

„AOȘR-TEAMS-III” EDIȚIA 2024-2025
„ TRANSFORMAREA DIGITALĂ ÎN ȘTIINȚE”

Domeniul: Științe biologice

RAPORT DE CERCETARE FINAL



***Contaminarea microbiană a apelor recreaționale: un algoritm
de supraveghere și intervenție punctuală bazat pe inteligența
artificială cu relevanță pentru sănătatea publică***

Echipa de implementare:

Șef lucr. dr. Andra-Cristina BOSTĂNARU-ILIESCU

Drd. Robert CAPOTĂ

Drd. Paula LORENTȚ (CUCU)

Drd. Mălina Maria ȘURUBARU

RAPORT DE CERCETARE FINAL

pentru perioada Iulie – Decembrie 2025

1. Titlul raportului: *Algoritm inteligent de supraveghere sanitară a apelor recreaționale, bazat pe detecția automată a indicatorilor microbieni și clasificarea riscului de infecție*

Raporul intermediar IV include:

- *Aplicația mobilă AquaCheck - pentru analiza microbiologică rapidă a apelor recreaționale prin detecția automată a speciei Escherichia coli și enterococilor;*
- *Propunere de algoritm de supraveghere epidemiologică prin utilizarea unui model matematic creat din variabilele principalilor indicatori microbiologici evaluați din apă și nisip;*
- *Estimarea riscului epidemiologic zilnic și anual în corelație cu factorii climatici și densitatea populației de pe plajă;*
- *Propunerea unui sistem modern de clasificare a siguranței apei și nisipului de pe plaje, bazat pe semnalizare standardizată pentru optimizarea managementului sanitar costier.*

Cuvinte cheie: *monitorizarea apelor recreaționale, contaminare microbiologică, algoritm de predicție a riscului, aplicația mobilă AquaCheck, management sanitar costier*

1.1. Domeniul științific: Științe biologice

1.2. Echipa de implementare:

- Director de proiect: Șef lucr. dr. Andra-Cristina BOSTĂNARU-ILIESCU
- Membru: Drd. Robert CAPOTĂ
- Membru: Drd. Paula LORENȚ (CUCU)
- Membru: Drd. Mălina Maria ȘURUBARU

Colaboratori:

- *Prof. univ. dr. Mihai MAREȘ, Microbiologie și Micologie clinică și micotoxicologie*
- *Dr. João BRANDÃO, Microbiology at National Institute of Health Dr. Ricardo Jorge, National representative to the European Microbiology Experts sub-Group (for the European Bathing and Drinking Water Directives), Centre for Environmental and Marine Studies (CESAM), Human and Environmental Health Laboratory (HuEHL)*
- *Drd. Dana CIAUȘU-SLIWA, Microbiologie-Imunologie*

1. Scopul proiectului

Monitorizarea microflorei din apele și nisipurile recreaționale a fost, până recent, un domeniu insuficient explorat în România, în ciuda creșterii constante a valorificării turistice a litoralului Mării Negre. Lipsa unor date sistematice privind contaminarea microbiologică a acestor ecosisteme reprezintă o vulnerabilitate majoră în contextul protejării sănătății publice și a dezvoltării durabile a zonelor costiere.

În anul 2020 a fost constituit primul grup național de cercetare axat pe studierea microorganismelor din medii recreaționale, punându-se bazele unui program coerent de supraveghere epidemiologică a litoralului românesc. Ulterior, începând cu 1 martie 2025, proiectul a fost extins prin crearea consorțiului internațional *CLIME – Clinically Important Microorganisms in the Environment*, dedicat investigării microorganismelor cu relevanță clinică prezente în medii naturale. Activitățile s-au focalizat pe litoralul românesc al Mării Negre, un areal cu biodiversitate ridicată și importanță strategică pentru regiunea Europei de Sud-Est, dar supus presiunilor antropice și climatice crescânde.

Marea Neagră se confruntă în prezent cu modificări ecologice profunde, generate de eutrofizare, hipoxie, poluare, introducerea speciilor invazive și intensificarea schimbărilor climatice, care favorizează proliferarea agenților patogeni rezistenți la antimicrobiene. În același timp, creșterea utilizării recreaționale a apei și nisipului expune numărul mare de turiști la riscuri infecțioase insuficient evaluate, în special în rândul copiilor, al persoanelor imunocompromise și al vizitatorilor nerezidenți.

