.9	1.8	1.9	2.0	1.4	1.5	1.7	1.2	1.1	1.8

Pe râul Sitna există un număr de 3 stații hidrometrice și anume Todireni (la vărsarea în Sitna), la Drăcșani la confluența pârâului Burla cu Sitna și la Cătămărăști. Cele mai mari debite se înregistrează la stația Todireni, după cum este și normal, fiind localizată la confluență. Celelalte stații hidrometrice înregistrează debite mai mici, din cauza poziției lor mai în amonte (Tabelul 1).

Râul Sitna își adună apele de pe o suprafață de 939.87 km², forma acestuia fiind alungită. În proporție de 57%, Sitna se alimentează de pe partea stângă a bazinului său, prin aportul a dus de principalii afluenți ca lungime și suprafață de alimentare și anume Cotârgaci, Burla și Cozanca, pe partea dreaptă aportul principal fiind adus de către Dolina, care aduce ape din Podișul Suceava și Dresleuca (Schram & Pantazică, 1963). Câteva informații relevante despre hidrografia bazinului Sitna sunt date de coeficienții morfometrici calculați pe baza modelului numeric al terenului, în Tabelul 2.

Tabelul 2. Parametri morfometrici pentru bazinul râului Sitna

Gradientul	Densitatea de drenaj	Coeficientul de formă	Coeficientul de circularitate	Coeficientul de elongație
5.28	1.31	0.21	0.14	0.52

Din punct de vedere hidrologic, o valoare scăzută a coeficientului de circularitate corespunde cu un bazin hidrografic în care scurgerea precipitațiilor s-ar realiza nesincronizat, oferind astfel un grad de protecție împotriva inundațiilor prin comparație cu un bazin cu un coeficient mai ridicat. Consecințe hidrologice implică de asemenea și coeficientul de elongație, care este invers proporțional cu riscul la inundații într-un bazin hidrografic dat.

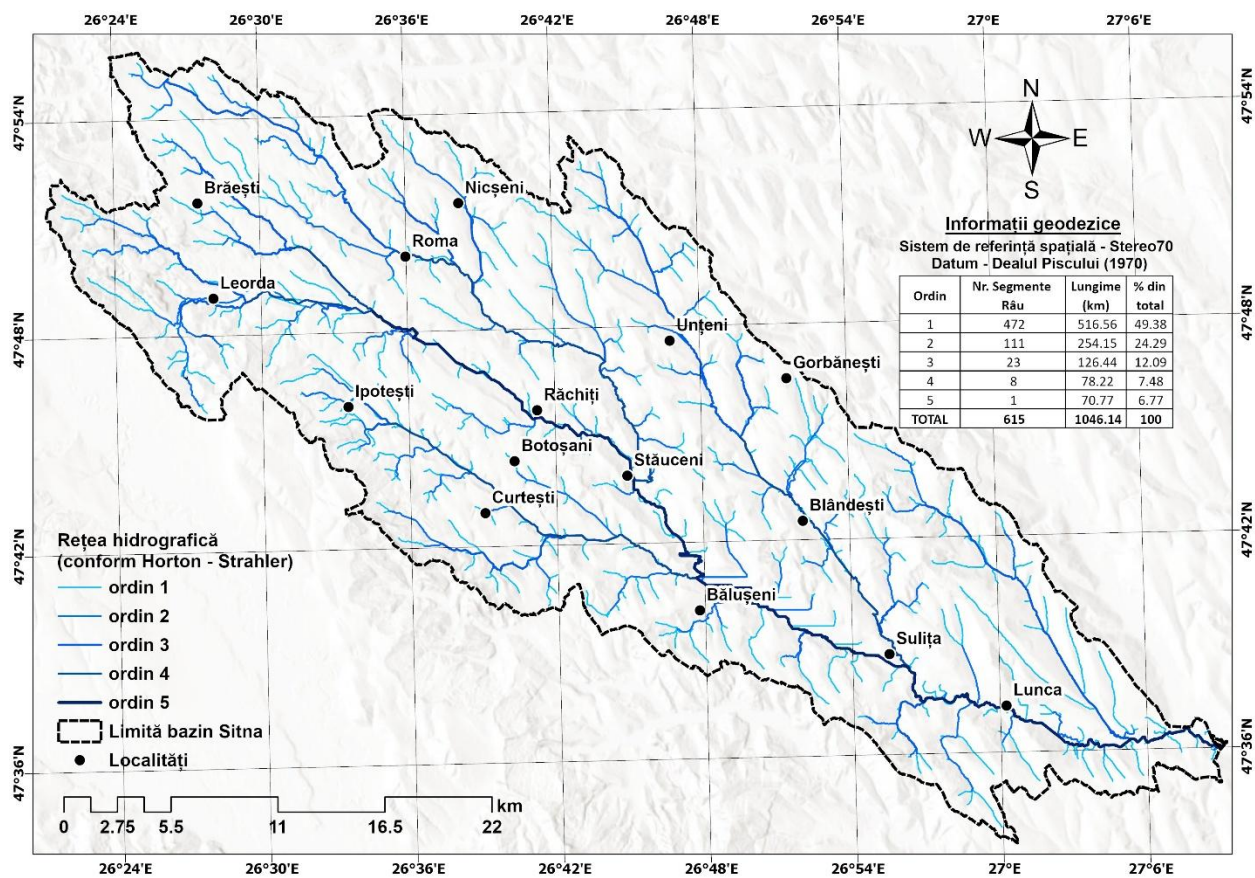


Figura 5 - Rețeaua hidrografică a râului Sitna, ierarhizată conform Horton-Strahler

CAPITOLUL 3 – IMPLEMENTAREA UNUI MODEL DE CALCUL HIDRAULIC HEC-RAS PENTRU ANALIZA VULNERABILITĂȚII LA INUNDAȚII. SCENARIU DE MODELARE A RUPERII BARAJULUI CĂTĂMĂRĂȘTI

3.1 Introducere

Luând în considerare faptul că inundațiile generate de ruperile de baraj reprezintă o realitate și că efectele acestora pot fi dezastruoase, generarea unor materiale cartografice sau elaborarea unor estimări bazate pe scenarii ipotetice ale acestor riscuri ar putea fi foarte utile în evaluarea zonelor potențial vulnerabile. Asemenea informații ar putea fi considerate foarte utile pentru autoritățile locale, în scopul adoptării unor măsuri de precauție, reglementări sau politici care să îmbunătățească modul de așezare al construcțiilor sau procesul de extindere urbană și pentru a putea atenua potențialele efecte ale inundațiilor rezultate în cazul producerii unor astfel de fenomene.

Urmând această direcție, analiza prezentă abordează studiul ipotetic al ruperii barajului Cătămărăști, un baraj din pământ de dimensiuni mari, amplasat pe râul Sitna, în amonte de Municipiul Botoșani. Pentru cartografierea rezultatelor și a zonelor potențial vulnerabile, analiza a fost elaborată sub forma unei modelări hidraulice bidimensionale (2D), folosind aplicația de calcule hidraulice HEC-RAS și aplicația ArcMap.

3.2 Zona de studiu

Zona de aplicare a metodologiei de studiu este dată de sectorul din aval de Acumularea Cătămărăști, pe o distanță de aproximativ 14.5 km. Acumularea este parte a bazinului hidrografic al râului Sitna, afluent de dreapta a râului Jijia, fiind localizat în zona de Nord-Est a României, ocupând suprafețe din regiunea centrală și sudică a județului Botoșani. Bazinul hidrografic Sitna ocupă o suprafață de 943 km², are o lungime de 78 km iar confluența cu râul Jijia se realizează în apropierea comunei Hlipiceni ([Figura 26](#)).

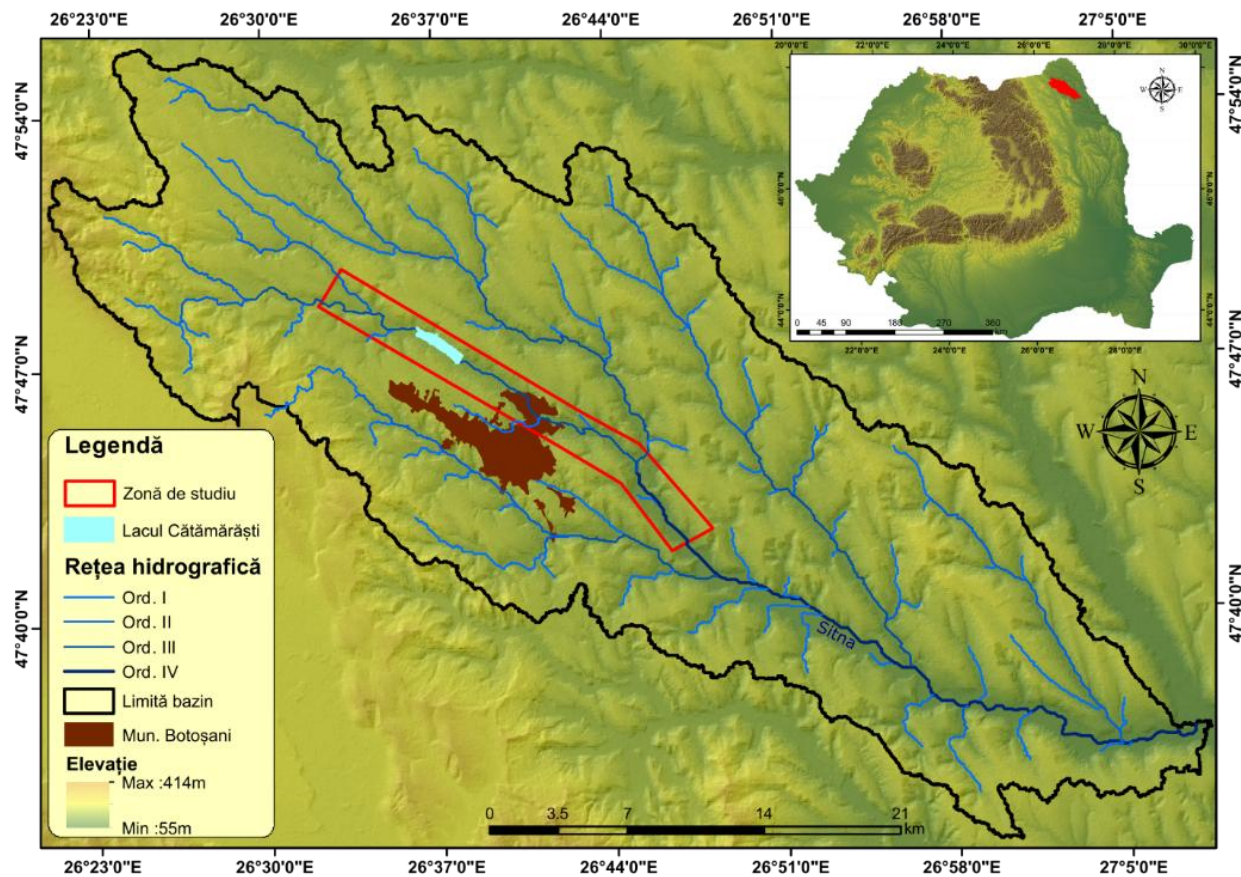


Figura 6 - Localizarea geografică a bazinului hidrografic și a zonei de studiu în cadrul văii râului Sitna

3.3 Surse de date și metode utilizate

Pentru rezultate de calitate superioară, cel mai potrivit model care a putut fi utilizat a fost dat de un MNT derivat din date LiDAR, cu o rezoluție spațială de 1x1 metri/pixel. Metodologia aplicată poate fi consultată în [Figura 28](#).

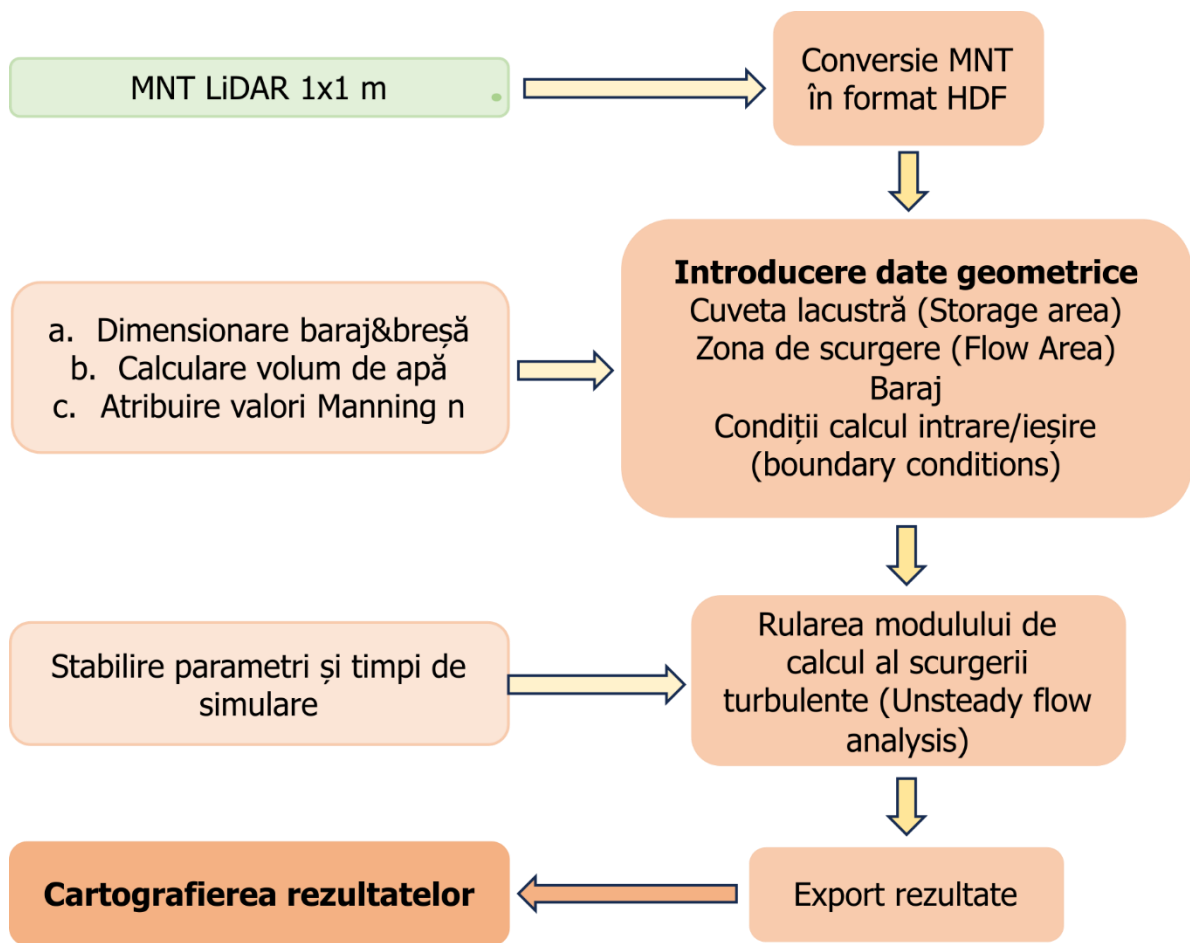


Figura 7 - Schema metodologică a pașilor de lucru aplicată pentru simularea ruperii de baraj folosind HEC-RAS

Pentru această analiză, datorită gradului scăzut de rugozitate a terenului în zona de studiu, dimensiunea celulei din rețea a fost setată la 20 m/px. Datele de intrare pentru *Storage Area* corespund cu volumul maxim de apă pe care lacul îl poate reține, adică 12.4 milioane m³.

3.4 Rezultate și Discuții

Rezultatele generate au fost reprezentate cartografic folosind aplicația ArcMap. Primul produs trece în revistă dimensiunea rezultatului simulat precum și adâncimea stratului de apă, extinderea inundației și așezările afectate (Figura 31). După cum poate fi observat, localitățile afectate sunt date de sectorul periferiei nordice a Municipiului Botoșani, Stăuceni, Răchiți și Roșiori, în proporții diferite, potrivit suprafețelor și distanțelor la care sunt poziționate în teritoriu față de râul Sitna.

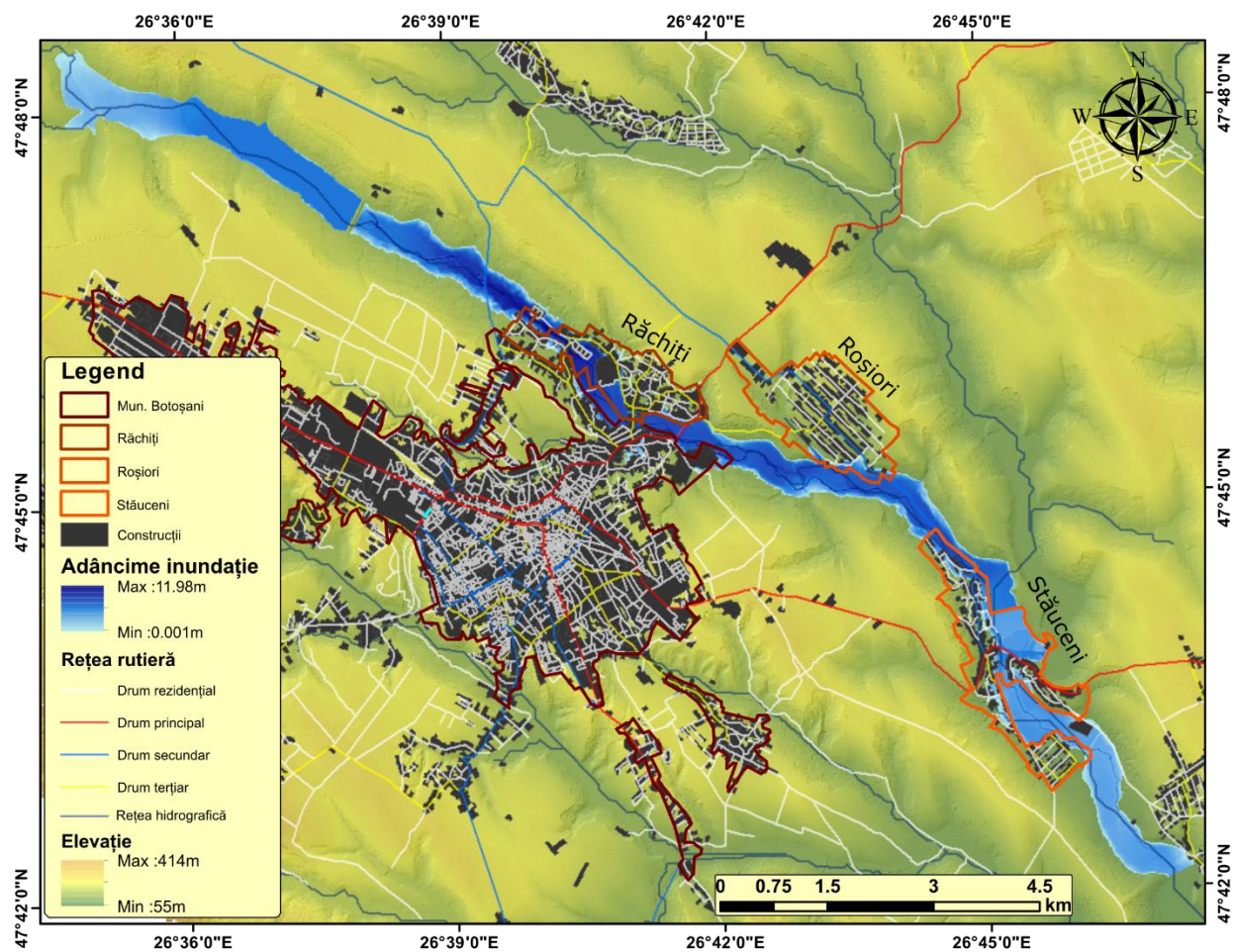


Figura 8 - Privire de ansamblu asupra inundației rezultate în urma simulării ruperii barajului Cătmărăști

Din cauza faptului că majoritatea construcțiilor vulnerabile sunt poziționate în zonele administrative ale Municipiului Botoșani și a comunei Răchiți, analiza s-a concentrat în această zonă. În cadrul [Figurii 32](#) se poate observa extinderea suprafeței de apă simulată precum și construcțiile afectate.

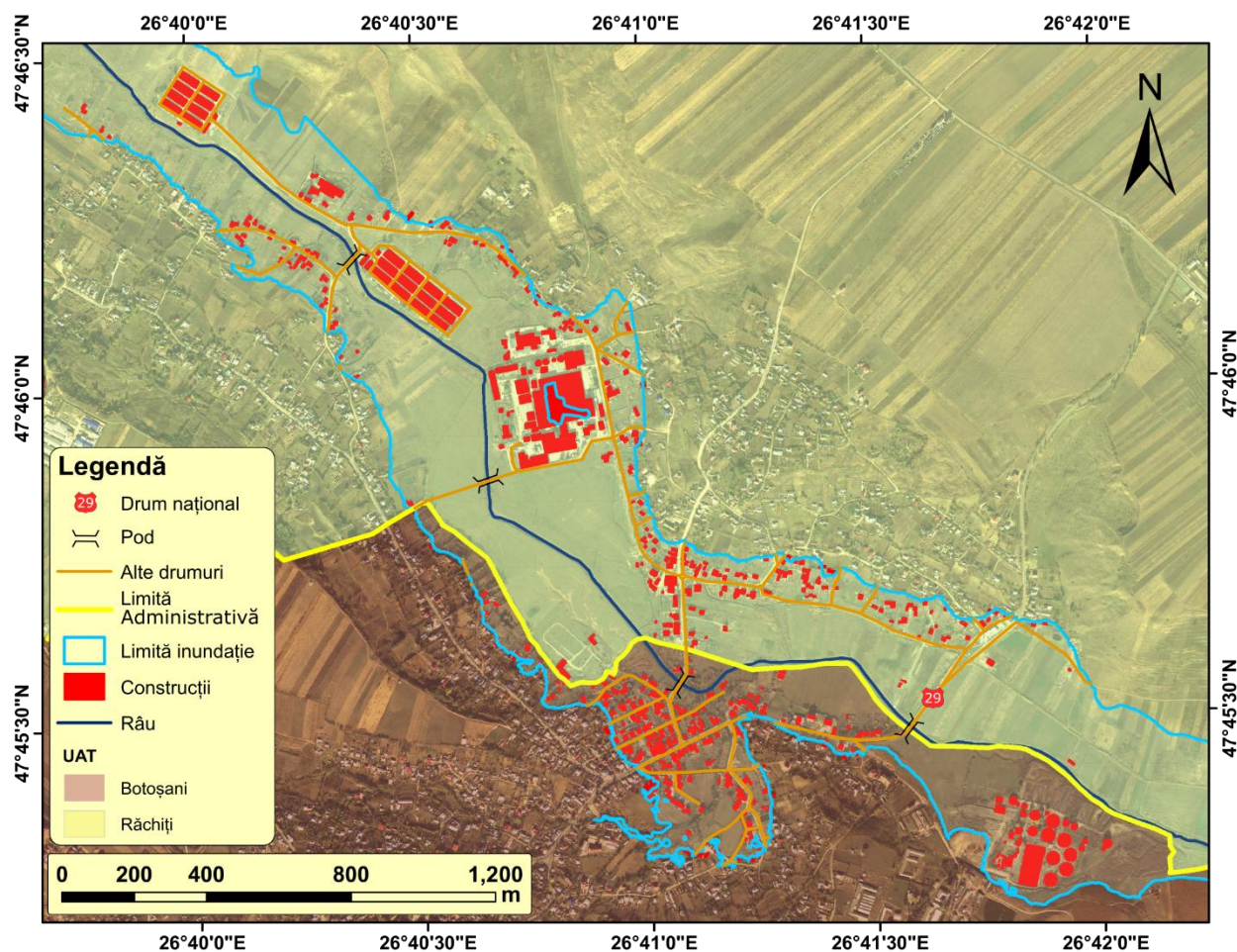


Figura 9 - Extinderea inundației rezultate în urma simulării ruperii barajului Cătămărăști precum și evidențierea construcțiilor vulnerabile din Municipiul Botoșani și Comuna Răchiți

Numărul total al construcțiilor vulnerabile, ca rezultat al analizei celor două localități mai sus menționate se ridică la 698, cu un număr de 317 în cadrul periferiei Municipiului Botoșani și 381 în comuna Răchiți. Un număr de drumuri și străzi au fost de asemenea identificate ca vulnerabile, după cum urmează: segmente de rețele primare de drumuri ce aparțin de DN29 și DN29D pe o lungime de 1.45 km, segmente de rețele secundare de drumuri precum DJ296 pe o lungime de 2.9 km precum și altele, cumulând un număr de aproximativ 20 km de rețea rutieră pentru toată zona vulnerabilă. Un număr de 4 poduri sunt de asemenea impactate ca urmare a rezultatelor scenariului simulat, care sunt poziționate pe râul Sitna, în zona Botoșani și Răchiți, conform [Figurii 32](#).