Introducerea microorganismelor enterice pe plaje se realizează prin contaminare fecaloidă directă, scurgeri de ape pluviale și de suprafață sau infiltrații ale apelor uzate contaminate. Ulterior, acestea pot persista în sedimente, biofilme și macrofite, fiind reintroduse intermitent în coloana de apă.

Noutatea și impactul științific. Monitorizarea microbiologică a apelor de îmbăiere în România se realizează, în prezent, într-un mod fragmentat și cu o întârziere semnificativă între recoltarea probelor și comunicarea rezultatelor. Acest decalaj compromite capacitatea autorităților de a reacționa rapid pentru protejarea sănătății publice. Inovația majoră a proiectului constă în dezvoltarea aplicației *AquaCheck*, o soluție digitală complet automată care preia, interpretează și raportează parametrii microbiologici direct pe teren, în aceeași zi cu recoltarea probelor. Integrearea

inteligenței artificiale și a procesării imaginii elimină erorile umane în citirea godeurilor fluorescente pentru *E. coli* și enterococi.

De asemenea, proiectul introduce un **model matematic predictiv în timp real**, care estimează riscul epidemiologic prin combinarea datelor microbiologice cu indicatori climatici și antropici. În premieră națională, se propune **clasificarea sanitară simultană a apei și nisipului**, utilizând un sistem de avertizare tip semafor (verde–galben–roșu), menit să optimizeze managementul costier și intervențiile preventive. Această abordare transformă monitorizarea microbiologică dintr-un proces retrospectiv într-un **sistem inteligent de supraveghere epidemiologică**, cu impact direct în prevenirea bolilor infecțioase asociate zonelor recreaționale marine.

2. Obiectivele proiectului

Obiectivele din cadrul prezentei etape au vizat dezvoltarea și validarea unor instrumente moderne pentru monitorizarea microbiologică a apelor recreaționale, în scopul reducerii riscurilor asupra sănătății publice:

Obiectivul 1. Dezvoltarea și utilizarea aplicației mobile AquaCheck

Aplicație digitală inovatoare destinată **analizei microbiologice rapide** a apelor recreaționale, prin **detecția automată și enumerarea** speciilor *Escherichia coli* și enterococilor pe baza imaginilor obținute în ziua recoltării probelor de apă de mare.

Principiul de funcționare. AquaCheck este o aplicație mobilă dezvoltată pentru **detecția automată și enumerarea rapidă** a bacteriilor indicatoare de contaminare fecaloidă (*Escherichia coli* și enterococi) din probe de apă marină. Metodologia integrează:

recoltarea standardizată a probelor

- ✓ filtrarea și incubarea rapidă,
- ✓ analiza imagistică digitală,
- ✓ clasificarea automată asistată de algoritmi de inteligență artificială.

Această abordare permite scurtarea semnificativă a timpului de obținere a rezultatelor, comparativ cu metodele convenționale MUG/EC utilizate împreună cu software-ul FLuoPlate™2 pentru analiza *Escherichia coli* și *Enterococcus spp.*

Obiectivul 2. Elaborarea unui algoritm modern de supraveghere epidemiologică. Construirea și testarea unui **model matematic predictiv**, generat din variabile corespunzătoare

celor mai relevanți indicatori microbiologici (apă + nisip), utilizat pentru informarea timpurie a populației, autorităților sanitare și factorilor de management costier.

Obiectivul 3. Estimarea riscului epidemiologic zilnic și anual. Determinarea probabilității de infecție cauzate de **coliformi termotoleranți, enterococi și levuri**, în corelație cu factorii climatici și cu densitatea turiștilor prezenți pe plajă, contribuind la **conștientizarea impactului asupra sănătății umane**.