Drept produs final rezultat în urma analizei de rupere de baraj, a fost generată harta adâncimii stratului de apă simulat ([Figura 33](#)). Valorile de adâncime înregistrează o variație

semnificativă pe direcția amonte-aval în segmentul de vale considerat pentru scenariul prezent abordat.

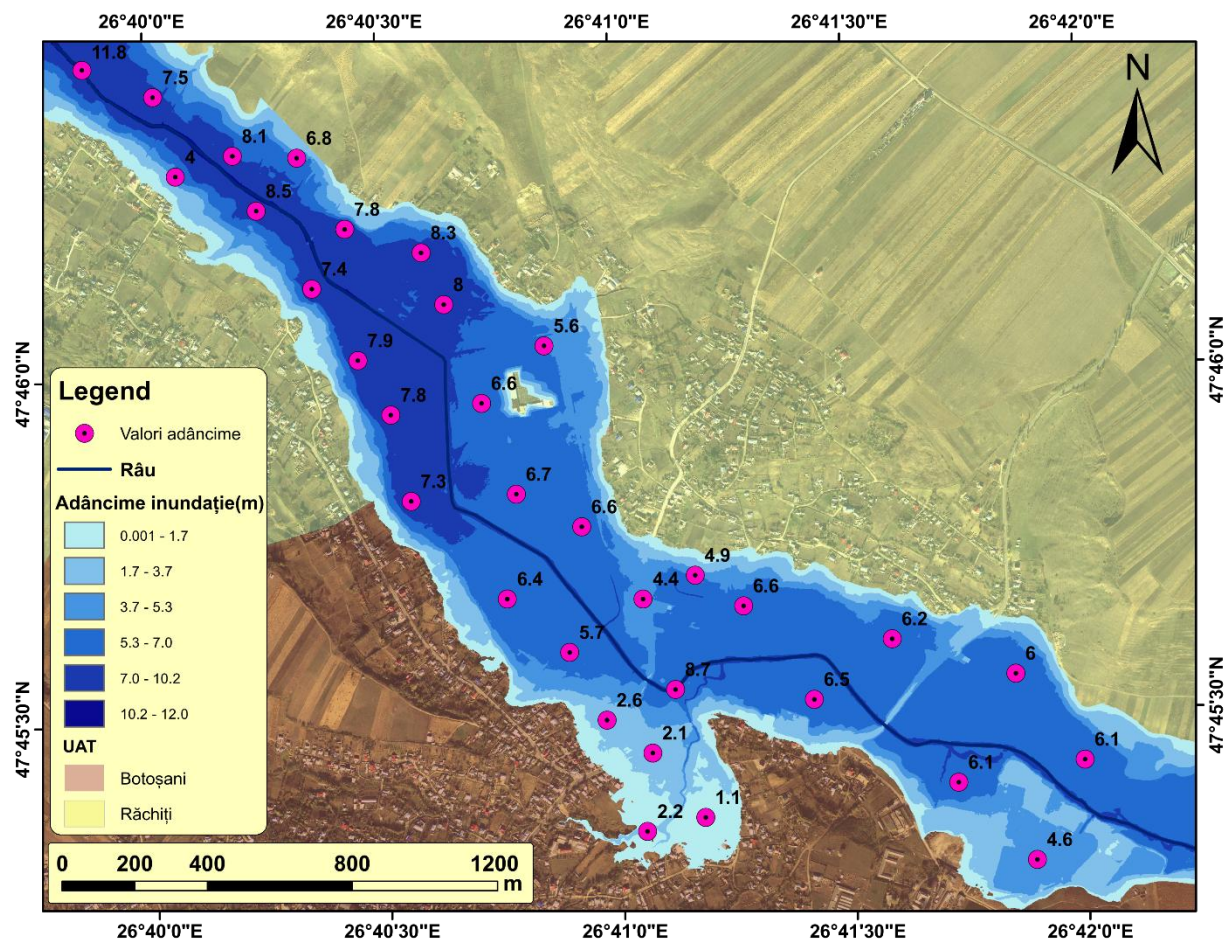


Figura 10 - Adâncimea inundației simulate în cadrul UAT Botoșani și Răchiți

Prin suprapunerea rezultatelor peste stratul utilizării terenului extras din setul de date Urban Atlas 2012 a fost generat inventarul zonelor vulnerabile după tipul de utilizare a terenului, conform tabelului de mai jos ([Tabelul 3](#)).

Tabelul 3. Zone vulnerabile la inundații, adâncimile medii și maxime pentru fiecare tip de utilizare a terenului

Tip utilizare Teren	Suprafețe Afectate (ha)	Adâncimea medie (m)	Adâncimea maximă (m)
Spațiu urban continuu	2.54	2.63	7.09
Structuri izolate	54.10	3.14	9.00
Unități industrial - comerciale	30.01	5.23	11.82
Șantiere de construcții	1.19	2.66	3.81
Teren neutilizat activ	0.55	1.76	1.94
Facilități sportive și de agrement	4.48	2.41	3.12

Teren arabil	274.30	4.07	11.87
Pășuni	379.82	4.83	11.99
Ferme piscicole	23.95	3.20	4.88
Alte drumuri și terenuri asociate	9.98	3.71	11.12
TOTAL	780.92		

Potrivit datelor extrase din Urban Atlas 2012, pășunile și terenurile arabile sunt cele mai vulnerabile la riscul analizat, urmate de structurile izolate, spațiile industrial – comerciale, ferme piscicole etc. Conform rezultatelor, bilanțul suprafețelor vulnerabile se ridică la valoarea de 780.92 hectare.

3.5 Concluzii

Scenariul simulat a presupus generarea unei inundații pe o lungime de 14.5 km în aval de barajul Acumulării Cătămărăști.

Analiza reușește să evidențieze zone cu un potențial însemnat de vulnerabilitate la inundația simulată de scenariul aplicat. Proximitatea așezărilor umane în aval de barajul Cătămărăști reprezintă un bun indicator pentru gradul de vulnerabilitate la care acestea pot fi supuse în cazul unui dezastru.

CAPITOLUL 4 – APLICAREA UNUI MODEL AVANSAT DE CALCUL HIDRAULIC HEC-RAS PENTRU ANALIZA VULNERABILITĂȚII LA INUNDAȚII. SCENARIU DE MODELARE A RUPERII BARAJULUI DRĂCȘANI ÎN BAZA UNOR BREȘE CU DIMENSIUNI VARIABLE

4.1 Introducere

Scopul acestei aplicații este acela de a scoate în evidență riscul spațial premergător ruperii barajului Sulița, localizat pe râul Sitna, în județul Botoșani. Riscul pe care prezenta lacului precum și tipul de baraj îl presupun a condus la necesitatea simulării unei serii de scenarii incluzând breșe de dimensiuni diferite, folosind versiunea 5.0.6 a programului HEC-RAS, care ar putea servi la actualizarea planurilor de management al inundațiilor.

Deoarece fenomenul dorit a fi simulat este unul turbulent și datorită disponibilității datelor de mare rezoluție precum și a capacității de procesare a acestora, s-a utilizat modelarea 2D, alimentată de parametrii hidrologici și hidraulici necesari, pentru a putea genera rezultate cartografice de mare acuratețe (Stoleriu et al., 2019; Vartolomei, 2010; Lahovari et al., 1900, Enea et al., 2018).

4.2 Zona de studiu

Barajul Sulița a fost construit pe râul Sitna, prin blocarea cursului de apă al râului formând Lacul Drăcșani. Acesta este localizat în regiunea de Nord-Est a României, în județul Botoșani (Figura 34). Barajul Sulița reprezintă o amenajare hidrotehnică construită din pământ, având o înălțime de 5.85 metri și o lățime la creastă de 6 metri.

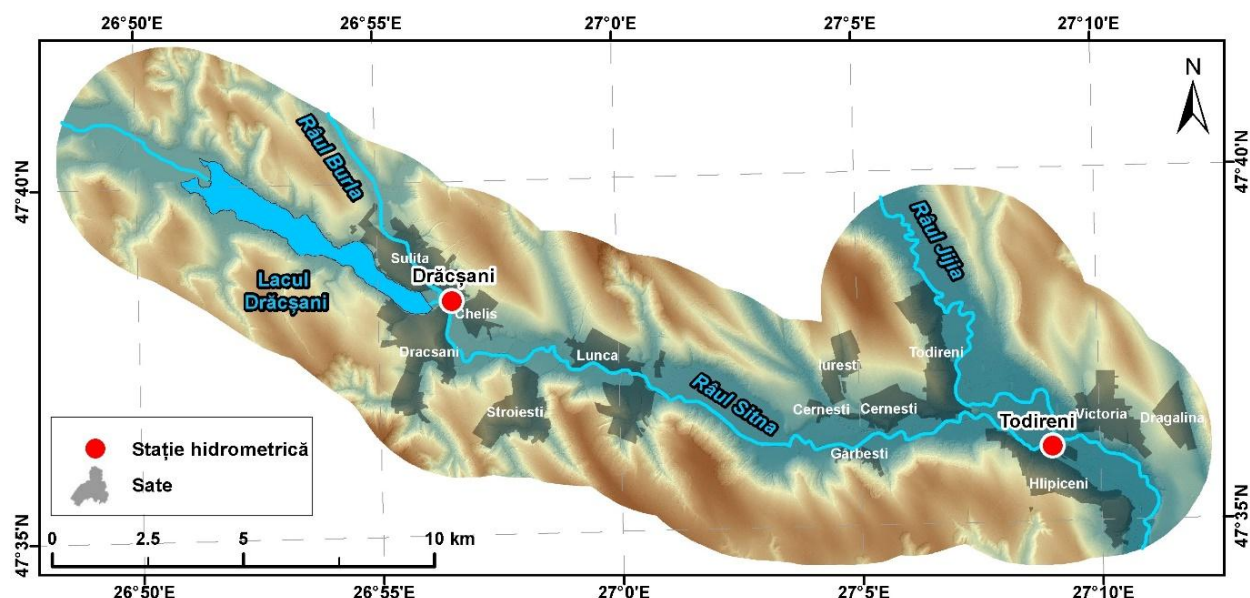


Figura 11 - Localizarea Lacului Drăcșani și a sectorului de râu pentru care a fost efectuat studiul (între Lacul Drăcșani și confluența cu râul Jijia)

Lacul Drăcșani are o suprafață totală a luciului de apă de aproximativ 5 km² (Maftei & Papatheodorou, 2015). Surse istorice confirmă faptul că barajul a fost construit pe situl unui alt baraj amenajat la începutul secolului al XX-lea, conducând la formarea unui lac cu o lungime de 5 kilometri și o suprafață de 13.6 km² (Sonmez et al., 2017). În același timp, prezența Lacului Drăcșani este menționată și în izvoare istorice ce datează din secolul XVI, cu mențiunea că acesta servea la atenuarea inundațiilor și la suplimentarea cu apă pentru irigații.

4.3 Surse de date și metode utilizate

4.3.1 Zona aleasă pentru elaborarea scenariilor de rupere de baraj

Zona de studiu a fost aleasă în baza unei serii de considerente. În primul rând, Lacul Drăcșani reprezintă unul dintre cele mai vechi lacuri artificiale din România.

În al doilea rând, Lacul Drăcșani fiind format în spatele unui baraj de pământ, reprezintă unul dintre cele mai mari lacuri din România ca și volum, având un volum maxim de apă de 22.22 milioane de m³, după cum este menționat în Planul de Management al Riscului la Inundații, elaborat de către Administrația Bazinală Prut-Bârlad (Planul de Management al Riscului la Inundații - ABA Prut-Bârlad, 2016).

În al treilea și ultimul rând, date de rezoluție ridicată au fost disponibile pentru zona de studiu, atât topografice cât și hidrologice, ceea ce a făcut posibilă elaborarea acestui studiu.

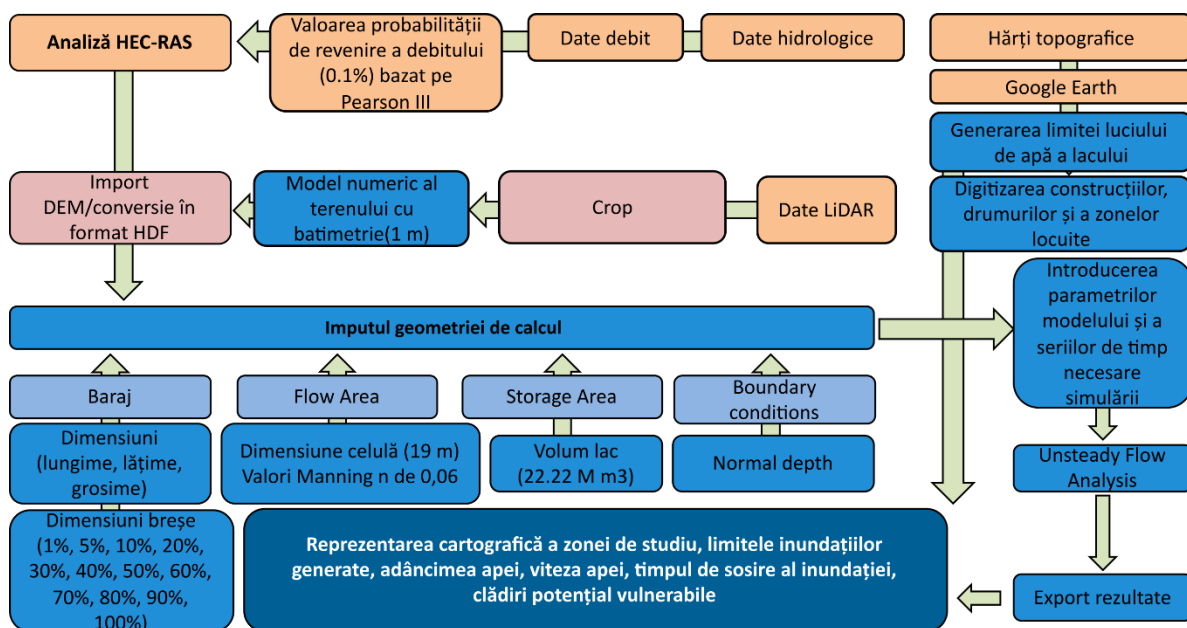


Figura 12 - Metodologie simplificată aplicată pentru analiza comparativă a ruperii de baraj

4.3.2 Achiziția datelor

Datele topografice care au fost disponibile pentru întreaga suprafață a bazinului râului Sitna (pe care este amenajat Lacul Drăcșani) a fost obținut de la Administrația Bazinală Prut-Bârlad, care au fost reprezentate de un model numeric al terenului cu rezoluția de 0,5 metri/pixel, fiind mai apoi procesat și interpolat la rezoluția de 1 metru/pixel. Această etapă a fost necesară din cauza suprafeței mari a zonei de studiu și din motive ce țin de parametrii de calcul ai modelului, considerând numărul ridicat de simulări care au fost rulate.

4.3.2.1 Datele hidrologice utilizate

Datele hidrologice necesare elaborării analizei au fost oferite de către Administrația Bazinală Prut-Bârlad și sunt formate din valori ale debitelor înregistrate la 3 stații hidrometrice care sunt localizate pe cursul râului Sitna: Cătămărăști, Drăcșani și Todireni, pentru care intervalul temporal al înregistrărilor este de 64 de ani (1953 – 2017).

4.3.2.2 Modelul hidraulic de rupere a barajului

HEC-RAS a fost dezvoltat pentru a putea rezolva și aplica atât setul de ecuații *2D Full Saint Venant* cât și *2D Diffusion Wave*, această analiză fiind executată prin aplicarea modelului *shallow water* cu setul de ecuații *diffusion wave approximation of shallow water*, specificate mai jos (USACE, 2016):

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad (1)$$

$$\text{Unde: } \beta = \frac{(R(H))^{\frac{5}{3}}}{n |\nabla H|^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

unde H reprezintă înălțimea suprafeței apei, t reprezintă timpul, operatorul diferențial *del* (∇) este vectorul operatorilor parțial derivați dați prin expresia $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$, β este coeficientul impulsului, ∇H este gradientul elevației suprafeței, q reprezintă un coeficient cu referință la scurgerea sursă/destinație (source/sink), R este raza hidraulică iar n reprezintă coeficientul Manning's n derivat empiric.

S-au considerat necesare efectuarea unor scenarii multiple de simulare, implicând un număr de 12 breșe și implicit simulări pentru fiecare breșă. Acestea debutează de la un nivel procentual de 1% din volumul barajului, continuând către nivelul de 5% iar mai apoi de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% 90% și mai apoi simulând cedarea completă a barajului Sulița (breșă de 100%). Dimensiunile breșelor au fost calculate pe baza suprafeței barajului, folosind procentajele mai sus menționate.

Analiza a luat în considerare nivelul maxim de reținere al Lacului Drăcșani și anume 22.22 milioane de m³ de apă (care corespunde unei înălțimi de 81 de metri în lungul secțiunii transversale a barajului), introduse în modelul de calcul prin metoda Elevație vs Curba de Volum (elevation vs volume curve). Valorile de rugozitate Manning n alese au fost cele de 0.06 deoarece utilizarea terenului în zona de studiu este relativ uniformă, neexistând configurații complexe, în general întâlnindu-se pășuni, teren agricol și diferite formațiuni vegetale ierboase.

Odată cu generarea geometriei și a inserării parametrului de rugozitate, următorul pas a constat în stabilirea condițiilor de prag (boundary conditions). Pentru zona de studiu, valoarea acestui parametru a fost calculat având valoarea de 0.001.

Restul parametrilor necesari simulării au fost introduși în modelul de calcul, începând cu setarea timpului de dezvoltare al breșei, având valoarea de o oră. Parametrul breșei a fost stabilit fără a se considera formarea instantanee a acesteia, simularea neincluzând cedarea bruscă a barajului, care ar putea fi cazul unor cedări structurale extreme, explozii sau infiltrații puternice în volumul construcției. Acest studiu ia în considerare simulări de rupere de baraj prin scenariul de overtopping – principala cauză a ruperilor de baraj din pământ în aproximativ 48% dintre cazuri (Foster et al., 2000).

Timpii de calcul au fost stabiliți potrivit condiției Courant (Hydrologic Engineering Center – HEC, 2021). Această variabilă (ecuația 3) asigură că apa (sau valorile reprezentante, în acest caz) nu „curge” pe mai mult de o celulă computațională într-un interval de calcul dat. În esență, această variabilă participă la stabilizarea modelului de calcul și se exprimă matematic după cum urmează:

$$C = \frac{v * \Delta t}{\Delta x} \quad (3)$$

unde C este numărul Courant, v este viteza undei de inundație, exprimată în m/s, Δt este intervalul de calcul iar Δx reprezintă dimensiunea medie a celulei computaționale.

În plus față de ce s-a precizat mai sus, anterior rulării celor 12 simulări au fost efectuate ca și test un număr de trei simulări, utilizând un interval temporal de simulare de 30 de secunde, pentru a identifica viteza medie a apei.

Rezultatele simulărilor au produs următoarele straturi: limitele inundațiilor, adâncimile inundațiilor, vitezele și timpii de scurgere pentru fiecare scenariu rulat.

4.4 Rezultate

După rularea celor 12 simulări, au fost extrași cei mai relevanți parametri pentru a se putea scoate în evidență diferențele dintre ele. Acești parametri au implicat totodată și numărul de construcții afectate de fiecare inundație simulată, suprafața totală inundată (incluzând zona de

confluență cu râul Jijia), adâncimile maxime ale inundațiilor, vitezele maxime, timpul de propagare al inundațiilor, timpul de evacuare al cuvetei lacustre și vitezele medii ale inundațiilor (Tabelul 4).

Tabelul 4. Rezultatele comparative ale simulărilor de rupere de baraj, corespunzătoare fiecărei breșei

Dimensiune breșă	NCI	STI (ha)	AMA (m)	VMA (m/s)	TPI (h)	TEL (min)	VMA2 (m/s)
1%	36	1179.70	8.44	8.78	10h 13min	54h	0.35
5%	214	1876.74	9.95	8.80	7h 59min	32h	0.57
10%	233	1903.52	9.97	8.82	7h 48min	23h	0.59
20%	235	1908.71	10.01	8.83	5h 41min	20h	0.60
30%	238	1909.71	10.02	8.84	5h 37min	14h	0.62
40%	240	1913.38	10.05	9.19	5h 32min	11h	0.62
50%	241	1918.36	10.06	9.28	5h 26min	8h 15min	0.63
60%	241	1921.03	10.07	10.13	5h 21min	7h 15min	0.63
70%	242	1922.40	10.07	11.65	5h 20min	6h 30min	0.63
80%	242	1926.84	10.08	12.91	5h 19min	5h 30min	0.63
90%	242	1929.75	10.10	13.55	5h 19min	4h 15min	0.63
100%	376	2068.34	11.76	21.78	5h 18min	3h 15min	0.68

NCI - Numărul de construcții inundate; STI - Suprafața totală inundată; AMA - Adâncimea maximă a apei; VMA - Viteza maximă a apei; TPI - Timpul de propagare al inundației; TEL - Timpul de evacuare al lacului; VMA2 - Viteza medie a apei

Cele 12 scenarii simulate evidențiază vulnerabilitatea a numeroase construcții în satul Sulița din cauza fenomenului de backwater, evidențiind în același timp expunerea la simularea inundației breșei de 10% (Figura 37).



Figura 13 - Adâncimea apei în vecinătatea breșei barajului, pentru toate scenariile simulate

Considerând valorile similare ale vitezei medii ale inundațiilor pentru breșele mai sus menționate la care se adaugă cea de 20%, valorile vitezelor maxime au fost valide doar pentru situații izolate, cel mai mult asociate cu locația breșei și anumite secțiuni înguste ale râului. În mod diferit, vitezele medii au fost foarte mult atenuate de către suprafețele mari inundate (cele mai multe pe orientare laterală). În această situație, apa a fost mai mult stagnantă și la o distanță semnificativă de linia centrală a unei inundații precum zonele marginale ale luncii unde valorile adâncimilor au fost de asemenea mai mici (Figura 38).

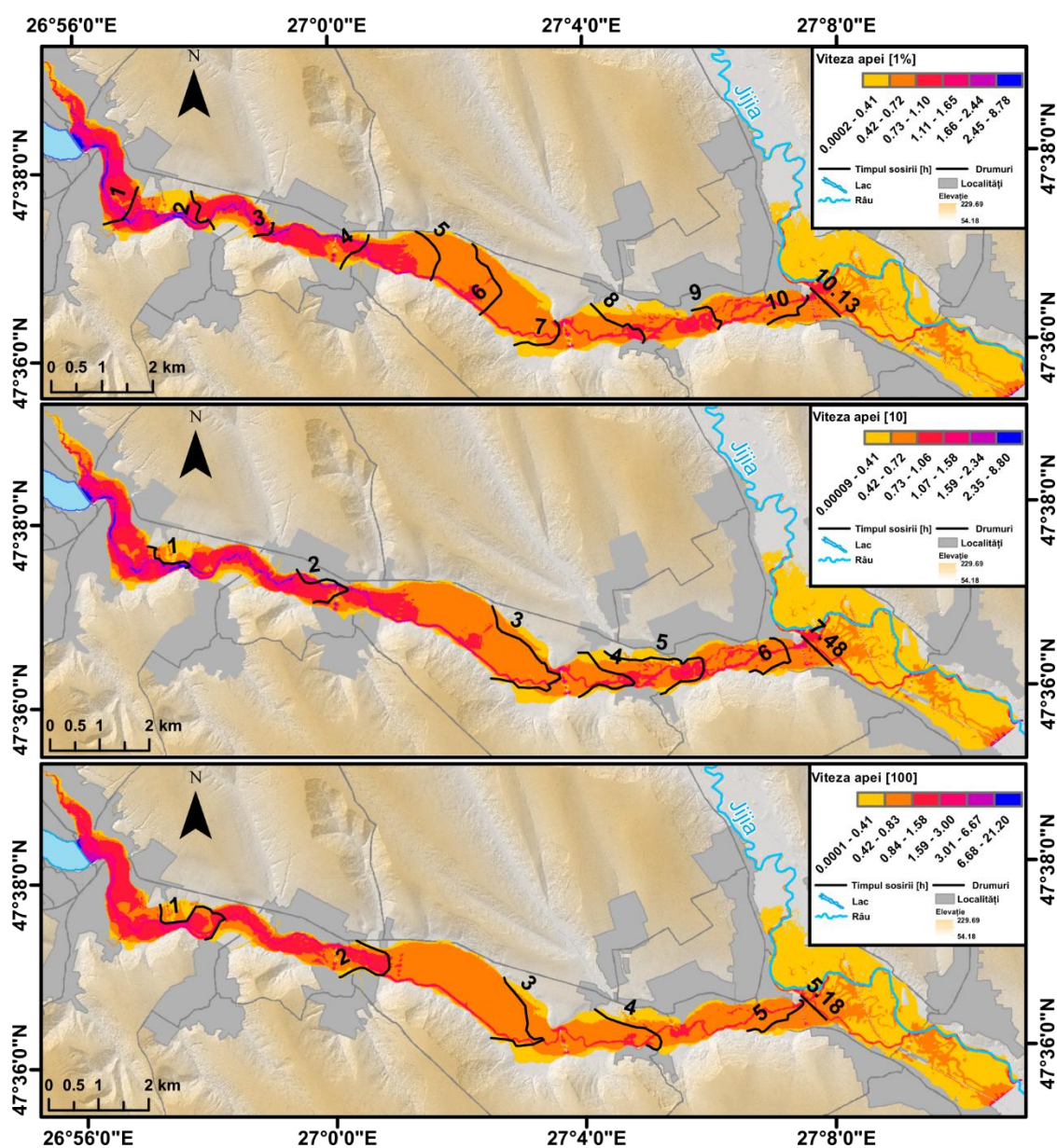


Figura 14 - Viteza apei și timpul de sosire pentru breșele reprezentative de 1%, 10% și 100%

De-a lungul văii râului Sitna în aval de barajul Sulița există localități cu diverse extinderi și poziționări, unele fiind mai ferite de potențiale inundații, altele mai expuse. Satul Lunca deține numeroase construcții distribuite pe o direcție perpendiculară cu direcția de curgere a râului Sitna, ceea ce le face foarte vulnerabile în cazul unor astfel de scenarii. În mod contrar, satul Cernești spre exemplu este compus din construcții poziționate mai în siguranță (Figura 39).

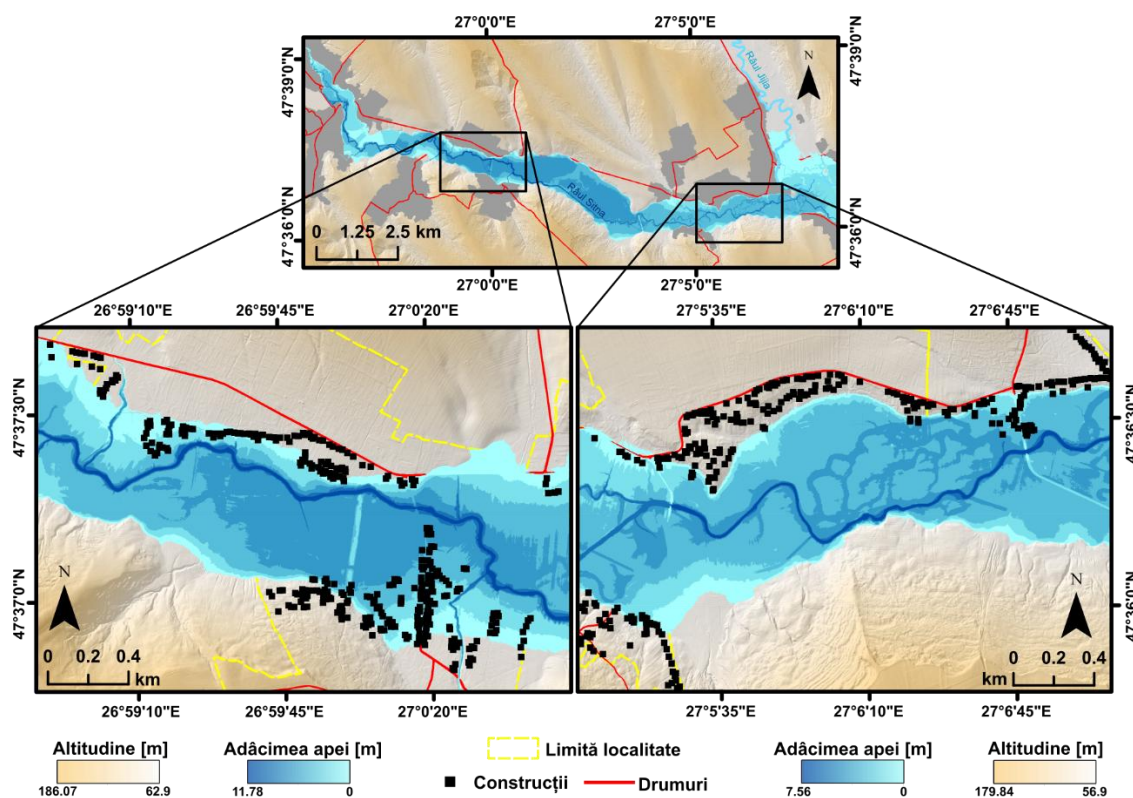


Figura 15 - Scenariul cel mai nefavorabil (stânga) și cel mai favorabil (dreapta) privind poziționarea zonelor construite în aria de studiu (simularea de 100%)

Au fost luate în analiză și categoriile de utilizare a terenului afectate de simulările rulate și comparate pentru a dezvălui clasele care ar fi cel mai mult afectate. Din fericire, pentru toate cele 12 scenarii considerate, vasta majoritate a tipurilor de utilizare a terenului este formată din pășuni, terenuri arabile neirigate precum și alte tipuri de teren ce implică activități agricole (Tabelul 5).

Din perspective economice, clasele de utilizare a terenului compuse preponderent din terenuri expuse la inundații de acest tip ar putea fi considerate semnificative ca și suprafață, deși zonele locuite sunt reduse ca și suprafață în ceea ce privește expunerea lor (Figura 40).

Tabelul 5. Zone inundate per categorie de utilizare a terenului pentru toate simulările, conform Corine Land Cover 2018

Cod CLC	Zone inundate (ha)											
	1%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
112 ¹	40.3	85.8	87.2	86.3	87.7	82.9	85.3	86.9	87.2	87.1	86.4	110.6
211 ²	204.7	339.8	343.9	340.5	347.1	329.0	337.6	343.1	344.4	343.9	341.6	398.7
221 ³	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
222 ⁴	3.6	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	6.5
231 ⁵	771.1	1095.8	1106.3	1094.0	1107.0	1092.1	1093.3	1099.0	1101.4	1100.6	1096.7	1163.3
242 ⁶	25.5	108.1	110.0	109.4	107.7	94.7	108.4	109.6	109.4	109.5	109.0	105.8
243 ⁷	117.3	164.5	164.6	164.7	165.3	164.8	164.2	164.9	165.0	165.0	164.8	173.2

1 - Spații urbane discontinue, 2 - Terenuri arabile neirigate, 3 - Zone viticole, 4 - Plantații pomicole, 5 - Pășuni, 6 - Zone de culturi complexe, 7 - Terenuri predominant agricole în amestec cu vegetație naturală

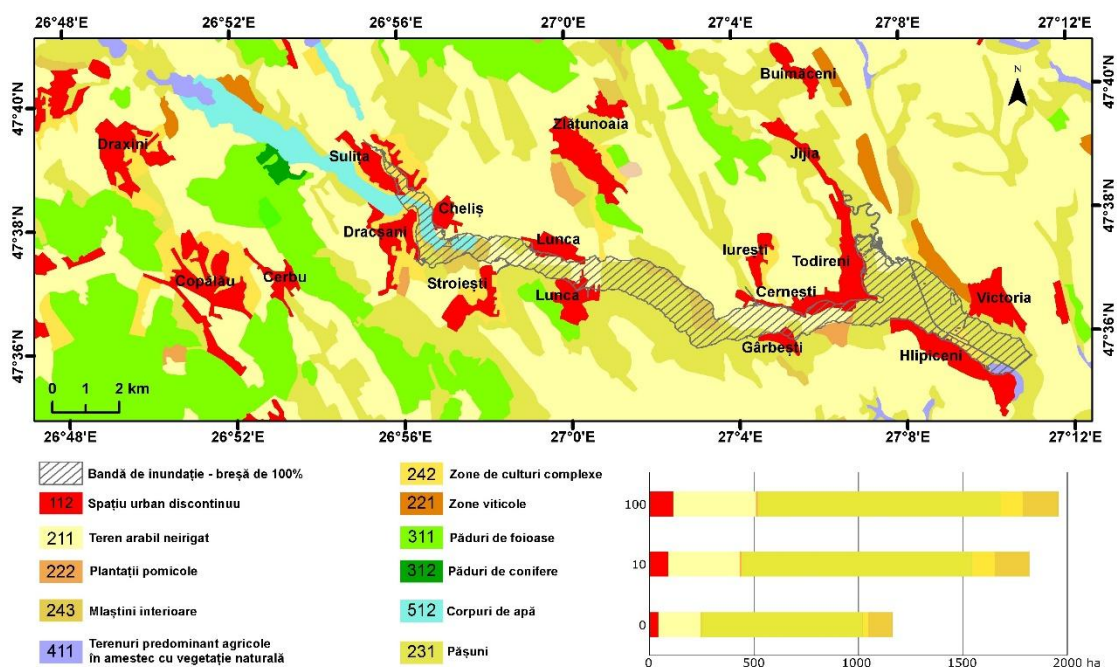


Figura 16 - Distribuția utilizării terenului și suprafețele totale afectate per categorie, pentru breșa de 100%

Cele mai notabile probleme care s-ar putea menționa în această situație este faptul că cele mai expuse zone locuite din aria de studiu (satul Lunca) sunt localizate în prima treime din zona văii Sitna, ceea ce este nefavorabil din cauza lățimii înguste a luncii și a timpului scurt de avertizare în caz de pericol.

4.5 Discuții

4.5.1 Discuții generale

Dintre toate cele 12 scenarii de simulare, doar șase dintre ele au fost alese pentru comparație, pentru a se elimina astfel redundanța grafică cauzată de suprapunerea unor grafice multiple foarte similare. Aceste șase scenarii sunt după cum urmează: 1%, 5%, 10%, 20%, 50% și 100%. În ciuda acurateței ridicate a straturilor de ieșire generate de HEC-RAS, au existat raportări privind instabilitatea modelului de calcul, mai ales referitoare la datele tabelare ([Gharbi et al., 2016](#); [Dimitriadis et al., 2016](#); [Rubiu, 2018](#)).

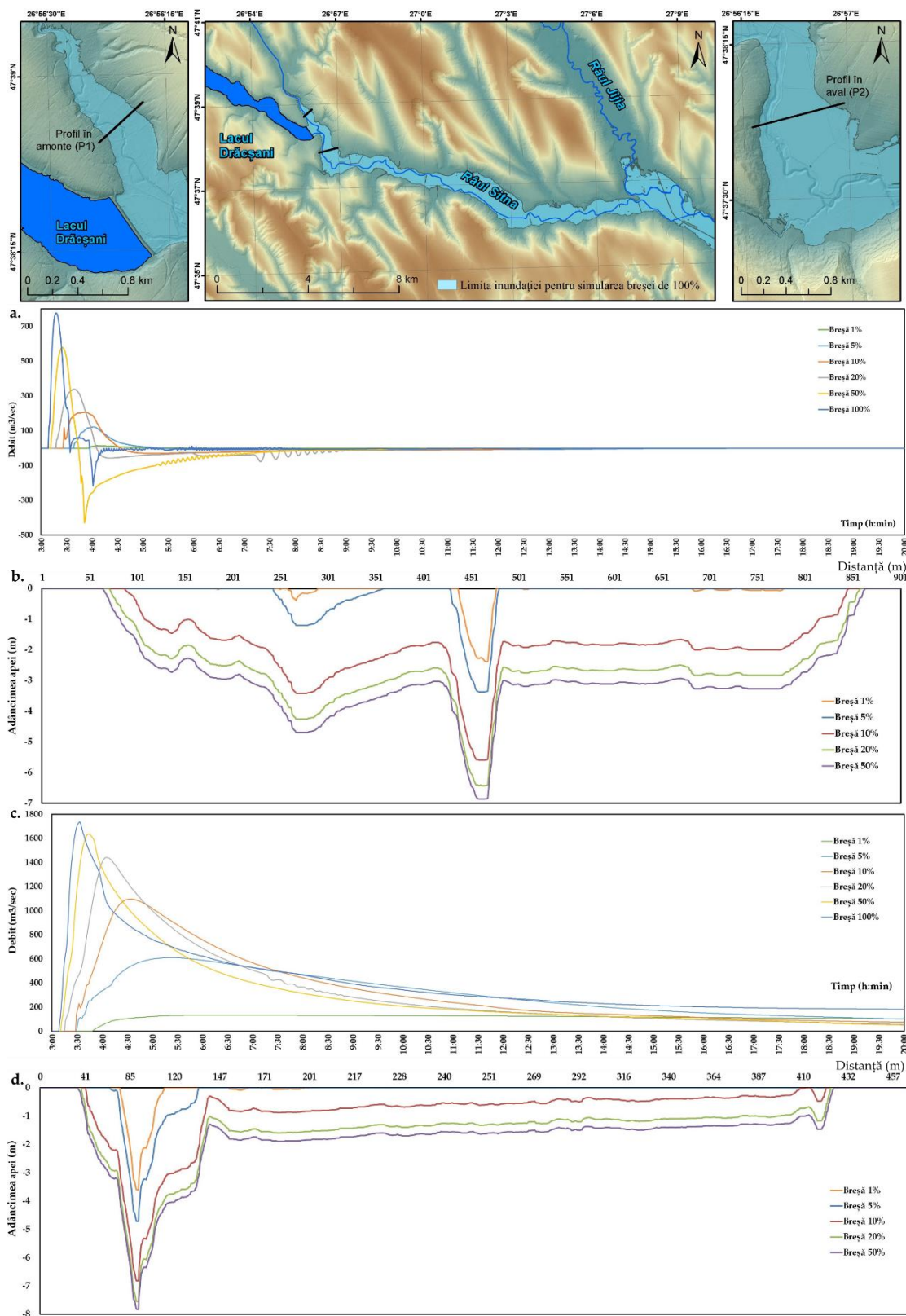


Figura 17 - Hidrografele debitelor în secțiunile transversale din amonte (a) și aval (c) cu valorile adâncimilor asociate (b și d)

În ciuda problemelor numeroase au fost identificate două locații pentru trasarea secțiunilor transversale (Figura 41) care nu au generat erori semnificative (dacă au existat) în forma profilurilor P1 (Figura 41a,b) și P2 (Figura 41c,d), pentru care s-au generat graficele debitelor și ale adâncimilor.

4.5.2 Aspecte temporale

Întârzierea timpului de propagare în ceea ce privește undele de inundație pentru fiecare scenariu este un element important de menționat, existând diferențe semnificative între toate simulările. Rezultatele au condus la o simplă clasificare a scenariilor considerate. Pentru scopul acestei discuții, s-a ales profilul transversal corespunzător satului Lunca, considerându-i nivelul ridicat de vulnerabilitate la inundații (așa cum poate fi observat în Figura 39, numeroase construcții au fost asociate riscului la inundații).

4.5.3 Aspecte privind atenuarea inundațiilor

Considerând că lățimile albiei majore variază semnificativ ajungând la o valoare maximă de aproximativ 1 km după primul sector din zona de studiu (sectorul mijlociu), adaosul reprezentat de fenomenul de backwater nu a fost ușor de identificat pe oricare hidrograf al debitelor, în aval de profilul P2. Această situație s-a tradus printr-o formă de protecție naturală oferită de lățirea albiei majore, unde inundația a putut să se distribuie mai mult în lateralul văii râului Sitna. Prin contrast, în cazul ipotetic al unei văi înguste, în loc să existe un volum de apă distribuit către lateral, valorile adâncimilor și ale vitezei ar crește, astfel provocând mai multe pagube.

4.5.4 Validarea rezultatelor

Primul pas a fost validarea utilizând literatura de specialitate care a tratat subiectul modelării ruperilor de baraj.

Baraje de dimensiuni similare cu caracteristici hidrometrice similare au reprezentat subiectul simulărilor de rupere, cum este barajul Chipembe din Mozambic (un baraj de terasament cu un volum total al lacului de 24.8 milioane m³ și valori comparabile ale pantelor) (Alvarez et al., 2017). Pentru cazul de față, vitezele medii au fost cuprinse între 0.5 și 1 m/s iar debitele între 1450

și 2748 m³/s, oferind rezultate similare cu studiul de față (maximul debitului fiind de 1730 m³/s în profilul P2). Mai mult, hidrografele debitelor au prezentat forme similare.

Al doilea pas a constat în utilizarea unei limite de inundație generate de către Administrația Bazinală Prut-Bârlad pentru valea râului Sitna pentru probabilitatea de revenire de 0.1%, având astfel oportunitatea de a compara rezultatele simulărilor cu date oficiale. Acest strat corespunde cu rezultate generate de către o analiză de tip scurgere turbulentă (unsteady flow) iar astfel, validarea a presupus două etape. Înainte de toate a fost aleasă simularea de 10% pentru comparația cu un strat generat pe baza aceluiași debit de ieșire precum cel din cadrul simulării de 10%, cu toți parametri rămași neschimbați.

Rezultatele au arătat o marjă de similaritate de 98.7% între suprafețele straturilor generate, cu diferențe neglijabile între simulări. Validarea folosind acest principiu a fost adresat în [Tabelul 6](#) prin corelarea straturilor generate prin diferite abordări. Studii similare au folosit aceleași principii de validare, tot pe baza programului HEC-RAS, incluzând straturi precum imagini satelitare ([Enea et al., 2018](#)).

Tabelul 6. Corelarea limitelor de inundație

	Rezultate studiu (breșă de 10%)	2D Unsteady (debit echivalent cu scenariul de 10%)	Nivel corelație
Aria (m ²)	20683352.5	20403841.6	98.70%
	Limita oficială a inundației de 0.1%	Stratul 2D unsteady – probabilitate de revenire de 0.1%	Nivel corelație
Aria (m ²)	9466001.6	8537745.3	90.20%
	Rezultate studiu (breșă de 50%)	Full momentum (breșă de 50%)	Nivel corelație
Aria (m ²)	19183623.66	17987918.28	93.80%

Aceste straturi au avut o suprafață care s-a corelat în proporție de 90.2%. Prin această metodă, validarea în proporție de peste 90% a rezultatelor a putut fi oferită parțial pentru scenariul de 10% simulat în cadrul acestui studiu.

O validare suplimentară a fost realizată empiric prin comparația cu cel mai similar caz real de rupere de baraj din România, atât prin parametri cât și prin dimensiuni și anume barajul Belci. Ținând cont de volumele de apă comparabile (12.5 milioane m³ vs 22.22 milioane m³), dimensiuni

și caracteristici similare ale barajelor (415 m lungime, 4-8 m înălțime vs. 610 m lungime, 5.85 m înălțime), arii ale bazinelor hidrografice (993 km² vs 943 km²) precum și dimensiunea breșelor, barajul Belci a reprezentat cea mai bună referință pentru rezultatele generate în urma analizei.

Corelația dintre cele două a fost rezonabil de ridicată privind timpul de evacuare al lacului (barajul Belci a avut o rată de evacuare de 6.82 milioane m³/h, Sulița atingând valori similare), debitele de vârf (1730 m³/s pentru Sulița vs 2100 m³ pentru Belci) precum și dimensiunile breșelor (în cazul barajului Belci, breșa a avut o dimensiune de 17%). Ca și completare, valorile rezultate pentru toate simulările efectuate s-au aliniat cu cele așteptate ([Enea, 2017](#)).

4.6 Concluzii

Scenariul comparativ de modelare a ruperii barajului Sulița pe baza unor breșe cu dimensiuni variabile a revelat o serie de caracteristici pentru Lacul Drăcșani, cel mai important fiind rezultatele scenariului de 10% care a fost identificat ca fiind pragul critic din cauza reducerii trendurilor de creștere a valorilor parametrilor analizați, comparați cu scenariile breșelor de dimensiuni mai mari. La aceste valori parametrii au tendința să se stabilizeze fără a mai crește într-o manieră exponențială ci într-o formă mai degrabă neglijabilă, urmărind un trend algoritmic. Valoarea critică de 10% a fost identificată și evidențiată pe ambele straturi spațiale (adâncime și viteză) precum și în tabele și grafice (hidrografele de debit și graficele adâncimilor în profil transversal).

Amenajările piscicole din aval de baraj acționează ca și închideri atenuante la inundații, mai exact precum polderile, care chiar și când sunt parțial umplute, oferă o formă de protecție asupra inundațiilor, ceea ce este foarte relevant, considerând suprafețele pe care acestea le acoperă, fapt validat de asemenea și de animația dinamicii nivelurilor adâncimilor acestora.

În acest mod, însumând toate cele deja menționate, concluzia principală este că dimensiunea breșei nu ar trebui asociată cu o catastrofă cu grad ridicat de improbabilitate (scenariul de 100%) pentru a fi considerată dezastruoasă, ci mai degrabă, cu cea de 10% care corespunde unei suprafețe mari acoperite de apă la viteze reduse.