Obiectivul 3. Propunerea unui sistem modern de clasificare a siguranței apei și nisipului pe plaje. Elaborarea unei soluții de **management sanitar costier**, bazată pe un sistem integrat de evaluare microbiologică și **semnalizare standardizată**, prin stabilirea a trei categorii de risc:

- ✓ ● **Informare** – risc infecțios redus
- ✓ ● **Avertizare** – risc infecțios moderat
- ✓ ● **Alarmare** – risc infecțios ridicat

Încadrarea plajelor se face conform **limitărilor de detecție** generate prin algoritmul de supraveghere.

Obiectivul 4. Integrarea inteligenței artificiale în evaluarea microbiologică. Compararea metodelor **convenționale** și **alternative** de laborator și implementarea unor algoritmi AI pentru:

- ✓ creșterea acurateței detectării bacteriilor și fungilor
- ✓ identificarea rapidă a speciilor și a rezistenței acestora
- ✓ optimizarea procesului de analiză pentru apă și nisip

3. Materiale și metode

În cadrul acestei etape a proiectului au fost dezvoltate instrumente moderne pentru monitorizarea microbiologică a apelor recreaționale și a nisipului aferent zonelor de plajă, cu scopul reducerii riscurilor asupra sănătății publice. Abordarea metodologică integrează tehnologii alternative de detecție rapidă, analiză imagistică automatizată, modelare epidemiologică și inteligență artificială.

Metodologia aplicației AquaCheck pentru detecția automată a bacteriilor. Aplicația AquaCheck a fost utilizată pentru interpretarea automată a contaminării microbiologice în apă și nisip, prin detectarea și cuantificarea speciilor indicator *Escherichia coli* și enterococilor intestinali.

Etape experimentale:

- Etape de recoltare standardizată ISO
- Filtrare prin membrană 0,22 µm
- Incubare rapidă pe medii lichide fluorogene cromogenice
- Analiză digitală automată prin AquaCheck

Principiul biochimic al detecției. Incubarea probelor se realizează pe microplăci MUD/MUG conforme:

- EN ISO 9308-3:1999 – *E. coli*
- EN ISO 7899-1:1999 – enterococi

Hidroliza substraturilor induce semnal fluorescent UV:

| Indicator | Enzimă marker | Substrat | Semnal | Temperatură | Durată |
|------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------|---------------|
| <i>E. coli</i> | β-D-glucuronidază | MUG | Fluorescență albastră | 44 ± 0,5°C | 18–24 h |
| Enterococi | β-D-glucozidază | MUD | Fluorescență albastru-verzuie | 41 ± 0,5°C | 18–24 h |

Semnalul fluorescent generat → **4-metilumbelliferon**, detectabil automat de aplicație.

Algoritmul de analiză integrat în AquaCheck

Aplicația:

- detectează automat godeurile pozitive/negative
- elimină artefacte de imagine (zgomot, reflexii)
- aplică corecție matematică pentru citiri ambigue
- calculează valorile CFU/100 mL (apă) și CFU/100 g (nisip)
- asigură trasabilitate GPS și arhivare digitală

Originalitatea constă în primul rând în accesibilitate: aplicația poate fi instalată pe orice telefon Android. În plus, este concepută cu un accent puternic pe experiența utilizatorului, astfel încât procesul de colectare a datelor să fie cât mai simplu, eficient și corect.

Testarea unui biosenzor electrochimic. A fost testat un biosenzor electrochimic experimental, destinat:

- detecției rapide a agenților patogeni din apă
- măsurării semnalelor generate de evenimentele de recunoaștere biologică
- comparării performanței cu analiza automatizată AquaCheck

Acesta a contribuit la evaluarea potențialului de inovare tehnologică în monitorizarea în timp real.

Model matematic de supraveghere epidemiologică. A fost construit un algoritm

predictiv bazat pe:

- valori microbiene apă + nisip
- condiții atmosferice
- densitatea utilizatorilor plajei
- sezonalitate + variații hidrologice

La final a fost evaluat indicatorul zilnic al riscului epidemiologic pentru management costier rapid.