CAPITOLUL 5 – UTILIZAREA TEHNICILOR GIS PENTRU CARTOGRAFIEREA SUSCEPTIBILITĂȚII LA ALUNECĂRI DE TEREN. APLICAREA METODOLOGIEI AHP (ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS) ÎN BAZINUL RÂULUI SITNA, BOTOȘANI, ROMÂNIA

5.1 Introducere

Scopul acestui studiu de caz a fost acela de a evidenția și cartografia susceptibilitatea la alunecări de teren în bazinul hidrografic al râului Sitna prin integrarea unui set de parametri care pot influența probabilitatea producerii de alunecări de teren, prin utilizarea metodologiei Analytical Hierarchy Process (AHP) și a tehnicilor GIS, folosind aplicația ArcMap.

5.2 Surse de date și metode utilizate

Etapă premergătoare demarării analizei de evaluare a susceptibilității la alunecări de teren în bazinul hidrografic al râului Sitna a presupus în primă fază identificarea factorilor fizico-geografici care ar putea determina producerea alunecărilor de teren iar mai apoi clasificarea variabilelor relevante pentru zona de studiu. Pasul următor constă în „cântărirea” importanței fiecărei variabile în analiză și desemnarea unei „greutăți”, folosind o matrice de mapare denumită *pairwise comparison matrix*. Ultimul pas constă din însumarea variabilelor în funcție de greutatea lor și validarea statistică a rezultatului final.

5.2.1 Determinarea factorilor

Variabilele fizico-geografice relevante care au fost luate în considerare pentru zona de studiu privind aplicarea metodologiei de identificare a zonelor predispuse la alunecări de teren sunt reprezentate de un număr de 10 factori cauzali (Figurile 42, 43). Acestea sunt reprezentate de către pante, expoziția versanților, curbura, utilizarea terenului, textura solului, proximitatea rețelei hidrografice, proximitatea căilor rutiere, Topographic Wetness Index (TWI), densitatea de drenaj și precipitațiile. Importanța fiecărui strat este descrisă mai jos.

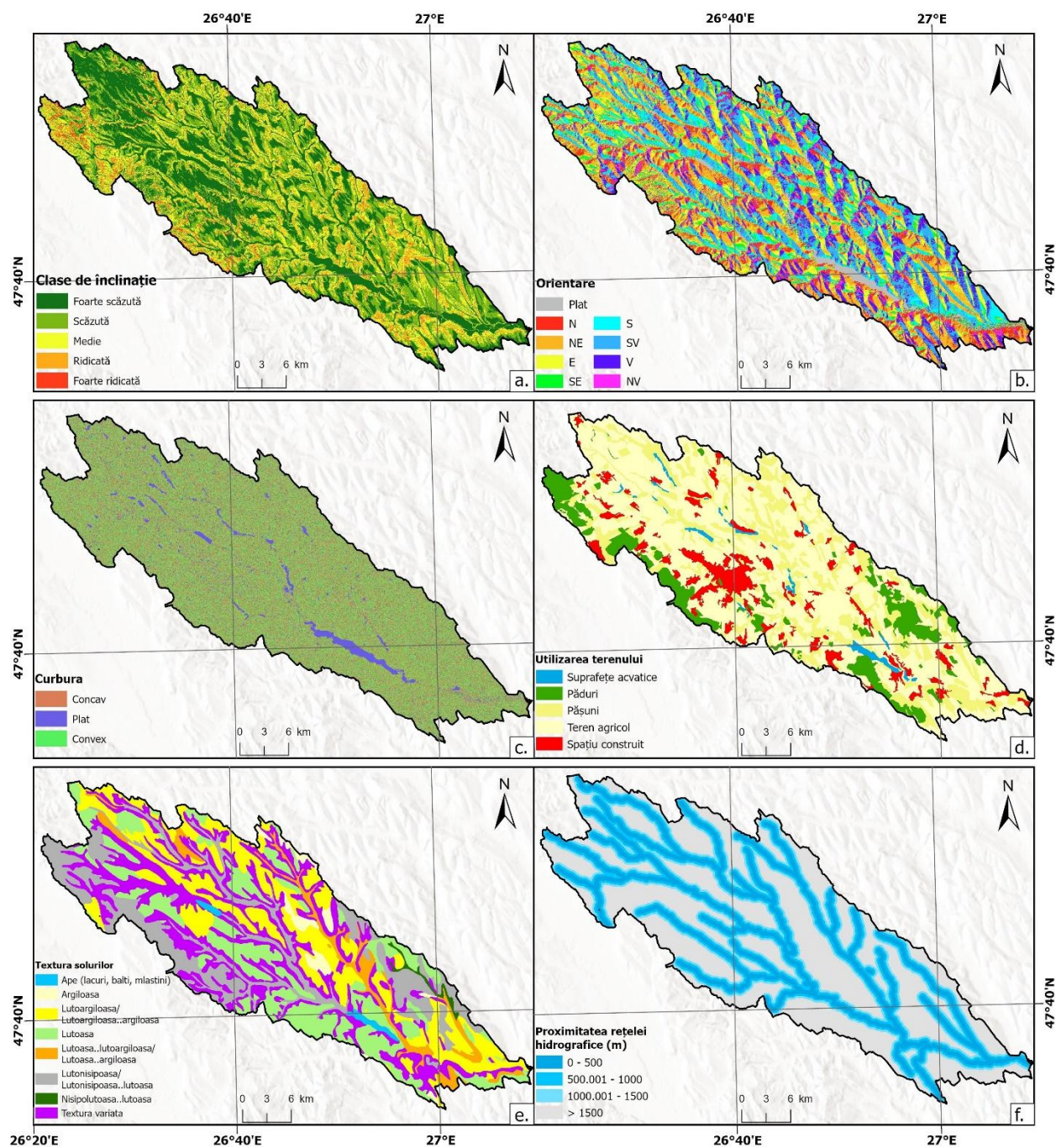


Figura 18 - Parametri considerați pentru aplicarea modelului AHP (a – Pantele, b – Expoziția, c – Curbura, d – Utilizarea terenului, e – Textura solului, f – Proximitatea rețelei hidrografice)

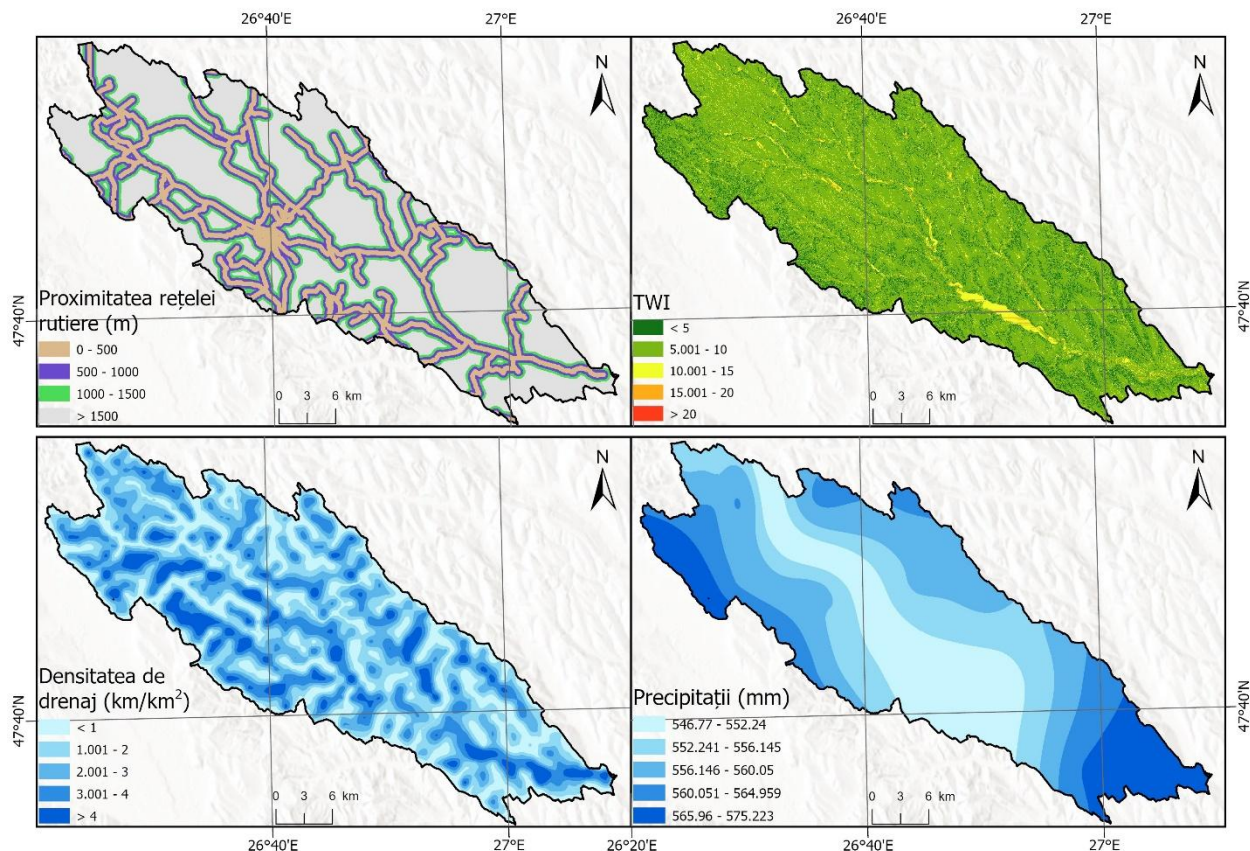


Figura 19 - Parametri considerați pentru aplicarea modelului AHP (g – Proximitatea rețelei de drumuri, h – Topographic Wetness Index, i – Densitatea de drenaj, j – Precipitații)

5.2.2 Estimarea ponderilor factorilor considerați

Pentru a putea procesa și manipula datele necesare analizei, a fost folosit programul ArcMap. Calcularea greutății corespunzătoare fiecărui strat considerat a fost efectuată folosind Microsoft Excel ([Figura 44](#)) iar ulterior însumarea variabilelor s-a făcut folosind modulul AHP ([Marioni, 2004](#)), care reprezintă o unealtă (plugin) elaborat și funcționabil doar pentru programul ArcMap versiunile 10x.

Matrice											Eigenvector principal normalizat
	Textura solurilor	Precipitații	Pante	Orientare	Densitate drenaj	Utilizare teren	Curbura	Distanța rețea hidrografică	Distanța rețea drumuri	TWI	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Textura solurilor	1	2	1/3	4	3	2	4	3	4	4	18.51%
Precipitații	2	1	1/3	3	3	2	2	4	7	3	15.13%
Pante	3	3	1	3	5	1	3	3	3	1	20.34%
Orientare	4	1/4	1/3	1	2	1/3	1/4	1	2	1	5.21%
Densitate drenaj	5	1/3	1/3	1/5	1	1/3	1/2	3	2	1	5.20%
Utilizare teren	6	1/2	1/2	3	3	1	3	5	2	1/2	11.78%
Curbura	7	1/4	1/2	1/3	2	1/3	1	2	2	1/2	7.22%
Distanța rețea hidrografică	8	1/3	1/4	1/3	1	1/5	1/2	1	1/2	1/2	3.55%
Distanța rețea drumuri	9	1/4	1/7	1/3	1/2	1/2	1/2	2	1	1/2	3.92%
TWI	10	1/4	1/3	1	1	2	2	2	2	1	9.15%

Figura 20 - Matrice de comparație în perechi (Pairwise Comparison Matrix) și ponderile factorilor

Pentru ca matricea să fie validă, raportul de consistență trebuie să aibă o valoare $\leq 0.1\%$ (Saaty, 1977). În cazul de față, valoarea CR = 0.09%, ce indică o consistență foarte bună a matricii de calcul.

5.3 Rezultate și Discuții

Aplicarea metodologiei AHP a oferit posibilitatea stabilirii ponderii fiecărei variabile în analiza susceptibilității la alunecări de teren. Validarea rezultatelor

În cadrul analizei efectuate, s-a apelat în primă fază la identificarea punctuală a alunecărilor de teren, folosind imagini aeriene și modelul numeric al terenului cu rezoluția de 1x1 metri. Validarea rezultatelor generate prin aplicarea metodei AHP s-a realizat folosind modelul ROC (AUC).

Fiecare prag formează o matrice (confusion matrix) în care sunt definite 4 tipuri de pixeli: True Positive (TP), False Positive (FP), True Negative (TN) și False Negative (FN). Pixelii de tip TP și FN aparțin alunecărilor reprezentate în clasele senzitive de deasupra și dedesubtul valorii de prag.

$$TPR = \frac{TP}{TP+FN} \quad (7)$$

$$FPR = \frac{FP}{TN+FP} \quad (8)$$

Șirurile de numere rezultate pentru TPR respectiv FPR sunt ulterior reprezentate grafic pe o axă xy, grafic ce poartă denumirea de **curbă ROC** (Receiver Operating Characteristic). Ultimul pas al validării constă din evaluarea **parametrului AUC** (Area Under the Curve), exprimat matematic prin formula de mai jos:

$$AUC = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{2} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 * (y_i + y_{i+1})} \quad (9)$$

Valoarea parametrului AUC indică performanța modelului de calcul și este exprimat pe o scară de la 0 la 1. În cazul modelului AHP aplicat, valoarea parametrului AUC este de 0.821 (Figura 45). Un model validat cu o valoare AUC cuprinsă între 0.8 – 0.9 este considerat a fi excelent (Hosmer & Lemeshow, 2000; Mandrekar, 2010).

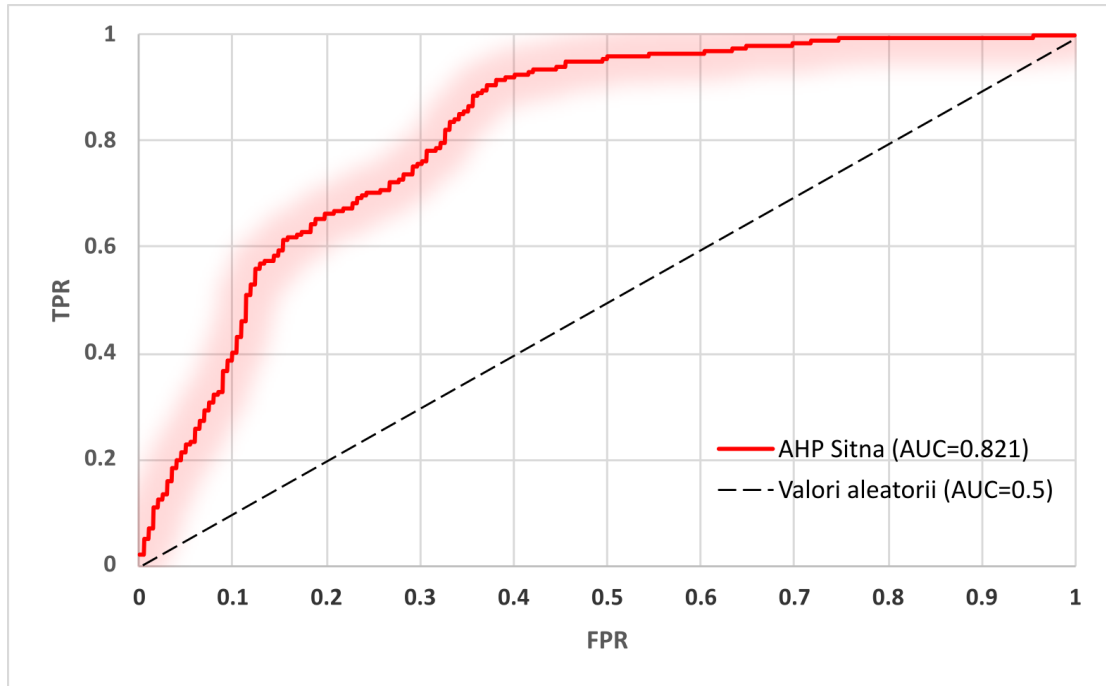


Figura 21 - Ilustrarea curbei ROC și a valorii AUC pentru modelul AHP aplicat în bazinul râului Sitna

5.3.1 Harta susceptibilității la alunecări de teren

Calcularea rezultatului final a oferit posibilitatea evidențierii zonelor unde alunecările de teren au predispoziția de a se dezvolta în viitor. Plaja de valori a susceptibilității la alunecări de teren în bazinul hidrografic Sitna poate fi observată în [Figura 46](#), unde stratul rezultat a fost reprezentat cartografic. Valorile obținute se situează în intervalul 1.21 - 4.23, fiind grupate în 5 clase prin utilizarea clasificării Natural Breaks (Jenks) din ArcMap.

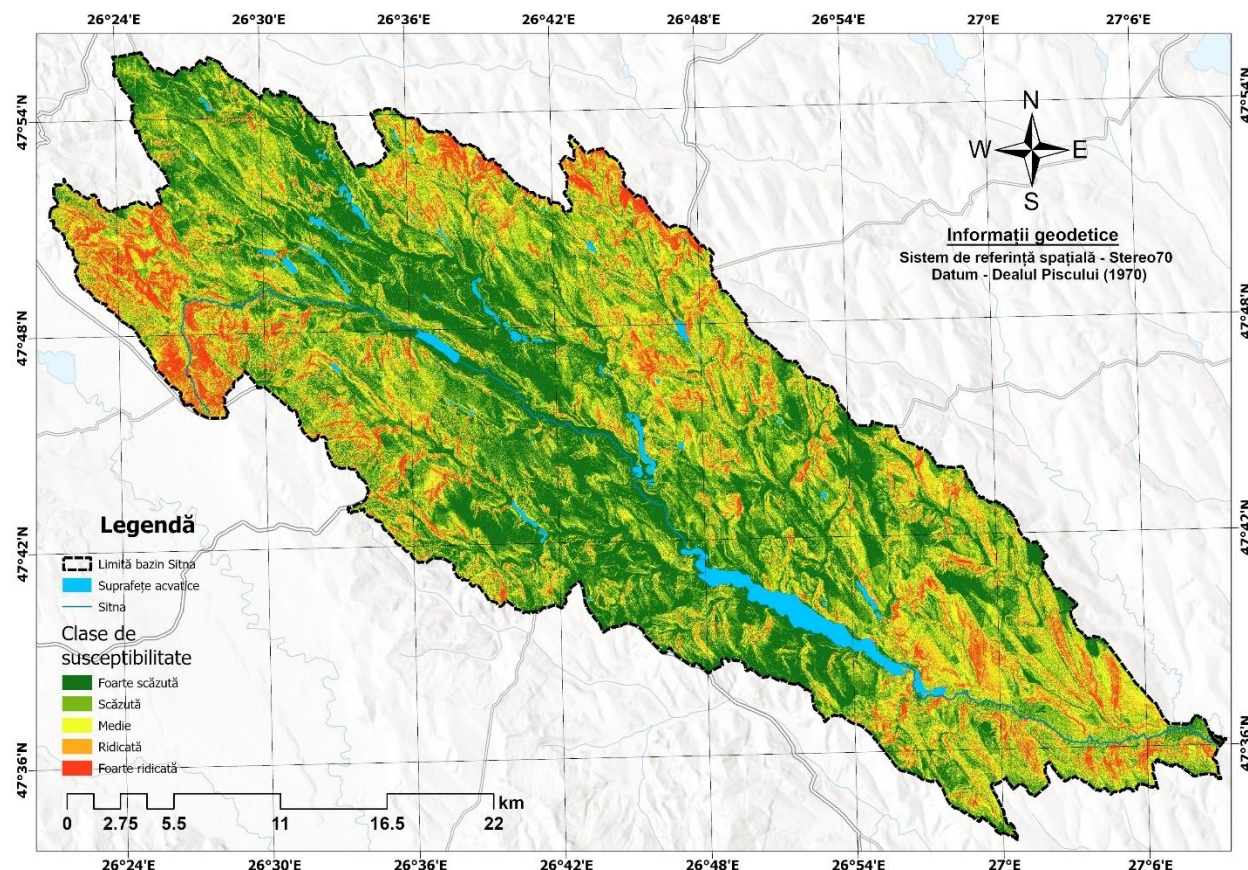


Figura 22 - Harta susceptibilității la alunecări de teren în bazinul hidrografic al râului Sitna

Privind zona de studiu în ansamblu, harta susceptibilității la alunecări de teren evidențiază faptul că un procentaj de 32.27% (302.64 km²) din suprafața totală a zonei de studiu este clasificată ca înregistrând valori foarte scăzute ale susceptibilității, urmat de un procentaj de 28.07% (263.20 km²) care înregistrează valori scăzute și 23.70% (222.26 km²) cu valori medii ale susceptibilității. Zonele cu valori ridicate cumulează un procentaj de 8.27% și acoperă o suprafață de 77.53 km². Restul de 7.70% (72.19 km²) este reprezentat de valori foarte ridicate ale susceptibilității la alunecări de teren.

5.4 Concluzii

În cazul bazinului hidrografic al râului Sitna, parametrii considerați și metoda de calcul au reușit să genereze un rezultat satisfăcător, care are un scor AUC de 0.821, fiind considerat foarte bun și care întărește astfel validitatea modelului aplicat. Nu în ultimul rând, harta finală poate oferi un punct de reper solid în legătură cu zonele predispuse la fenomene de risc geomorfologic de tipul alunecărilor de teren în bazinul hidrografic Sitna, ce poate servi autorităților competente în scopul planificării durabile a modului de utilizare a terenului precum și managementului stabilității versanților în zonele expuse riscului analizat.

CAPITOLUL 6 – EVALUAREA SUSCEPTIBILITĂȚII LA ALUNECĂRI DE TEREN PRIN APLICAREA ALGORITMUL DE ÎNVĂȚARE AUTOMATĂ SVM (SUPPORT VECTOR MACHINE) ÎN BAZINUL HIDROGRAFIC SITNA, BOTOȘANI, ROMÂNIA

6.1 Introducere

Modelul SVM este frecvent utilizat pentru generarea distribuției valorilor de susceptibilitate într-o zonă dată, mulțumită algoritmilor avansați care îl compun, a eficienței prin care sunt realizate calculele computerizate precum și a rezultatelor oferite atât prin utilizarea de sine stătătoare cât și prin comparație cu alte modele de învățare automată folosite în domeniu ([Ado et al., 2022](#)).

Luând în considerare capacitățile modelului precum și rezultatele generate în urma aplicării acestuia în spații geografice diferite la nivel global ([Huang & Zhao, 2018](#); [Mohamed et al., 2023](#)), ținta studiului de față este așadar antrenarea și aplicarea acestui model de calcul bazat pe inteligență artificială în bazinul hidrografic Sitna, pentru a evidenția în primul rând performanțele modelului și aplicabilitatea acestuia precum și pentru a evalua zonele susceptibile la alunecări de teren. Finalitatea studiului este dată de validarea statistică a modelului precum și reprezentarea cartografică a rezultatelor.

6.2 Metodologie și date utilizate

Realizarea fluxului complet pentru aplicarea algoritmului de calcul SVM a presupus o serie de pași pentru generarea unui rezultat relevant, care să evidențieze susceptibilitatea la alunecări de teren pentru bazinul hidrografic al râului Sitna. La nivel metodologic, întregul flux de lucru poate fi împărțit în trei mari pași și anume: generarea factorilor cauzali, producerea setului de date de analiză și selectarea celor mai relevanți factori și în final, antrenarea modelului și predicția fenomenului analizat. Fluxul schematic este prezentat mai în detaliu în [Figura 47](#).

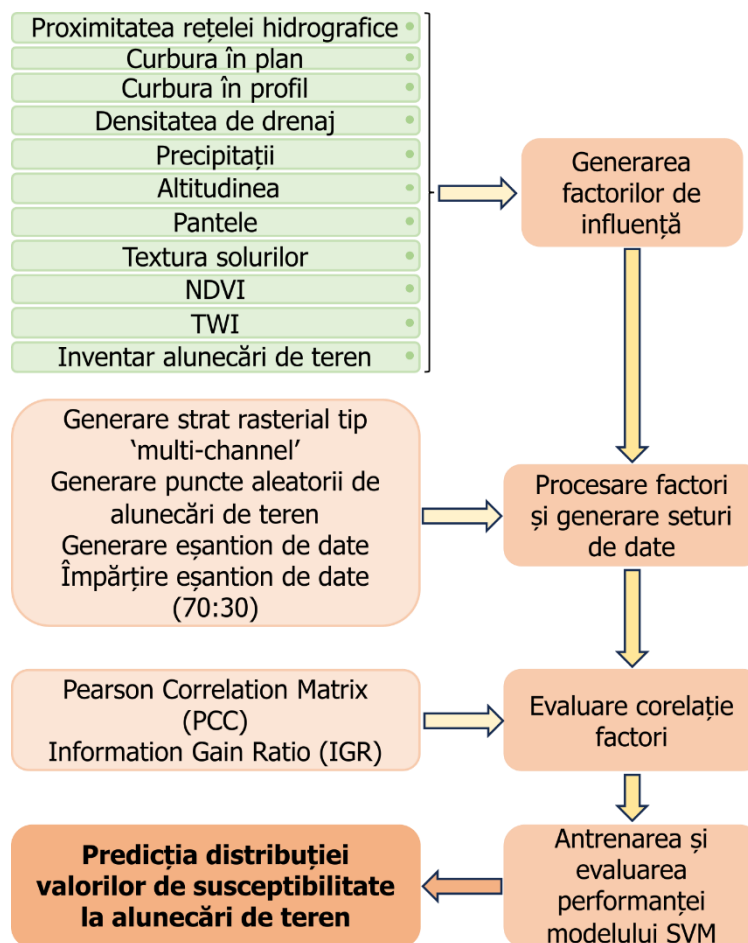


Figura 23 - Schema metodologiei SVM aplicate pentru bazinul hidrografic al râului Sitna

6.2.1 Inventarul alunecărilor de teren

Primul pas înainte de demararea analizei a constat în pregătirea bazei de date care a servit drept suport în aplicarea modelului SVM. Această etapă a constat în utilizarea Google Earth pentru suport imagistic actualizat precum și derivate rasteriale dintr-un model numeric al terenului cu rezoluția de 1m/px pentru identificarea de alunecări de teren în bazinul hidrografic Sitna. Folosind aceste suporturi, au fost identificate un număr de 202 alunecări de teren, fiind preluate în GIS sub formă de puncte. În baza acestui eșantion, a fost generate ulterior un set de date conținând același număr de puncte, folosind o zonă tampon de 1000 m (Ado et al., 2022; Guo et al., 2024). Ambele eșantioane servesc în evaluarea eficienței datelor de intrare precum și la antrenarea modelului.

6.2.2 Determinarea factorilor

Pentru acest studiu, inițial s-au luat în considerare un total de 14 factori identificați ca având contribuții în influențarea procesului de alunecări de teren. Aceștia au fost: aspectul, curbura generală, densitatea de drenaj, NDVI, curbura în plan, precipitațiile, curbura în profil, proximitatea drumurilor, pantele, textura solurilor, proximitatea rețelei hidrografice și indicele de umiditate topografică (TWI).

În baza rezultatului analizei de senzitivitate realizată folosind coeficientul de corelare Pearson (Pearson Correlation Coefficient - PCC) și indicele de aport informațional (Information Gain Ratio – IGR) (Kalantar et al., 2019; Huang et al., 2022; Ali & Saeed, 2023) cei 14 factori au fost reduși la un număr de 10 (Figurile 48, 49).

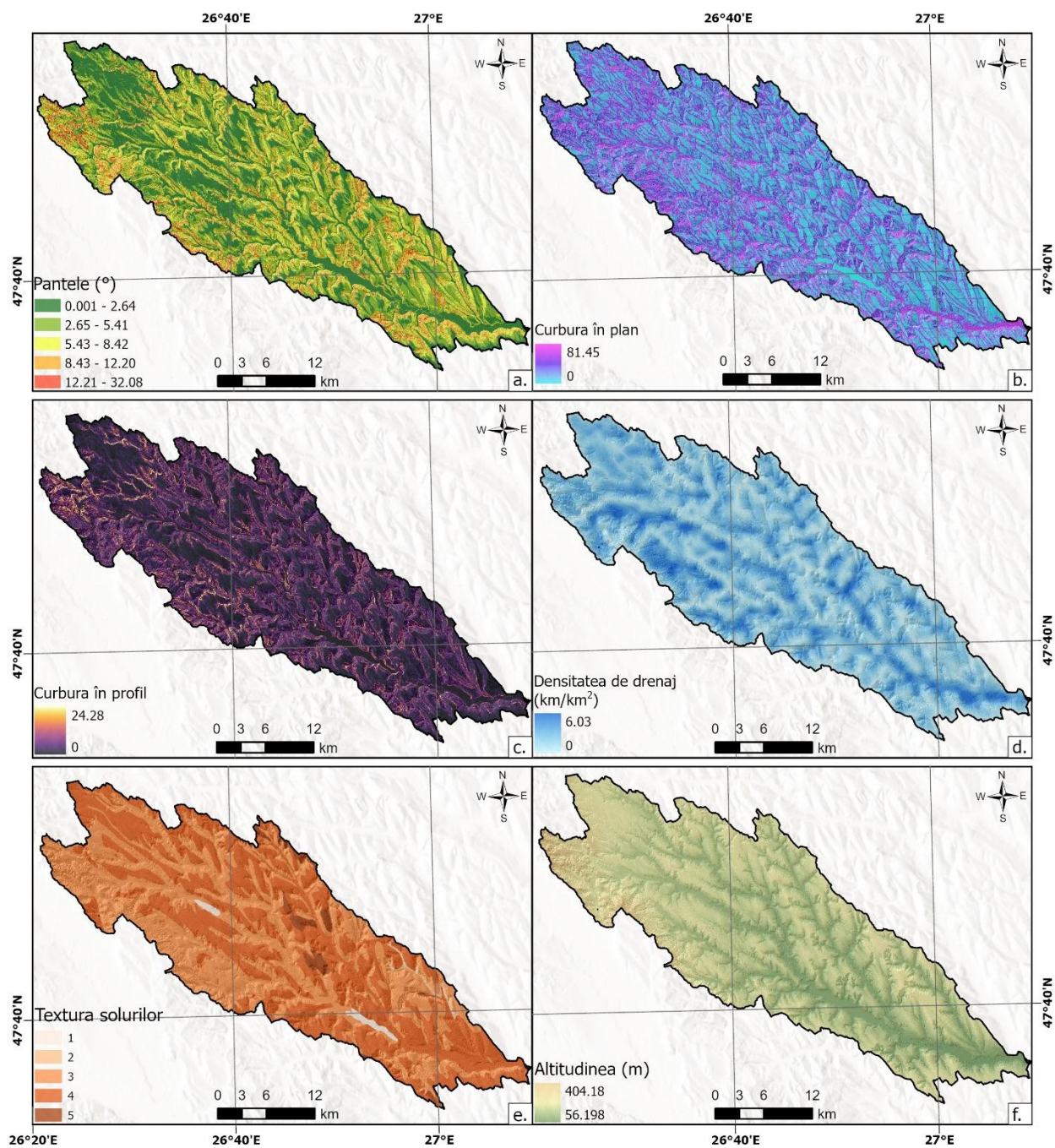


Figura 24 - Variabilele de intrare pentru modelul de calcul SVM (a – Pantele, b – Curbura în plan, c – Curbura în profil, d – Densitatea de drenaj, e – Textura solurilor, f – Elevația)

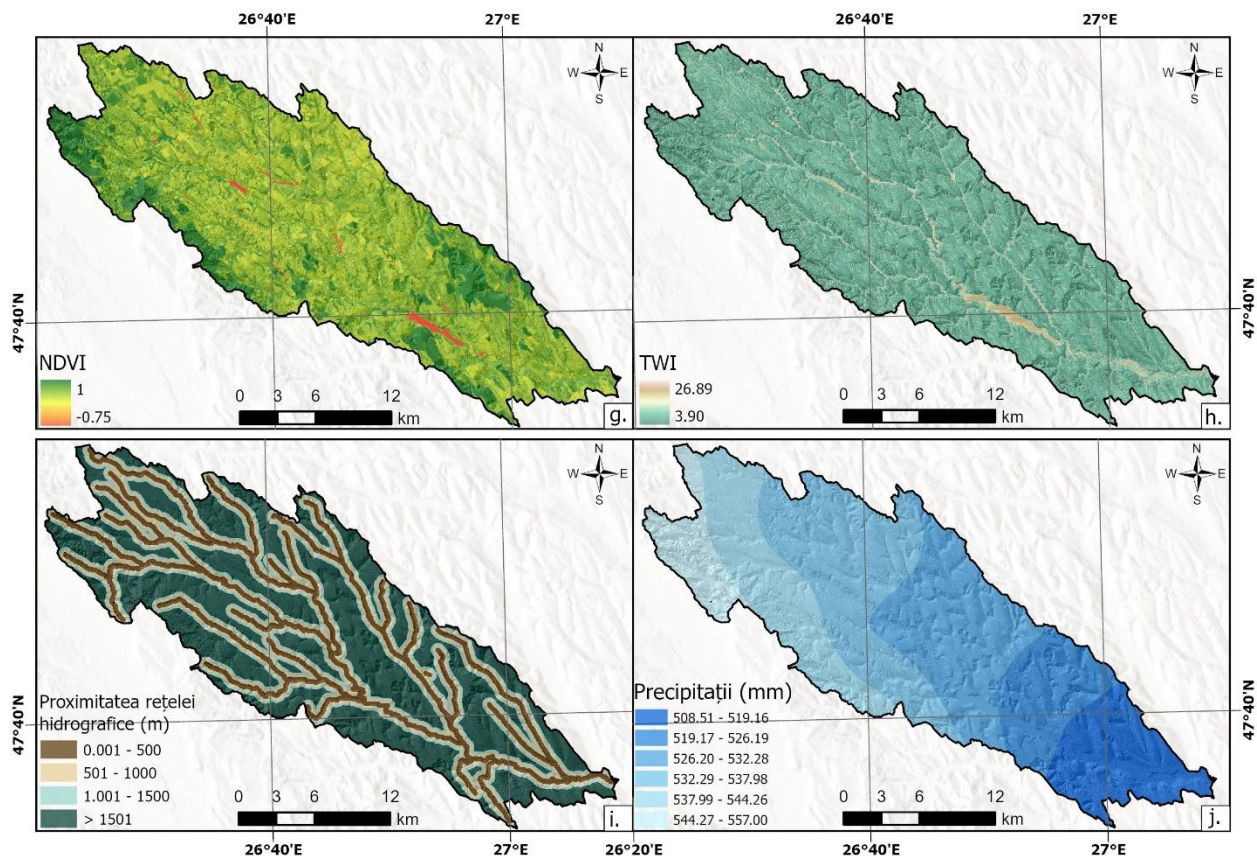


Figura 25 - Variabilele de intrare pentru modelul de calcul SVM (g – NDVI, h – TWI, i – Proximitatea rețelei hidrografice, j – Precipitațiile medii multianuale)

6.2.3 Normalizarea factorilor

Pentru normalizarea straturilor de intrare a fost aplicat procedura de normalizare MinMax, pe o scară de la 0 la 1, conform expresiei de mai jos ([Wang & Huang, 2009](#); [Bui et al., 2012](#)):

$$v' = \frac{v - \text{Min}(v)}{\text{Max}(v) - \text{Min}(v)} (U - L) + L \quad (10)$$

unde v' este matricea datelor normalizate, v este matricea datelor originale iar U și L sunt limitele superioare și inferioare ale rezultatului.

6.2.4 Secționarea setului de date (*dataset split*)

Anterior evaluării greutății fiecărui factor de intrare în modelul de calcul, algoritmul SVM necesită generarea unui șablon în baza căruia acesta va fi ulterior antrenat. Folosind atât inventarul alunecărilor de teren precum și setul de puncte aleatorii, generic denumit „puncte non-alunecare”,

acest set de date a fost segregat în mostre de antrenare (training samples) și mostre de testare (test samples) în proporție de 7:3.

Rezultatul acestui proces a generat un bloc de date format din 10 canale, 8 rânduri și 8 coloane, care cantonează o sumă de 282 de imagini în setul de antrenare și 122 imagini în setul de testare, din care datele cuprinse de inventarul alunecărilor este marcat cu 1, în timp ce setul de puncte non-alunecare este marcat cu 0.

6.2.5 Importanța factorilor în cadrul modelului SVM

Pentru acest studiu, indicii PCC și IGR au fost adoptați pentru evaluarea contribuției fiecărui factor în parte.

Coeficientul PCC este exprimat matematic în baza formulei de mai jos (Kirch, 2008):

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

Unde:

r = coeficientul de corelație

x_i = valoarea variabilei x într-o mostră de date

$\bar{x}$ = media valorilor variabilei x

y_i = valoarea variabilei y într-o mostră de date

$\bar{y}$ = media valorilor variabilei y

Coeficientul IGR este exprimat matematic astfel (Bui et al., 2016):

$$IGR(Y, L_i) = H(Y) - H(Y|L_i) \quad (12)$$

unde $H(Y)$ este entropia valorii Y_i și este calculată folosind ecuația 13; $H(Y|L_i)$ este entropia lui Y după asocierea valorilor factorului condițional L_i și este estimată folosind ecuația 14.

$$H(Y) = -\sum P(Y_i) \log_2(P(Y_i)) \quad (13)$$

$$H(Y|L_i) = -\sum_i P(Y_i) \sum_j P(Y_i|L_i) \log_2(P(Y_i|L_i)) \quad (14)$$

unde $P(Y_i)$ este probabilitatea anterioară clasei Y iar $P(Y_i|L_i)$ este probabilitatea posterioară clasei Y date fiind valorile factorului condițional L_i .

6.2.6 Modelul de învățare automată SVM

Acest model de calcul se bazează pe modalitatea de transformare non-liniară a variabilelor de intrare și are capacitatea de a face diferențierea între clasele de date prin maximizarea distanței dintre clasele poziționate pe suprafața de decizie.

Al doilea element cheie implică modalitatea de transformare a modelului de date non-liniar folosind funcții nucleu (kernel functions), în cel mai potrivit model de date pentru o analiză dată (Yao et al., 2008; Naceur et al., 2022).

Setul de vectori de antrenament liniari separabili de tip x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) cu două clase, reprezentați de $y_i = \pm 1$ este necesar pentru modelul SVM în două clase. Ținta acestui model este prin urmare aceea de a identifica hiperplanul n -dimensional care discriminează între cele două clase date (Figura 50a). Aceste două clase sunt separate în n dimensiuni de către cea mai mare deviație ce poate fi exprimată matematic folosind ecuația 20 (Yilmaz, 2009; Roy et al., 2019; Guo et al., 2024):

$$\frac{1}{2} ||w||^2 \quad (15)$$

cu următoarea condiție:

$$y_i ((w \cdot x_i) + b) \geq 1 \quad (16)$$

unde w este hiperplanul separabil normal, b este un datum scalabil și $(\cdot)$ reprezintă o operație de multiplicare.

Folosind multiplicatorul Lagrangian, funcția de cost este exprimată astfel:

$$L = \frac{1}{2} ||W||^2 - \sum_{i=1}^n \lambda_i (y_i ((w * x_i) + b) - 1) \quad (17)$$

unde λ_i este multiplicatorul Lagrangian. Soluția poate fi atinsă prin minimizarea duală a ecuației 17, cu referință la w și b prin proceduri standard. Pentru cazul hiperplanului non-separabil (Figura

50b), elementul de constrângere poate fi modificat prin introducerea unei variabile *slack* de tipul ξ_i (Vapnik, 1995):

$$y_i ((w * x_i) + b) \geq 1 - \xi_i \quad (18)$$

iar ecuația 15 devine astfel după cum urmează:

$$L = \frac{1}{2} ||W||^2 - \frac{1}{vn} \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (19)$$

unde $v(0, 1)$ este introdus pentru a lua în considerare clasificările greșite (Schölkopf et al., 2000; Hastie et al., 2001; Lee et al., 2017).

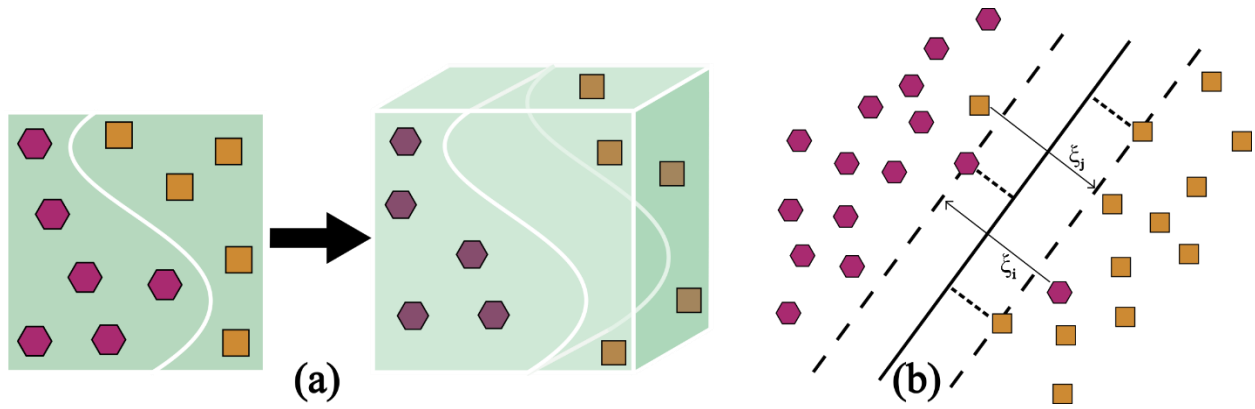


Figura 26 - Figuri explicative pentru principiul de funcționare al algoritmului SVM: (a) hiperplanul n-dimensional care diferențiază cele două clase prin unitatea de distanță maximă; (b) situație non-separabilă și modul de acționare a variabilei slack (preluată de la Lee et al., (2017) și modificată)

Pentru acest studiu s-a aplicat clasificatorul SVM dezvoltat de Huang et al. (2022) care utilizează un *kernel function* de tip RBF (radial basis function), cu parametrii de ajustat *gamma*, factorul de penalitate *C* și metoda de ajustare a parametrilor de tip *grid search algorithm*. Expresia matematică ce definește RBF este următoarea:

$$K(x_i, y_i) = e^{-\gamma(x_i - x_j)^2}, \gamma > 0 \quad (20)$$

unde γ , r și d sunt parametrii funcției RBF, care este unul dintre cele mai performante nuclee utilizate în prezent (Xu et al., 2012a; Pradhan, 2013; Lee et al., 2017).

În conformitate cu studii suplimentare privind acest subiect, care au presupus aplicații folosind SVM cu funcție nucleu tip RBF, acesta a oferit predicții de încredere în ceea ce privește valorile de susceptibilitate la alunecări de teren, în comparație cu alte funcții nucleu ((Xu et al., 2012b; Pourghasemi et al., 2013; Hong et al., 2015; Pham et al., 2020; Le Minh et al., 2023).

6.2.7 Evaluarea acurateții modelului SVM

Performanța algoritmului de calcul a fost evaluată folosind criterii statistice de verificare și curba ROC (AUC), bazate pe valorile pozitive (TP), valorile fals pozitive (FP), negative (TN) și fals negative (FN) (Guzzetti et al., 2006; Murakami & Mizuguchi, 2010). Acești indici statistici de verificare au fost calculați folosind formulele următoare:

$$\text{Acurate\cetea} = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (21)$$

$$\text{Senzitivitatea} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (22)$$

$$\text{Valoarea } F1 = \frac{2 * TP}{2*TP+ FP+FN} \quad (23)$$

$$\text{Precizia} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (24)$$

unde TP (true positive) reprezintă numărul de alunecări de teren corect clasificate, TN (true negative) este numărul de mostre de puncte non-alunecări clasificate corect, FP (false positive) este numărul de puncte incorect clasificate și FN (false negative) este numărul de non-alunecări incorect clasificate.

Matricea de Confuzie (Confusion Matrix) măsoară performanța unui model de clasificare prin evidențierea capacităților algoritmului într-un mod fundamental și intuitiv (He et al., 2023) folosind numărul de mostre de date corect sau incorect clasificate pentru fiecare categorie (TP, FN, FP și TN), unde valorile TP și FP indică o predicție corectă iar FN și TN o predicție incorectă a modelului. În baza acestor mostre, se poate calcula coeficientul Cohen (k), care reprezintă un indice scalar al acurateții unui model de calcul, cu largă aplicabilitate și utilitate în domenii precum statistică, învățare automată sau *data mining* (Cohen, 1960; Guzzetti et al., 2006), exprimat matematic pe baza formulei de mai jos:

$$k = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \quad (25)$$

unde P_o reprezintă suma mostrelor corect clasificate pentru fiecare clasă, împărțită la totalul mostrelor. Presupunând că numărul de mostre reale din fiecare clasă este $a_1, a_2 \dots a_m$ iar numărul

de mostre prezise din fiecare clasă este $b_1, b_2, \dots, b_m$ cu un total de n mostre, formula pentru P_e este exprimată astfel:

$$p_e = \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_m b_m}{n^2} \quad (26)$$

Curba ROC (AUC) este o metodă foarte utilă de a analiza performanța unui model de calcul și care ia valori pozitive între 0.5 și 1, modelul fiind cu atât mai performant cu cât valoarea se apropie de 1 (Zhao et al., 2024). Curba ROC este reprezentată grafic, cu axa orizontală definită de valorile FP iar cea verticală de valorile TP și exprimată prin formula următoare:

$$AUC = \frac{(\sum TP + \sum TN)}{(P + N)} \quad (27)$$

6.3 Rezultate și Discuții

6.3.1 Corelarea variabilelor de intrare

Figura 51 ilustrează corelarea variabilelor de intrare pentru modelul aplicat, pentru cei 10 factori luați în evidență dintre cei 14 considerați inițial. Potrivit acestora, variabilele cu cel mai ridicat grad de corelare sunt date de înclinarea reliefului și NDVI, ambele înregistrând un coeficient de 0.583, reprezentând totodată și valoarea maximă de corelație din modelul aplicat. Lipsa unui nivel de corelație semnificativ în modelul aplicat reiese tocmai din această valoare maximă, care este poziționată sub pragul de 0.7 (Zhao et al., 2024).