Estimarea riscului zilnic și anual de infecție. Modelul exponențial doză-răspuns adaptat:

$$P_{zi} = 1 - e^{-PP \cdot N}$$

Riscul anual:

$$P_{an} = 1 - (1 - P_{zi})^n$$

Unde:

- **PP** = probabilitate de infecție / expunere
- **N** = nivel contaminare (CFU)
- **n** = numărul estimat de expuneri/an

Clasificarea siguranței apă + nisip

| Categoria | Semnal | Semnificație sanitară | Recomandare |
|--------------|--------------|-----------------------|-------------------|
| ● Informare | Risc scăzut | Apele sunt conforme | Acces permis |
| ● Avertizare | Risc moderat | Depășiri punctuale | Acces condiționat |
| ● Alarmare | Risc ridicat | Contaminare cu | Închidere plajă |
| | | | |

Astfel încât propunem primul sistem integrat din România pentru ambele componente reprezentate de apă și nisip.

Integrarea inteligenței artificiale. Algoritmii utilizați au fost reprezentați de:

- Machine Learning (SVM, RF)
- Deep Learning (CNN pentru imagini)

Beneficii:

- creșterea acurateței identificării coloniilor suprapuse
- detectarea tulpinilor rezistente la mediu

- predicția timpurie a potențialelor focare
- optimizarea monitorizării în timp real

Metodologia propusă combină tehnici moderne de analiză microbiologică rapidă cu instrumente digitale inteligente, contribuind la creșterea siguranței apelor recreaționale și la protecția sănătății publice.

4. Rezultate și discuții

În cadrul acestui raport de cercetare am identificat și analizat distribuția speciilor de *Vibrio* de pe principalele plaje ale litoralului românesc, cu scopul de a evalua diversitatea microbiologică, frecvența izolărilor și potențialul patogen al acestora. Genul *Vibrio* reunește bacterii halofile și halotolerante, strâns dependente de factorii de mediu caracteristici ecosistemelor costiere: temperatura apei, salinitatea, hidrodinamica zonei litorale și concentrația de materie organică.

Anumite specii, precum *Vibrio vulnificus*, *V. cholerae* sau *V. parahaemolyticus*, sunt cunoscute pentru capacitatea lor de a produce infecții severe la om, în special în sezonul cald, motiv pentru care monitorizarea lor reprezintă un indicator important al siguranței microbiologice a plajelor. Analiza spațială a acestor specii permite identificarea zonelor cu risc crescut și a factorilor ecologici care favorizează proliferarea lor.

Graficul următor reflectă distribuția speciilor de *Vibrio* identificate pe litoral în funcție de localizare și nivelul de patogenitate (Figura 1).

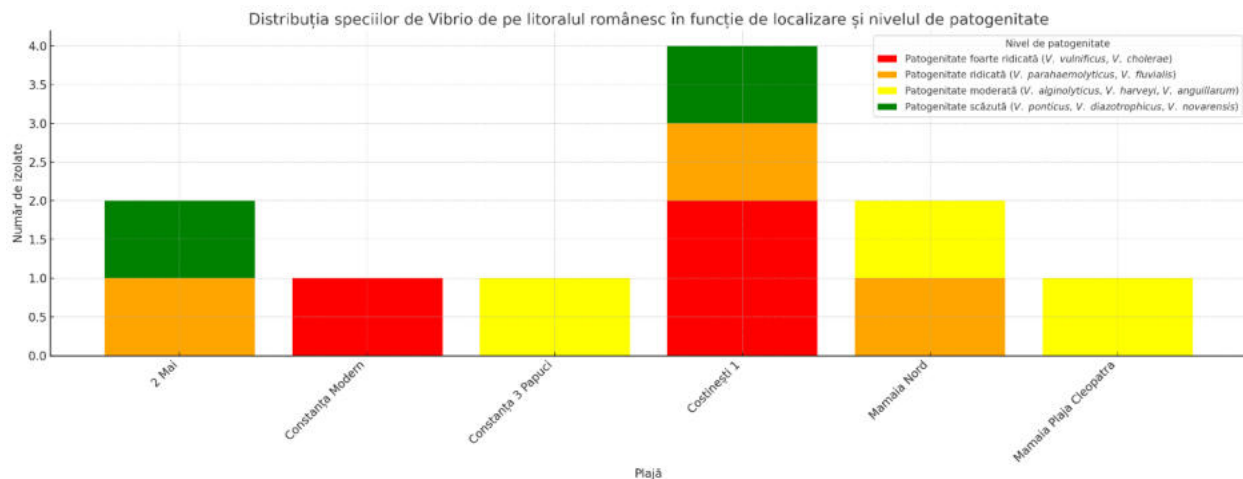


Figura 1. Distribuția speciilor de *Vibrio* pe litoralul românesc

Graficul evidențiază prezența diferitelor specii de *Vibrio* în probe colectate de pe plaje distincte de-a lungul litoralului românesc. Se observă variații semnificative între locații, determinate de particularitățile ecologice și antropice ale fiecărei zone.