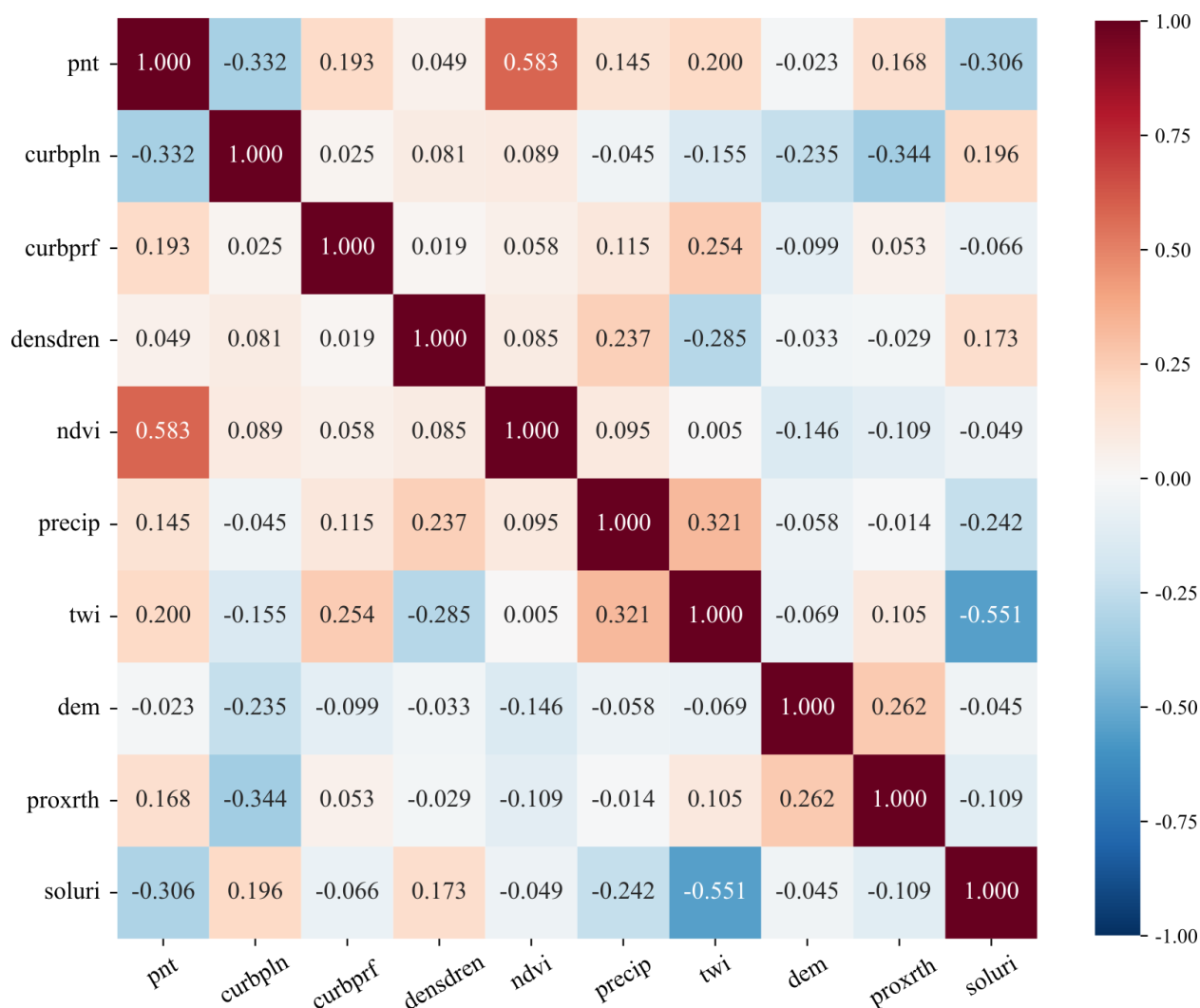


Figura 27 - Matricea coeficientului de corelare Pearson corespunzătoare variabilelor de intrare (pnt – Pante, curbpn – Curbura în plan, curbprf – Curbura în profil, densdren – Densitatea de drenaj, ndvi – Indicele de vegetație Normalizat, precip – Precipitațiile, twi – Indicele de umiditate topografică, dem – Modelul numeric al terenului, proxrth – Proximitatea rețelei hidrografice, soluri – Solurile)

În general, un model de calcul robust prezintă un grad scăzut de corelare între straturile de intrare și un grad ridicat de performanță și acuratețe (Tien Bui et al., 2016), după cum este cazul modelului prezent generat, ai cărui factori componenți se corelează între minima de -0.551 și maxima de 0.583.

Aportul variabilelor introduse a fost estimat și reprezentat grafic în Figura 52, folosind coeficientul IGR.

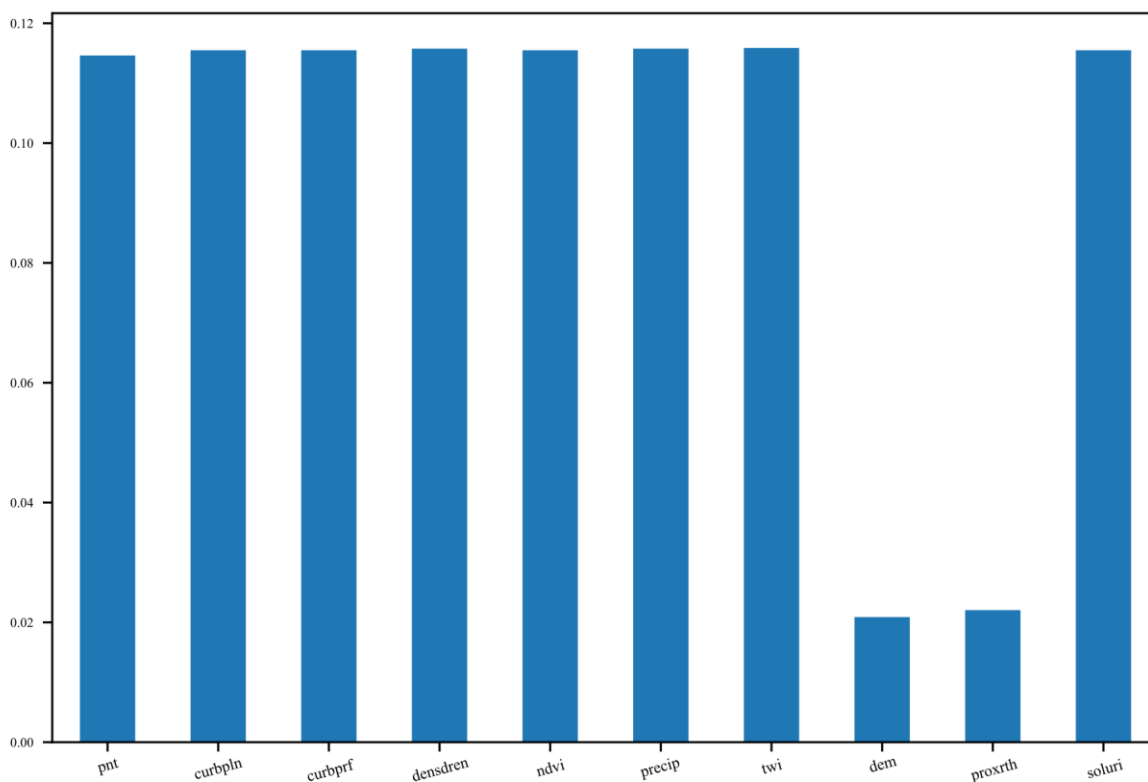


Figura 28 - Indicele de aport informațional (IGR) al modelului implementat pentru zona de studiu (pnt – Pante, curbpn – Curbura în plan, curbprf – Curbura în profil, densdren – Densitatea de drenaj, ndvi – Indicele de vegetație Normalizat, precip – Precipitațiile, twi – Indicele de umiditate topografică, dem – Modelul numeric al terenului, proxrth – Proximitatea rețelei hidrografice, soluri – Solurile)

6.3.2 Modelarea susceptibilității la alunecări de teren

Harta distribuției valorilor estimate de către modelul SVM pentru zona de studiu este reprezentată mai jos în [Figura 53](#).

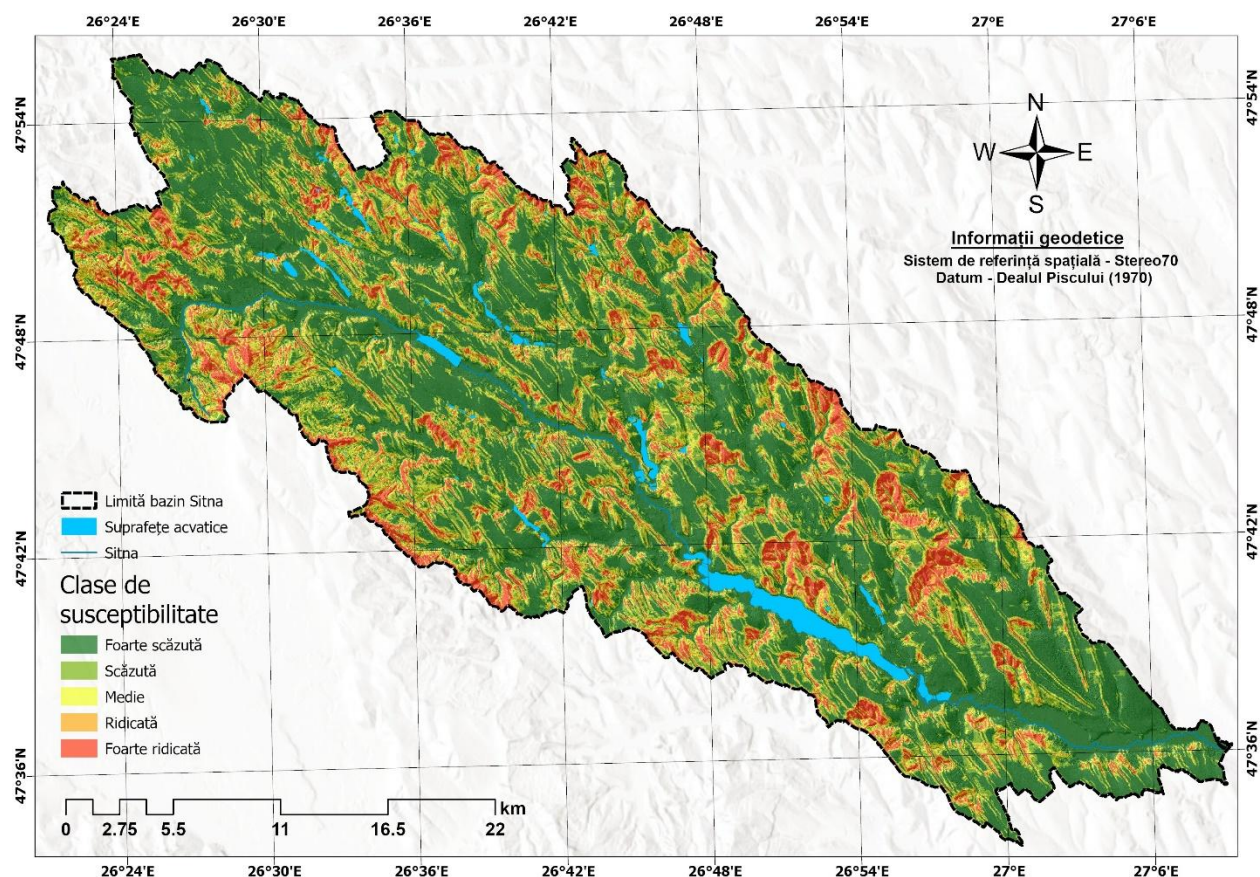


Figura 29 - Distribuția valorilor de susceptibilitate la alunecări de teren în bazinul hidrografic Sitna în urma aplicării modelului de calcul SVM

Analizând rezultatul final în ansamblu, harta susceptibilității la alunecări de teren evidențiază faptul că un procentaj de 47.73% (448 km²) din suprafața totală a zonei de studiu este clasificată ca înregistrând valori foarte scăzute ale susceptibilității, urmat de un procentaj de 20.01% (187.8 km²) care înregistrează valori scăzute și 12.67% (118.9 km²) cu valori medii ale susceptibilității. Zonele cu predicții ce au înregistrat valori ridicate cumulează un procentaj de 9.98% și acoperă o suprafață de 93.7 km² iar restul de 9.62% (90.3 km²) este reprezentat de valori foarte ridicate ale susceptibilității la alunecări de teren.

6.3.3 Evaluarea performanței modelului SVM

Nivelul de precizie înregistrat de modelul de calcul aplicat a fost evaluat în baza a 5 parametri statistici și anume acuratețea, precizia, senzitivitatea, valoarea F1 și curba ROC(AUC). În ceea ce privește mostrele de date implicate în testarea modelului, aplicarea unei matrici de confuzie (confusion matrix) a estimat că din cele 122 de imagini de test, un număr de 49 de

alunecări și 56 de non-alunecări au fost corect clasificate de către algoritm în timp ce 12 alunecări și 5 non-alunecări au fost incorect clasificate (Figura 54).

Parametrii statistici evidențiază o acuratețe de 0.86, o precizie de 0.82, o senzitivitate (recall) de 0.91, o valoare F1 de 0.86 și un coeficient Cohen (k) calculat la 0.72. În același timp, valoarea ariei de sub curbă (AUC) a fost calculată la 0.929 (Figura 55).

		Valori Reale	
		Pozitiv	Negativ
Valori Prezise	Pozitiv	TP 49	FP 12
	Negativ	FN 5	TN 56

Figura 30 - Matricea de confuzie a modelului SVM aplicat

Curba ROC (AUC) are capacitatea de a analiza în mod eficient performanța unui model de susceptibilitate la alunecări de teren și ia valori relevante între 0.5 și 1 (Yu et al., 2019; Xu et al., 2024). Estimarea pentru zona de studiu indică o performanță ridicată de predicție a modelului aplicat și un nivel ridicat de încredere în rezultatul calculului, anume distribuția valorilor de susceptibilitate la nivelul bazinului hidrografic Sitna.

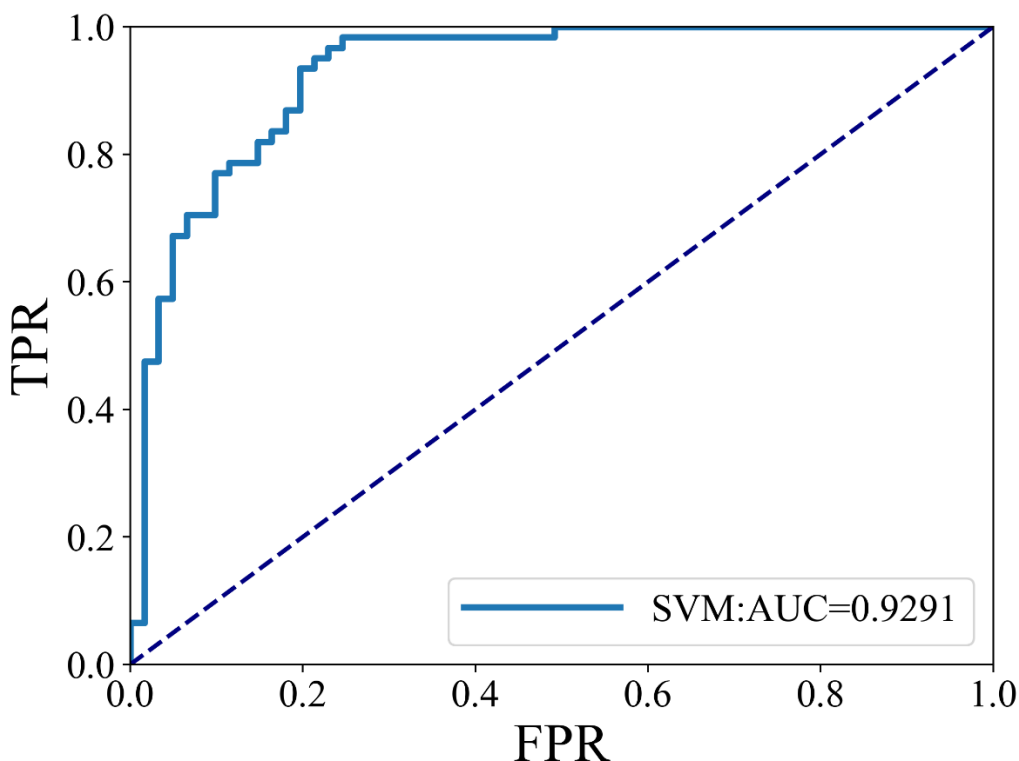


Figura 31 - Curba ROC și valoarea AUC pentru modelul rezultat

6.3.4 Discuții

Datele de intrare au constat din 10 straturi din cele 14 selecționate inițial, date care au fost validate folosind indicii PCC și IGR. Atât literatura de specialitate cât și experiența dobândită în acest studiu recomandă filtrarea factorilor redundanți pentru a nu aglomera blocul de date folosit ulterior de către modelul de predicție și a genera erori în stratul final.

Consultarea literaturii de specialitate evidențiază că în general, pentru modelele de învățare automată, validarea rezultatelor se realizează fie folosind indexul ROC(AUC) (împreună cu indecșii de acuratețe, de precizie, senzitivitate și valoare F1) fie indexul Cohen (k), ambii reprezentând metode de măsurare eficiente pentru modele de învățare automată. În cadrul acestui studiu s-a decis utilizarea amândurora pentru a putea evidenția performanța algoritmului din două perspective relativ diferite.

Dacă coeficientul ROC(AUC) a fost creat pentru a măsura abilitatea unui model de a diferenția între clasele de valori pozitive și negative (Spackman, 1989) și care s-a dovedit a fi un indice foarte bun pentru calcule statistice sau algoritmi de învățare automată, coeficientul Cohen (k) se concentrează pe măsurarea valorii acordului dintre evaluatori (inter-rater agreement) dincolo de acordul întâmplător (Obuchowski, 2003; Tang et al., 2015). Conform rezultatelor, datele generate în urma aplicării modelului SVM pentru studiul prezent indică un indice ROC(AUC) de aproape 0.93, o valoare remarcabilă conform scării de interpretare (Mandrekar, 2010) și un indice Cohen (k) de 0.72, ce indică o încredere substanțială între predicție și realitate (Sim & Wright, 2005).

6.4 Concluzii

În cadrul acestui studiu s-au utilizat un total de 10 factori condiționali normalizați și anume pantele, curbura în plan, curbura în profil, densitatea de drenaj, indicele NDVI, precipitațiile, Modelul Numeric al Terenului, proximitatea rețelei hidrografice și textura solurilor, selecționați folosind indecșii PCC și IGR. Inventarul alunecărilor de teren a cuprins un set de 202 înregistrări, care a fost ulterior secționat aleatoriu în două părți, urmărind principiul 7:3. Modelul de calcul aplicat a fost dat de clasificatorul SVM, utilizând un *kernel function* de tip RBF și o metodă de ajustare a parametrilor de tip *grid search algorithm*, care s-a dovedit a fi foarte eficientă atât din punct de vedere al resurselor consumate cât și al rezultatelor produse.

DISCUȚII FINALE

Disponibilitatea modelelor de calcul care să permită atât simularea eficientă cât și estimarea precisă a rezultatelor, folosind tehnologii digitale, poate reprezenta un progres științific real și o unealtă utilă pentru viitoare studii similare. Cazul aplicării unui astfel de model de calcul pentru simularea ruperii barajelor Cătămărăști și Drăcșani a evidențiat tocmai aceste două aspecte considerate cheie în această lucrare și anume, utilitatea unei metodologii computerizate precum și practicitatea acesteia, care denotă în final eficiență și precizie, în contextul validării modelului în diferite alte studii de caz de circulație largă în sfera științifică internațională.

Deși modelul de simulare a ruperilor de baraj pentru cele 2 studii de caz este în bună parte asemănător, aspectele diferă la implementarea acestora, din mai multe puncte de vedere. În ceea ce privește studiul de caz al Acumulării Cătămărăști, modelul aplicat este unul relativ simplu și bazat pe date de intrare de rezoluție ridicată, care a presupus modelarea unei singure breșe pentru generarea extinderii și adâncimii inundației rezultate și estimarea daunelor potențiale urmate acestui scenariu. Stabilizarea modelului de calcul nu a prezentat probleme mari, dată fiind și suprafața zonei de studiu și parametrii de intrare, care s-au concretizat în simulări singulare per iterație de calcul pentru generarea unui rezultat optim și precis. În cadrul acestui studiu de caz, rezultatele au fost pe măsură, fiind satisfăcătoare și oferind un discernământ consistent în ce privește dezvoltarea, ajustarea și aplicarea unei astfel de metodologii.

Prin comparație cu modelul aplicat pe Acumularea Cătămărăști, cel dezvoltat pentru Lacul Drăcșani a presupus un studiu mai riguros al principiilor de calcul hidraulic, o zonă de studiu sensibil mai mare ca suprafață, mai multe variabile de intrare și ieșire cât și validarea acestor rezultate pentru evidențierea performanței modelului de calcul. Stabilizarea modelului a prezentat dificultăți, în primul rând din cauza resurselor computaționale alocate incipient, în bună parte din cauză că în acest studiu de caz au fost rulate multiple simulări per iterație, în conformitate cu metodologia aplicată (un total de 12 breșe, deci 12 simulări per iterație) pentru elaborarea modelului optim de calcul. În consecință, rezultatele au fost foarte bune și au adus un plus de cunoaștere față de scenariul dezvoltat în cadrul Acumulării Cătămărăști, atât prin rezultate cât și prin metodologia aplicată, care în acest caz a fost mai avansată.

Bazinul hidrografic al râului Sitna a prezentat interes și din perspectivă geomorfologică, mai precis pentru utilizarea unor modele de calcul supervizat și/sau automatizat care să cuantifice spațial probabilitatea apariției și pregnanța manifestării fenomenelor de alunecare de teren. Dezvoltarea și aplicarea acestora a presupus atât o prelucrare riguroasă de date geospațiale precum și utilizarea de programe dedicate și, nu în ultimul rând, consultarea unei bibliografii relevante și însemnate, care să asigure un grad ridicat de precizie al rezultatelor generate. Deși aceste metode de calcul prezintă o serie de plusuri pentru utilizator, vin în același timp și cu o serie de minusuri, care deseori se traduc prin disponibilitatea resurselor necesare, fie că ne referim la date precise, cunoștințe sau resurse informatice.

Astfel de procedee au fost folosite pentru analiza vulnerabilității la alunecări de teren din zona de studiu, subiect abordat din două direcții metodologice și anume prin utilizarea unui model AHP (model de analiză ponderată asistat) și ulterior a unui model SVM (model de învățare automată).

Fiecare dintre cele două metode aplicate au oferit rezultate de încredere, conform indecșilor de validare statistică, cu diferențe vizibile în modalitatea de implementare cât și rezultatele generate de acestea. Dacă modelul AHP oferă o libertate mai mare utilizatorului de a folosi judecata de specialitate pentru determinarea ponderii factorilor de intrare dar o dificultate mai mare în dezvoltarea unui model relevant statistic, modelul SVM asistă utilizatorul în desemnarea greutății variabilelor de intrare cu un efort relativ minim din partea acestuia și o dificultate redusă în crearea unui model precis. Totodată, un model SVM este complex iar orice element complex necesită resurse însemnate și cunoștințe amănunțite.

Dacă s-ar încerca o comparație între cele două procedee de calcul, diferențele dintre rezultatele generate prin aplicarea metodei AHP pe de o parte și SVM pe de altă parte nu sunt foarte mari, însă sunt sesizabile, acestea fiind în bună măsură cauzate de principiile de alcătuire și funcționare a fiecărui algoritm în parte precum și de modalitatea de aplicare a acestora și de variabilele de intrare corespunzătoare fiecăruia.

Spre exemplu, algoritmul AHP ia în considerare atât date în format digital relevante pentru zona dată cât și expertiza supervisorului în evaluarea importanței fiecărei variabile introdusă în analiză. Acestea fiind spuse, faptul că există scoruri mai ridicate pentru clasele de mijloc (Scăzută

și Medie) față de cealaltă metodă aplicată și scoruri mai scăzute pentru restul de clase, evidențiază faptul că în cadrul zonei de studiu, pantele au fost evaluate ca având cel mai important rol în influențarea producerii unor fenomene de alunecare. Alăturându-se ponderile unor alte variabile precum textura solurilor și precipitațiile, precum și distribuția spațială a acestor variabile și a celorlalte luate în considerare, se poate concluziona faptul că aceste diferențe există din cauza modalității AHP de a calcula sumele acestor ponderi și de a le evidenția spațial dar și din cauza interferenței subiectivității supervisorului în analiză.

Tabelul 7. Tabel comparativ privind rezultatele aplicării metodologiilor AHP și SVM. Suprafețele corespunzătoare claselor de vulnerabilități și procentajul din suprafața totală a bazinului hidrografic Sitna.

Clasă de vulnerabilitate	AHP		SVM	
	Km ²	%	Km ²	%
Foarte scăzută	306.64	32.27	448	47.73
Scăzută	263.2	28.07	187.7	20.01
Medie	222.26	23.7	118.9	12.67
Ridicată	77.53	8.27	93.7	9.98
Foarte ridicată	72.19	7.7	90.3	9.62

În același timp, metodologia AHP presupune o liniaritate în relația dintre variabilele de intrare precum și o clasificare relativă a acestora, nefiind capabil să compenseze în ceea ce ar presupune predictibilitatea de valori noi, cum este de altfel în cazul algoritmului SVM, care presupune o relație non-liniară între variabile și are o capacitate ridicată de prezicere a unor valori noi.

Făcând referire la [Tabelul 8](#), faptul că valorile însumate ale suprafețelor corespunzătoare claselor de vulnerabilitate cuprind aproape 3 sferturi (67.74%) din zona de studiu în ceea ce privește rezultatul generat de SVM comparativ cu 60.34% pentru cel generat de AHP indică faptul că algoritmul SVM reușește să țină cont atât de variabilele de intrare precum și de datele istorice referitoare la alunecările de teren din zona de studiu, care în modelul AHP nu au fost incluse. Dacă pentru clasa 3 (Medie) suprafața corespunzătoare este de 23.7% din total în cazul AHP comparativ cu 12.67% în cazul SVM, diferența dintre procente se poate explica prin preferința AHP de a reprezenta anumite clase de pantă (cuplate cu alte variabile cu pondere ridicată) ca fiind susceptibile la a influența mai mult posibilitatea producerii de alunecări de teren, în timp ce modelul SVM reușește să extrapoleze valori noi acolo unde condițiile sunt asemănătoare cu cele

date de variabilele de intrare și datele istorice, reușind astfel să restrângă plaja de valori la zone mai relevante din punct de vedere statistic fără să țină cont doar de relația sau ponderea dintre variabile, cum s-ar putea remarca foarte bine în cazul modelului AHP.

Pe lângă diferențele dintre valorile de suprafață însemnată și procente din totalul suprafeței bazinului hidrografic, diferențe se pot observa și în ceea ce privește distribuția spațială a valorilor de susceptibilitate. Spre exemplu, dacă AHP evidențiază valori de susceptibilitate în clasa 3 (Medie) în zone unde pantele au valori scăzute, modelul SVM evidențiază valori în clasele 1 și 2 (Foarte Scăzută și Scăzută). Dacă sectorul central al bazinului este mai slab reprezentat de către valori ridicate ale susceptibilității conform AHP (bună parte cauzată de complementaritatea ponderilor în acea zonă), modelul SVM le reprezintă chiar foarte bine, mai ales în zone unde ravenele au o dezvoltare generoasă sau în zona cornișelor de desprindere în ce privește relieful de cuestă. În aceeași manieră, sectorul inferior al bazinului hidrografic se poate remarca printr-o reprezentativitate mai mare în zona valorilor clasei 3 (medie) comparativ cu modelul SVM, care restricționează reprezentarea claselor relevante de susceptibilitate la nivelul ravenelor și versanților mai pronunțați.

Totuși, în ciuda acestor diferențe, chiar dacă există deosebiri semnificative și la nivelul validărilor statistice dintre cele două metodologii de calcul (modelul SVM prezintă aproximativ +10% grad de încredere comparat cu AHP, cel din urmă având un scor de încredere de 0.821 ROC AUC, în timp ce modelul SVM are un coeficient de 0.929 ROC AUC), rezultatele celor două sunt destul de apropiate, atât ca reprezentare a plajelor de valori de susceptibilitate cât și ca distribuire spațială a acestora, dar bineînțeles, cu diferențele de rigoare, date în mare măsură de principiile de formulare și aplicabilitate a acestor două modele de calcul.

În mod evident, cele două modele de calcul implementate pot fi aplicate în funcție de caz și pot genera rezultate de calitate, fiecare în dreptul lui, în conformitate cu zona de studiu dată și necesitatea utilizatorului. O comparație directă însă, pentru stabilirea gradului de eficiență a fiecărui model în parte ar fi dificil de efectuat, acest aspect putând fi evidențiat în primul rând de diferențele metodologice cât și de principiile de validare statistică a variabilelor de intrare și nu în ultimul rând a rezultatelor produse de fiecare.

Urmând aceeași idee, o recomandare de utilizare a unui model peste celălalt ar fi din nou puțin relevantă, deoarece dacă fiecare model are dezavantaje unul față de celălalt, în mod sigur are și avantaje și, în același timp, este foarte dificilă realizarea unei comparații riguroase între două modele de calcul care sunt în speță diferite.

Concret, dacă s-ar încerca alegerea unei metodologii implementate în detrimentul celeilalte, în ceea ce privește componenta geomorfologică abordată, s-ar omite din start beneficiile celei desconsiderate, care, probabil, ar putea aduce un plus de cunoaștere în studiul unei zone date. Astfel de metodologii pot oferi rezultate consistente cu nevoia utilizatorului însă așteptarea ca o metodă anume să cuantifice și să reprezinte cel mai bine un fenomen ar putea fi anevoioasă. În ceea ce privește metodologiile AHP și SVM, o strategie mai bună decât aceea de a le compara pentru a evalua care din ele ar fi cea mai potrivită, este aceea că ambele metode pot fi luate în considerare pentru a ajunge la o concluzie mai precisă. Pe deoparte, AHP poate integra judecata expertului cu învățarea automată dată de SVM, pentru a contracara slăbiciunile celor două metode, deoarece dacă AHP introduce subiectivitatea în analiză, SVM introduce obiectivitatea și o abordare bazată mai consistent pe date (data driven).

Luată laolaltă, existența acestor metodologii de calcul computerizat, aplicate pe o componentă hidrologică pe de o parte și pe cea geomorfologică pe de altă parte, poate fi considerată indispensabilă în prezent iar eficiența acestor procedee de analiză, evaluare și estimare sunt considerate foarte importante și relevante din punct de vedere științific și bineînțeles practic, cu atât mai mult cu cât disponibilitatea datelor de rezoluție ridicată este din ce în ce mai însemnată iar nevoia unor astfel de studii, din ce în ce mai necesară.

Ca ultimă trecere în revistă a rezultatelor obținute în cadrul tezei de doctorat, într-o manieră cartografică, rezultatele finale obținute în cadrul celor 4 analize au fost agregate într-o singură hartă ([Figura 56](#)), pentru scopul de a facilita comparația și interpretarea lor spațială și bineînțeles, pentru a avea o priveliște completă asupra rezultatelor, într-o singură figură. Această modalitate integrată evidențiază extinderile maximele ale inundațiilor obținute în cadrul fiecărei metodologii de rupere de baraj aplicate, și clasele de susceptibilitate ridicată și foarte ridicată la alunecări de teren.

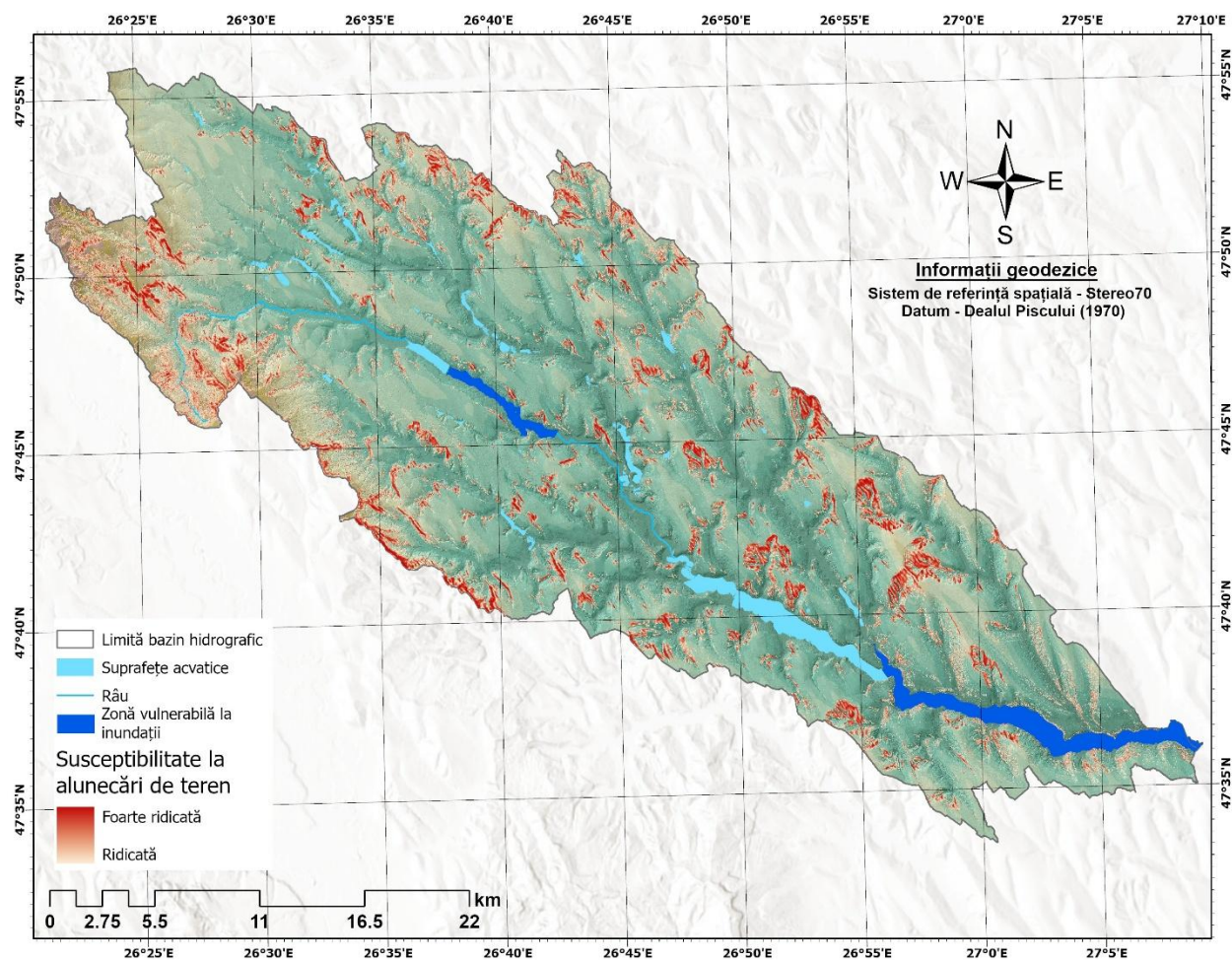


Figura 32 - Repartiția extinderilor maxime ale inundațiilor simulate pentru scenariile de rupere de baraj a Acumulării Cătămărăști și a Lacului Drăcșani, precum și a celor mai importante două clase (Ridică și Foarte Ridică) de susceptibilitate la alunecări de teren, pentru metodologiile aplicate (AHP și SVM) în cadrul bazinului hidrografic Sitna

CONCLUZII FINALE

Direcțiile de cercetare și analiză expuse în cadrul acestei lucrări au atins obiectivul principal formulat și anume utilizarea datelor de înaltă rezoluție cuplate cu metodologii de calcul noi pentru a putea evidenția zonele expuse la riscuri hidro-geomorfologice din arealul bazinului hidrografic al râului Sitna.

În baza metodologiilor descrise în detaliu în capitolele 3 și 4 au fost evidențiate și cartografiate inundațiile generate de ruperea ipotetică a barajelor Cătămărăști și Sulița și au fost identificate variabilele necesare utilizării rezultatelor ca suport de decizie sau suport ajutător în luarea de decizii de către diverse corpuri sau instituții cu influență în acest sens, pentru planificări de strategii sau direcții de acțiune în eventualitatea iminenței unor astfel de dezastre.

Capitolele 5 și 6 detaliază două metodologii de analiză și estimare a distribuției spațiale a valorilor de susceptibilitate la alunecări de teren. Acestea scot în evidență zonele predispuse la a fi afectate de alunecări de teren, pe baza unei serii de factori determinanți evaluați și luați în considerare. Ambele metodologii au fost validate iar rezultatele au fost în consecință reprezentate cartografic, rezultând în ambele situații zonele cele mai predispuse la a fi afectate de procese de alunecare.

Cumulate, rezultatele obținute aduc un plus de cunoaștere consistent atât în ce privește tipologia riscurilor analizate și metodologiile prin care se pot trata precum și evidențierea ulterioară a zonele vulnerabile. Pentru zona de studiu, exceptând cele menționate deja, rezultatele generate îmbogățesc bagajul de cunoaștere științifică necesar pentru aprecieri mai detaliate asupra caracteristicilor bazinului, atât din punct de vedere geografic cât și din perspectiva riscurilor naturale și a analizării impactului teoretic al acestora folosind metodologii GIS moderne și pun în același timp bazele pentru viitoare cercetări, folosind mijloace mai performante și de precizie mai ridicată decât cele deja aplicate în această lucrare.

LISTĂ DE FIGURI

Figura 1 – Hazard, vulnerabilitate și risc (preluată și adaptată după: pubs.usgs.gov/fs/2011/3008/).. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 2 – Vedere satelitară a barajului Kakhovka, Ucraina, la data de 6 Iunie, 2023 (Sursa: <https://www.axios.com/2023/06/06/un-ukraine-russia-dam-collapse-monumental-catastrophe>. Accesat la data de 19.10.2024)..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 3 – Vedere satelitară a barajului Alau, Nigeria, la data de 11 Septembrie 2024 (Sursa: <https://www.bbc.com/news/articles/cy0r0jnp254o>. Accesat la data de 20 Octombrie 2024)..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 4 – Răspunsul tipic al alunecărilor fosile la scurgerile de debite: **stânga** – alunecare translațională, **dreapta** – alunecare rotațională (preluată după Guo, Cui, Qin, & et al., 2022 și modificată) **Error! Bookmark not defined.**

Figura 5 – Distribuția spațială a alunecărilor de teren în Podișul Moldovei: **1**- alunecări rotaționale; **2** – alunecări translaționale; **3** – scurgeri de pământ; **4** – răspândiri laterale (lateral spreads); **41 și 42** – alunecări de teren complexe (preluată după Mărgărint & Niculiță, 2016)..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 6 - Localizarea geografică a bazinului hidrografic Sitna (**a** – localizarea bazinului râului Jijia în cadrul României; **b** – încadrarea bazinului râului Sitna în bazinul Jijiei; **c** – privire generală asupra bazinului râului Sitna)..... 17

Figura 7 - Unitățile de relief cuprinse în suprafața bazinului hidrografic Sitna (prelucrare după Grigore Posea și Lucian Badea, 1984) 18

Figura 8 - Distribuția comunelor în cadrul bazinului hidrografic Sitna..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 9 - Rețeaua rutieră din cadrul bazinului hidrografic Sitna (sursa: <https://www.geofabrik.de>) . **Error! Bookmark not defined.**

Figura 10 - Harta geologică a bazinului hidrografic Sitna (după Comitetul de Stat al Geologiei, 1968, harta 1:200 000) 20

Figura 11 - Harta valorilor și distribuției pantelor în cadrul bazinului hidrografic al râului Sitna 21

Figura 12 - Harta orientării versanților din cadrul bazinului hidrografic al râului Sitna ... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 13 - Graficul distribuției expoziției versanților în cadrul bazinului hidrografic al râului Sitna **Error! Bookmark not defined.**

Figura 14 - Harta adâncimii fragmentării reliefului din cadrul bazinului hidrografic al râului Sitna.. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 15 - Distribuția valorilor precipitațiilor medii multianuale în cadrul bazinului hidrografic al râului Sitna, pentru intervalul anilor 1950 - 2020 (sursa: ecad.eu) **Error! Bookmark not defined.**

Figura 16 - Debitele medii multianuale înregistrate la stația hidrometrică Drăcșani (1950 – 2017)... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 17 - Debitele medii multianuale înregistrate la stația hidrometrică Todireni (1950 – 2017) ... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 18 - Debitele maxime la stația hidrometrică Drăcșani (1978 – 2017)**Error! Bookmark not defined.**

Figura 19 - Debitele maxime la stația hidrometrică Todireni (1953 – 2017) **Error! Bookmark not defined.**

Figura 20 - Rețeaua hidrografică a râului Sitna, ierarhizată conform Horton-Strahler..... 23

Figura 21 - Densitatea rețelei de drenaj în bazinului hidrografic al râului Sitna	Error! Bookmark not defined.
Figura 22 - Distribuția corpurilor de apă în bazinului hidrografic al râului Sitna	Error! Bookmark not defined.
Figura 23 - Distribuția solurilor (scara 1:200 000) în bazinului hidrografic al râului Sitna	Error! Bookmark not defined.
Figura 24 - Textura solurilor din bazinului hidrografic al râului Sitna.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 25 - Modul de utilizare al terenului în bazinului hidrografic al râului Sitna (adaptat după Corine Land Cover 2018)	Error! Bookmark not defined.
Figura 26 - Localizarea geografică a bazinului hidrografic și a zonei de studiu în cadrul văii râului Sitna	25
Figura 27 - Schiță în plan a barajului Lacului Cătămărăști (preluată de la Balan, Balan, & Musteață, 2014) și modificată	Error! Bookmark not defined.
Figura 28 - Schema metodologică a pașilor de lucru aplicată pentru simularea ruperii de baraj folosind HEC-RAS	26
Figura 29 - Geometria de intrare pentru simularea ruperii de baraj folosind HEC-RAS...	Error! Bookmark not defined.
Figura 30 - Schema și parametrii definiți pentru scenariul de rupere de baraj	Error! Bookmark not defined.
Figura 31 - Privire de ansamblu asupra inundației rezultate în urma simulării ruperii barajului Cătămărăști	27
Figura 32 - Extinderea inundației rezultate în urma simulării ruperii barajului Cătămărăști precum și evidențierea construcțiilor vulnerabile din Municipiul Botoșani și Comuna Răchiți	28
Figura 33 - Adâncimea inundației simulate în cadrul UAT Botoșani și Răchiți	29
Figura 34 - Localizarea Lacului Drăcșani și a sectorului de râu pentru care a fost efectuat studiul (între Lacul Drăcșani și confluența cu râul Jijia).....	32
Figura 35 - Metodologie simplificată aplicată pentru analiza comparativă a ruperii de baraj	33
Figura 36 - Schița în profil transversal a barajului Sulița (sursa: Planul Județean de Urgență Botoșani, 2006)	Error! Bookmark not defined.
Figura 37 - Adâncimea apei în vecinătatea breșei barajului, pentru toate scenariile simulate	37
Figura 38 - Viteza apei și timpul de sosire pentru breșele reprezentative de 1%, 10% și 100%	38
Figura 39 - Scenariul cel mai nefavorabil (stânga) și cel mai favorabil (dreapta) privind poziționarea zonelor construite în aria de studiu (simularea de 100%)	39
Figura 40 - Distribuția utilizării terenului și suprafețele totale afectate per categorie, pentru breșa de 100%	40
Figura 41 - Hidrografele debitelor în secțiunile transversale din amonte (a) și aval (c) cu valorile adâncimilor asociate (b și d)	42
Figura 42 - Parametri considerați pentru aplicarea modelului AHP (a – Pantele, b – Expoziția, c – Curbura, d – Utilizarea terenului, e – Textura solului, f – Proximitatea rețelei hidrografice	47
Figura 43 - Parametri considerați pentru aplicarea modelului AHP (g – Proximitatea rețelei de drumuri, h – Topographic Wetness Index, i – Densitatea de drenaj, j – Precipitații).....	48
Figura 44 - Matrice de comparație în perechi (Pairwise Comparison Matrix) și ponderile factorilor.....	49

Figura 45 - Ilustrarea curbei ROC și a valorii AUC pentru modelul AHP aplicat în bazinul râului Sitna	50
Figura 46 - Harta susceptibilității la alunecări de teren în bazinul hidrografic al râului Sitna	51
Figura 47 - Schema metodologiei SVM aplicate pentru bazinul hidrografic al râului Sitna	54
Figura 48 - Variabilele de intrare pentru modelul de calcul SVM (a – Pantele, b – Curbura în plan, c – Curbura în profil, d – Densitatea de drenaj, e – Textura solurilor, f – Elevația).....	56
Figura 49 - Variabilele de intrare pentru modelul de calcul SVM (g – NDVI, h – TWI, i – Proximitatea rețelei hidrografice, j – Precipitațiile medii multianuale)	57
Figura 50 - Figuri explicative pentru principiul de funcționare al algoritmului SVM: (a) hiperplanul n-dimensional care diferențiază cele două clase prin unitatea de distanță maximă; (b) situație non-separabilă și modul de acționare a variabilei slack (preluată de la Lee et al., (2017) și modificată)	60
Figura 51 - Matricea coeficientului de corelare Pearson corespunzătoare variabilelor de intrare (pnt – Pante, curbpn – Curbura în plan, curbpnf – Curbura în profil, densdren – Densitatea de drenaj, ndvi – Indicele de vegetație Normalizat, precip – Precipitațiile, twi – Indicele de umiditate topografică, dem – Modelul numeric al terenului, proxrth – Proximitatea rețelei hidrografice, soluri – Solurile)	63
Figura 52 - Indicele de aport informațional (IGR) al modelului implementat pentru zona de studiu (pnt – Pante, curbpn – Curbura în plan, curbpnf – Curbura în profil, densdren – Densitatea de drenaj, ndvi – Indicele de vegetație Normalizat, precip – Precipitațiile, twi – Indicele de umiditate topografică, dem – Modelul numeric al terenului, proxrth – Proximitatea rețelei hidrografice, soluri – Solurile)	64
Figura 53 - Distribuția valorilor de susceptibilitate la alunecări de teren în bazinul hidrografic Sitna în urma aplicării modelului de calcul SVM	65
Figura 54 - Matricea de confuzie a modelului SVM aplicat.....	66
Figura 55 - Curba ROC și valoarea AUC pentru modelul rezultat	67
Figura 56 - Repartiția extinderilor maxime ale inundațiilor simulate pentru scenariile de rupere de baraj a Acumulării Cătămărăști și a Lacului Drăcșani, precum și a celor mai importante două clase (Ridică și Foarte Ridică) de susceptibilitate la alunecări de teren, pentru metodologiile aplicate (AHP și SVM) în cadrul bazinului hidrografic Sitna.....	74

LISTĂ DE TABELE

Tabelul 1. Debitele medii lunare multianuale (1950 - 2017) pentru bazinul hidrografic al râului Sitna (m ³ /s).....	22
Tabelul 2. Parametri morfometrici pentru bazinul râului Sitna	22
Tabelul 3. Zone vulnerabile la inundații, adâncimile medii și maxime pentru fiecare tip de utilizare a terenului	29
Tabelul 4. Rezultatele comparative ale simulărilor de rupere de baraj, corespunzătoare fiecărei breșei... 36	
Tabelul 5. Zone inundate per categorie de utilizare a terenului pentru toate simulările, conform Corine Land Cover 2018.....	40
Tabelul 6. Corelarea limitelor de inundație.....	44
Tabelul 7. Factorii condiționali utilizați în acest studiu	Error! Bookmark not defined.
Tabelul 8. Tabel comparativ privind rezultatele aplicării metodologiilor AHP și SVM. Suprafețele corespunzătoare claselor de vulnerabilități și procentajul din suprafața totală a bazinului hidrografic Sitna.	71

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. World Bank Group. (2016). Disponibil online: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2016/11/14/natural-disasters-force-26-million-people-into-poverty-and-cost-520bn-in-losses-every-year-new-world-bank-analysis-finds> (accesat la data de 26.08.2023).
2. Hearn, G. J., & Hart, A. B. (2011). Geomorphological Contributions to Landslide Risk Assessment: Theory and Practice. In M. J. Smith, P. Paron, & J. S. Griffiths (Eds.), *Developments in Earth Surface Processes* (Vol. 15, Chapter Five, pp. 107-148). Elsevier. ISSN 0928-2025. ISBN 9780444534460. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53446-0.00005-7>.
3. Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C., & Jaedicke, C. (2006). Global Landslide and Avalanche Hotspots. *Landslides*, 3(2), 159–174. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0036-1>.
4. Geertsema, M., Highland, L., & Vagueouis, L. (2009). Environmental Impact of Landslides. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_31.
5. Schuster, R. L., & Highland, L. M. (2007). Overview of the effects of mass wasting on the natural environment. *Geological Society of America, Environmental & Engineering Geoscience*, 8, 25–44. <https://doi.org/10.4236/vp.2018.42002>
6. Butler, D. R. (2001). Geomorphic process-disturbance corridors: a variation on a principle of landscape ecology. *Progress in Physical Geography*, 25, 237–248. <https://doi.org/10.4236/oje.2017.79036>.
7. Benda, L. (1990). The influence of debris flows on channels and valley floors in the Oregon Coast Range, U.S.A. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 457–466. <https://doi.org/10.1002/esp.3290150508>
8. Geertsema, M., Clague, J. J., Schwab, J. W., & Evans, S. G. (2006). An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada. *Engineering Geology*, 83(1–3), 120–143. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.028>.
9. Schwab, J. W., Geertsema, M., & Blais-Stevens, A. (2004). The Khyex River landslide of November 28, 2003, Prince Rupert British Columbia Canada. *Landslides*, 1, 243–246. <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0026-0>.
10. Zarin, D. J., & Johnson, A. H. (1995). Base saturation, nutrient cation, and organic matter increases during early pedogenesis on landslide scars in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Geoderma*, 65(3–4), 317–330. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00048-F](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00048-F).

11. Huggett, R.J. (1998). Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *CATENA*, 32(3–4), 155–172. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00053-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00053-8).
12. Niacsu, L., Bucur, D., Ionita, I., & Codru, I. C. (2022). Soil Conservation Measures on Degraded Land in the Hilly Region of Eastern Romania: A Case Study from Puriceni-Bahnari Catchment. *Water*, 14(4), 525. <https://doi.org/10.3390/w14040525>.
13. Niacsu, L., Ionita, I., Samoila, C., Grigoras, G., & Blebea-Apostu, A. M. (2021). Land Degradation and Soil Conservation Measures in the Moldavian Plateau, Eastern Romania: A Case Study from the Racova Catchment. *Water*, 13(20), 2877. <https://doi.org/10.3390/w13202877>.
14. Niacsu, L., Sfica, L., Ursu, A., Ichim, P., Bobric, D. E., & Breaban, I. G. (2019). Wind erosion on arable lands, associated with extreme blizzard conditions within the hilly area of Eastern Romania. *Environmental Research*, 169, 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.008>.
15. Niacsu, L. (2012). Bazinul Pereschivului (Colinele Tutovei): studiu de geomorfologie și pedogeografie cu privire specială asupra utilizării terenurilor. Editura Universității "Alexandru Ioan Cuza".
16. Radoane, M., & Vespremeanu-Stroe, A. (Eds.). (2016). *Landform dynamics and evolution in Romania*. Springer.
17. Pravalie, R., Patriche, C., & Bandoca, G. (2017). Quantification of land degradation sensitivity areas in southern and central southeastern Europe: New results based on improving DISMED methodology with new climate data. *Catena*, 158, 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.006>.
18. Patriche, C. V., Capatana, V., & Stoica, D. L. (2006). Aspects regarding soil erosion spatial modeling using the USLE/RUSLE within GIS. *Geographia Technica*, 2, 87–97.
19. Gashaw, T., Tulu, T., & Argaw, M. (2018). Erosion risk assessment for prioritization of conservation measures in Geleda watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 6, 1. <https://doi.org/10.1186/s40068-016-0078-x>.
20. Hu, Y., Tian, G., Mayer, A. L., et al. (2015). Risk assessment of soil erosion by application of remote sensing and GIS in Yanshan Reservoir catchment, China. *Natural Hazards*, 79, 277–289. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1841-4>.
21. Boardman, J. (2006). Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *CATENA*, 68(2–3), 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.007>.
22. Sevastel, M., Petrescu, N., Musat, M., Radu, A., & Sarbu, N. (2010). Soil erosion and conservation in Romania: Some figures, facts, and its impact on the environment. Disponibil online la: <https://afst.valahia.ro/wp-content/uploads/2022/09/2010-4-6-Mircea-Sevastel.pdf> (accesat la data de 13.07.2023)
23. Dordi, T., Henstra, D., & Thistlethwaite, J. (2022). Flood risk management and governance: A bibliometric review of the literature. *Journal of Flood Risk Management*, 15(2), e12797. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12797>.
24. Tariq, M. A. U. R., Farooq, R., & van de Giesen, N. (2020). A Critical Review of Flood Risk Management and the Selection of Suitable Measures. *Applied Sciences*, 10(23), 8752. <https://doi.org/10.3390/app10238752>.
25. Wang, L., Cui, S., Li, Y., Huang, H., Manandhar, B., Nitivattananon, V., Fang, X., & Huang, W. (2022). A review of the flood management: from flood control to flood resilience. *Heliyon*, 8(11), e11763. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11763>.
26. ICOLD. (1973). *Lessons from Dam Incidents*. ICOLD: Paris, France.

27. Charles, J. A., Tedd, P., & Warren, A. (2011). Lessons from Historical Dam Incidents. Environment Agency: Bristol, UK. Disponibil online: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/290812/scho0811buba-e-e.pdf (accesat la data de 14.04.2023).
28. Adamo, N., Al-Ansari, N., Ali, S. H., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Special Issue–Dam Safety Review: General Principles and Procedures-Part 1. *Journal of Earth Science and Geotechnical Engineering*, 10, 1–348.
29. Adamo, N., Al-Ansari, N., Ali, S. H., Laue, J., & Knutsson, S. (2021). Special Issue-Dam Safety Review: General Principles and Procedures-Part 2. *Journal of Earth Science and Geotechnical Engineering*, 11, 1–438.
30. ICOLD European Club. (2018). Working Group on Dam Legislation. Dam Legislation. Final Report. Disponibil online: <https://britishdams.org/assets/documents/News%20Item%20Docs/2018/ICOLD%20EurClub%20-Dam%20Legislation%20Report%20-%20Dec%202017.pdf> (accesat la data de 07.07.2023).
31. FEMA. (2013a). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2013—The Physical Science Basis; Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed.*; Cambridge University Press: Cambridge, UK.
32. FEMA. (2013b). Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures; FEMA P-946. Disponibil online: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_dam-safety_inundation-mapping-flood-risks.pdf (accesat la data de 07.07.2023).
33. European Council. (2007). Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the Assessment and Management of Flood Risks (pp. 27–34). Disponibil online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32007L0060> (accesat la data de 07.07.2023).
34. Saaty, T. L. (2000). *The Analytical Hierarchy Process*. McGraw Hill: New York.
35. Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-Vector Networks. *Machine Learning*, 20, 273-297. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00994018>.
36. Huang, Y., & Zhao, L. (2018). Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines. *CATENA*, 165, 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.003>.
37. Hydrologic Engineering Center. (2021). HEC-RAS User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Davis CA., April 2021.
38. Shah, M. A. R., Renaud, F. G., Anderson, C. C., Wild, A., Domeneghetti, A., Polderman, A., Votsis, A., Pulvirenti, B., Basu, B., Thomson, C., Panga, D., Pouta, E., Toth, E., Pilla, F., Sahani, J., Ommer, J., El Zohbi, J., Munro, K., Stefanopoulou, M., Loupis, M., Pangas, N., Kumar, P., Debele, S., Preuschmann, S., & Zixuan, W. (2020). A review of hydro-meteorological hazard, vulnerability, and risk assessment frameworks and indicators in the context of nature-based solutions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101728. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101728>.
39. Emergency Management British Columbia (EMBC) (2020). Hazard, Risk and Vulnerability Analysis (HRVA) for local authorities and first nations. Disponibil online: https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/public-safety-and-emergency-services/emergency-preparedness-response-recovery/local-government/hrva/guides/companion_guide_to_the_hrva.pdf (accesat la data de 22.09.2023)

40. Bobrowsky, P. T. (2013). *Encyclopedia of Natural Hazards*. Springer: Dordrecht, The Netherlands.
41. Domínguez-Cuesta, M.J. (2013). Susceptibility. In: Bobrowsky, P.T. (eds) *Encyclopedia of Natural Hazards*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_340.
42. Ward, R. C. (1978). *Floods: A Geographical Perspective*. Macmillan
43. Romanescu, G. (2013). Floods in the context of the 21st century: Hydrological risk and water management strategies. *Natural Hazards*, 69(1), 387-404.
44. Sidle, R. C., Nichol, J. E., & Onda, Y. (2006). Landslides in the humid tropics: A review of the causes and impacts. *Landslides*, 3(3), 153-166. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0054-1>
45. Fuchs, S., W. D., & S., T. (2007). Landslide risk management: A comparative study of approaches. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(2), 149-163. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-149-2007>
46. Schneider, J., Fröhlich, D., & P., T. (2020). An integrated approach for landslide risk assessment. *Landslides*, 17(4), 871-885. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01321-y>
47. Davis, M. A., Mergili, M., & Schmid, T. (2015). Human impacts on landslide susceptibility: A review of the literature. *Landslides*, 12(2), 189-202. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0468-7>
48. Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes And Landforms*, 16(5), 427-445. <https://doi.org/10.1002/esp.3290160505>.
49. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216. [https://doi.org/10.1016/s0169-555x\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/s0169-555x(99)00078-1).
50. Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), 99-111. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014>.
51. Guzzetti, F., Mondini, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>.
52. Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>.
53. Sanders, B. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances In Water Resources*, 30(8), 1831-1843. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.02.005>.
54. Fraccarollo, L., & Toro, E. (1995). Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems. *Journal Of Hydraulic Research*, 33(6), 843-864. <https://doi.org/10.1080/00221689509498555>.
55. Donat, M., Lowry, A., Alexander, L., O’Gorman, P., & Maher, N. (2016). More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6(5), 508-513. <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>.

56. Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
57. Morgan, R. P. C. (2009). Soil erosion and conservation. John Wiley & Sons.
58. Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., et al. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8, 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
59. Pantazică, M. (1974). Hidrografia Câmpiei Moldovei. Editura Junimea.
60. Ionesi, L. (1994). Geologia unităților de platformă și a Orogenului Nord-Dobrogean. Editura Tehnică: București.
61. Vasile Băcăoanu, (1968). Câmpia Moldovei - Studiu Geomorfologic. Editura Academiei Republicii Socialiste România, București.
62. Posea, G. (2005). Geomorfologia României. Editura Fundației România de Măine: București.
63. Ujvari J., (1972), Geografia apelor României, Ed. Științifică, București.
64. Schram, M., & Pantazică, M. (1963). Observații hidrologice în bazinul râului Sitna. In Conferința "Grigore Cobălcescu" a Universității "Alexandru Ioan Cuza", Iași.
65. Mișu-Pintilie, A., Cîmpianu, C. I., Stoleriu, C. C., Pérez, M. N., & Paveluc, L. E. (2019). Using High-Density LiDAR Data and 2D Streamflow Hydraulic Modeling to Improve Urban Flood Hazard Maps: A HEC-RAS Multi-Scenario Approach. *Water*, 11(9), 1832. <https://doi.org/10.3390/w11091832>.
66. Romanian Limnogeographical Association; Vartolomei, F. (2010). Date Privind Amenajările Hidrotehnice din Bazinul Prut. *Water Resour. from Rom. Vulnerability to Press. Man's Act.*, pp. 202–208. Disponibil Online: <https://www.limnology.ro/water2010/Proceedings/26.pdf> (accesat la data de: 20 Noiembrie 2019).
67. Lahovari, G. I., Brătianu, C. I., & Tocilescu, G. (1900). Marele Dicționar al României [The Great Dictionary of Romania]. Stab. Grafic. J.V. Socecu: Bucharest, Romania. Volume 3.
68. Enea, A., Urzica, A., & Breaban, I. G. (2018). Remote sensing, GIS and HEC-RAS techniques, applied for flood extent validation, based on Landsat imagery, LiDAR and hydrological data. Case study: Băseu river, Romania. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 19, 1091–1101.
69. Maftai, C., & Papatheodorou, K. (2015). Flash flood prone area assessment using geomorphological and hydraulic model. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 16, 63–73.
70. Sönmez, O., Demir, I. H., Demir, F., & Dobrucalı, E. (2017). Determination of flood inundation areas and assessment of flood hazard costs in urban settlements: A case study of Agva. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 18, 509–523.
71. Planul de Management al Riscului la Inundații. Administrația Bazinală a Apelor Prut-Barlad. (2016). p. 232. Available online: <http://www.rowater.ro/daprut/EPRI> (accesat la data de 12 Octombrie 2019).
72. USACE HEC-RAS. HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0; US Army Corps of Engineers California USA: Davis, CA, USA, 2016.
73. Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000-1024. <https://doi.org/10.1139/t00-030>.

74. Gharbi, M., Soualmia, A., Dartus, D., & Masbernat, L. (2016). Comparison of 1D and 2D Hydraulic Models for Floods Simulation on the Medjerda River in Tunisia. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7, 3017-3026.
75. Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., Koutsoyiannis, D., & Efstratiadis, A. (2016). Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *Journal of Hydrology*, 534, 478-492. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.020>.
76. Rubiu, F. (2018). Flood Risk Assessment in the Vicinity of Kartena Town Using HEC-RAS 1D-2D Models. Master's Thesis, Aleksandras Stulginskis University, Akademija, Lithuania.
77. Álvarez, M., Puertas, J., Peña, E., & Bermúdez, M. (2017). Two-Dimensional Dam-Break Flood Analysis in Data-Scarce Regions: The Case Study of Chipembe Dam, Mozambique. *Water*, 9, 432. <https://doi.org/10.3390/w9060432>.
78. Enea, A. Metode și Tehnici Moderne de Cuantificare a Vulnerabilității la Inundații în Bazinul Hidrografic Tazlău. Ph.D. Thesis, Alexandru Ioan Cuza University of Iași, Iași, Romania, 2017.
79. Marinoni, O. (2004). Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS. *Computers & Geosciences*, 30, 637–646.
80. Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281.
81. Hosmer, D. W., & Lemeshow, S. (2000). *Applied Logistic Regression* (2nd ed.). John Wiley and Sons. Chapter 5, 160-164. <https://doi.org/10.1002/0471722146>
82. Mandrekar, J. N. (2010). Receiver Operating Characteristic Curve in Diagnostic Test Assessment. *Journal of Thoracic Oncology*, 5(9), 1315–1316. <https://doi.org/10.1097/JTO.0B013E3181EC173D>
83. Ado, M., Amitab, K., Maji, A. K., Jasińska, E., Gono, R., Leonowicz, Z., & Jasiński, M. (2022). Landslide susceptibility mapping using machine learning: A literature survey. *Remote Sensing*, 14, 3029. <https://doi.org/10.3390/rs14133029>.
84. Huang, Y., & Zhao, L. (2018). Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines. *CATENA*, 165, 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.003>.
85. Mohamed, K., Safuan, A., Nazirah, M., Abdul Khanan, M. F., & Bin, A. (2023). A review of the application of support vector machines in landslide susceptibility mapping. *Disaster Advances*, 16, 71-83. <https://doi.org/10.25303/1611da071083>.
86. Guo, Z., Tian, B., Zhu, Y., He, J., Zhang, T. (2024). How do the landslide and non-landslide sampling strategies impact landslide susceptibility assessment? — A catchment-scale case study from China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(3), 877-894. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.07.026>.
87. Kalantar, B., Ueda, N., Lay, U. S., Al-Najjar, H. A. H., & Halin, A. A. (2019). Conditioning Factors Determination for Landslide Susceptibility Mapping Using Support Vector Machine Learning. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. <https://doi.org/10.1109/igarss.2019.8898340>.
88. Huang, W., Ding, M., Li, Z., Zhuang, J., Yang, J., Li, X., Meng, L., Zhang, H., & Dong, Y. (2022). An Efficient User-Friendly Integration Tool for Landslide Susceptibility Mapping Based on Support Vector Machines: SVM-LSM Toolbox. *Remote Sensing*, 14, 3408. <https://doi.org/10.3390/rs14143408>.

89. Ali, W., & Saeed, F. (2023). Hybrid Filter and Genetic Algorithm-Based Feature Selection for Improving Cancer Classification in High-Dimensional Microarray Data. *Processes*, 11, 562. <https://doi.org/10.3390/pr11020562>.
90. Wang, C.-M., & Huang, Y.-F. (2009). Evolutionary-based feature selection approaches with new criteria for data mining: A case study of credit approval data. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 5900-5908. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.026>.
91. Bui, D., Pradhan, B., Löfman, O., & Revhaug, I. (2012). Landslide Susceptibility Assessment in Vietnam Using Support Vector Machines, Decision Tree, and Naïve Bayes Models. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 97. <https://doi.org/10.1155/2012/97/46/38>.
92. Kirch, W. (Ed.). (2008). Pearson's Correlation Coefficient. In *Encyclopedia of Public Health*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5614-7_2569.
93. Bui, D. T., Ho, T.-C., Pradhan, B., Pham, B.-T., Nhu, V.-H., & Revhaug, I. (2016). GIS-based modeling of rainfall-induced landslides using data mining-based functional trees classifier with AdaBoost, Bagging, and MultiBoost ensemble frameworks. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1101–1123. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5919-4>.
94. Yao, X., Tham, L.G., & Dai, F.C. (2008). Landslide susceptibility mapping based on Support Vector Machine: A case study on natural slopes of Hong Kong, China. *Geomorphology*, 101(4), 572-582. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.02.011>
95. Naceur, H. A., Abdo, H. G., Igmoullan, B., et al. (2022). Performance assessment of the landslide susceptibility modelling using the support vector machine, radial basis function network, and weight of evidence models in the N'fis river basin, Morocco. *Geosciences Letters*, 9, 39. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00249-4>.
96. Yilmaz, I. (2009). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat—Turkey). *Computers & Geosciences*, 35(6), 1125-1138. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.08.007>.
97. Roy, J., Saha, S., Arabameri, A., Blaschke, T., & Bui, D.T. (2019). A Novel Ensemble Approach for Landslide Susceptibility Mapping (LSM) in Darjeeling and Kalimpong Districts, West Bengal, India. *Remote Sensing*, 11, 2866. <https://doi.org/10.3390/rs11232866>.
98. Vapnik, V. N. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, New York. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-2440-0>.
99. Schölkopf, B., Smola, A. J., Williamson, R. C., & Bartlett, P. L. (2000). New Support Vector Algorithms. *Neural Computation*, 12(5), 1207–1245. doi: <https://doi.org/10.1162/089976600300015565>.
100. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2001). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer: New York, NY, USA.
101. Lee, S., Hong, S.-M., & Jung, H.-S. (2017). A Support Vector Machine for Landslide Susceptibility Mapping in Gangwon Province, Korea. *Sustainability*, 9, 48. <https://doi.org/10.3390/su9010048>.
102. Xu, C., Dai, F., Xu, X., & Lee, Y. H. (2012a). GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China. *Geomorphology*, 145–146, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.040>
103. Pradhan, B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping

- using GIS. *Computers & Geosciences*, 51, 350-365. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.08.023>.
104. Xu, C., Xu, X., Dai, F., & Saraf, A. K. (2012b). Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China. *Computers & Geosciences*, 46, 317-329. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.01.002>.
105. Pourghasemi, H.R., Jirandeh, A.G., Pradhan, B., et al. (2013). Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran. *Journal of Earth System Science*, 122, 349–369. <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0282-2>
106. Hong, H., Pradhan, B., Jebur, M., Bui, D., Xu, C., & Akgun, A. (2015). Spatial prediction of landslide hazard at the Luxi area (China) using support vector machines. *Environmental Earth Sciences*, 75. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4866-9>.
107. Pham, B.T., Nguyen-Thoi, T., Qi, C., Phong, T.V., Dou, J., Ho, L.S., Le, H.V., & Prakash, I. (2020). Coupling RBF neural network with ensemble learning techniques for landslide susceptibility mapping. *CATENA*, 195, 104805. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104805>.
108. Le Minh, ., Truyen, P.T., Van Phong, T. et al. (2023). Ensemble models based on radial basis function network for landslide susceptibility mapping. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 99380–99398. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29378-9>
109. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., & Galli, M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81, 166–184. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.007>.
110. Murakami, Y., & Mizuguchi, K. (2010). Applying the Naïve Bayes classifier with kernel density estimation to the prediction of protein–protein interaction sites. *Bioinformatics*, 26(15), 1841–1848. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq302>.
111. He, L., Wu, X., He, Z., Xue, D., Luo, F., Bai, W., Kang, G., Chen, X., & Zhang, Y. (2023). Susceptibility Assessment of Landslides in the Loess Plateau Based on Machine Learning Models: A Case Study of Xining City. *Sustainability*, 15, 14761. <https://doi.org/10.3390/su152014761>.
112. Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, 20(1), 37-46.
113. Zhao, Z., Liu, Z. Y., & Xu, C. (2021). Slope Unit-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Certainty Factor, Support Vector Machine, Random Forest, CF-SVM and CF-RF Models. *Frontiers in Earth Science*, 9, 589630. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.589630>
114. Tien Bui, D., Tuan, T.A., Klempe, H. et al. (2016). Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides*, 13, 361–378. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0557-6>.
115. Yu, L., Cao, Y., Zhou, C., Wang, Y., & Huo, Z. (2019). Landslide Susceptibility Mapping Combining Information Gain Ratio and Support Vector Machines: A Case Study from Wushan Segment in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Applied Sciences*, 9(22), 4756. <https://doi.org/10.3390/app9224756>.

116. Xu, Z., Che, A., & Zhou, H. (2024). Seismic landslide susceptibility assessment using principal component analysis and support vector machine. *Scientific Reports*, 14, 3734. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48196-0>.
117. Spackman, K. A. (1989). Signal detection theory: Valuable tools for evaluating inductive learning. In A. M. Segre (Ed.), *Proceedings of the Sixth International Workshop on Machine Learning* (pp. 160-163). Morgan Kaufmann. ISBN 9781558600362. <https://doi.org/10.1016/B978-1-55860-036-2.50047-3>.
118. Obuchowski, N. A. (2003). Receiver operating characteristic curves and their use in radiology. *Radiology*, 229(1), 3-8. <https://doi.org/10.1148/radiol.2291010898>
119. Tang, W., Hu, J., Zhang, H., Wu, P., & He, H. (2015). Kappa coefficient: A popular measure of rater agreement. *Shanghai Archives of Psychiatry*, 27, 62-67. <https://doi.org/10.11919/j.issn.1002-0829.215010>.
120. Sim, J., & Wright, C. C. (2005). The Kappa Statistic in Reliability Studies: Use, Interpretation, and Sample Size Requirements. *Physical Therapy*, 85(3), 257-268. <https://doi.org/10.1093/ptj/85.3.257>.