Plaja din Costinești prezintă cea mai mare diversitate și abundență de izolate. Prezintă tulpini din toate categoriile de patogenitate, inclusiv specii cu potențial patogen ridicat (*V. vulnificus*, *V. cholerae*). Acest profil sugerează condiții mediului local extrem de favorabile multiplicării vibronilor, asociate cu ape calde, intens populate și hidrodinamism redus. Activitatea turistică intensă și încălzirea rapidă a apei în zona litoralului deschis contribuie la menținerea unui nivel microbiologic ridicat.

Plaja din 2 Mai și Mamaia Nord, predominanță a speciilor cu patogenitate moderată. Speciile *V. alginolyticus*, *V. harveyi* și *V. anguillarum* sunt asociate frecvent cu fauna marină și sedimentele superficiale. Prezența lor sugerează un ecosistem marin activ și sănătos, dar care poate genera infecții oportuniste la persoanele cu leziuni tegumentare sau imunitate scăzută. Riscul microbiologic este moderat, dar nu neglijabil.

Plajele din Constanța prezintă o diversitate redusă, dar cu specii patogene. Deși numărul izolărilor este mai scăzut, apar tulpini din categoria cu patogenitate ridicată (*V. parahaemolyticus*, *V. fluvialis*). Aceste zone sunt în proximitatea unor surse antropice precum traficul naval, porturi și zone urbanizate, ceea ce poate contribui la prezența vibronilor patogeni. Speciile identificate sunt adesea asociate cu materie organică crescută și cu degradarea calității mediului costier.

Plaja din Mamaia prezintă un profil microbiologic cu risc redus. Sunt prezente doar specii cu patogenitate moderată. Hidrodinamica intensă și circulația crescută a apei par să reducă acumularea vibronilor patogeni. Această zonă prezintă una dintre cele mai scăzute încărcături bacteriene dintre locațiile investigate.

Distribuția speciilor de *Vibrio* diferă considerabil între locațiile investigate, reflectând combinația particulară a factorilor ecologici și antropici. Zonele cu ape puțin adânci, temperaturi ridicate și activitate turistică intensă, precum Costinești, înregistrează cel mai înalt potențial patogen, în schimb urmează să verificăm dacă se încadrează un grupurile toxigene de *Vibrio*.

Rezultatele susțin necesitatea unei monitorizări constante a litoralului românesc, în special în zonele cu risc ecologic crescut, și justifică intervenții preventive pentru reducerea expunerii populației la vibroni patogeni.

În cadrul acestui raport de cercetare am evaluat nu doar diversitatea bacteriană din mediul costier, ci și profilul de antibioretistență al tulpinilor izolate, având ca obiectiv identificarea potențialelor riscuri pentru sănătatea publică asociate expunerii la apă și nisip pe litoralul românesc. *Escherichia coli* reprezintă un important indicator de contaminare fecală și constituie un model relevant pentru monitorizarea rezistenței antimicrobiene în ecosistemele acvatice.

Rezistența antimicrobiană (AMR) în mediul marin a devenit un subiect de interes major datorită legăturii directe cu activitățile umane, deversări, ape uzate insuficient tratate, turism intens, precum și aporturi din agricultură. Evaluarea sensibilității tulpinilor de *E. coli* la antibiotice uzuale și la antibiotice critice pentru medicina umană oferă informații esențiale pentru înțelegerea presiunii selective exercitate asupra microbiotei din apă și nisip și a potențialului de răspândire a tulpinilor multirezistente (MDR).

Graficul de mai jos prezintă diametrele zonelor de inhibiție pentru principalele antibiotice testate, evidențiind diferențe între tulpinile izolate din apă și cele izolate din nisip.

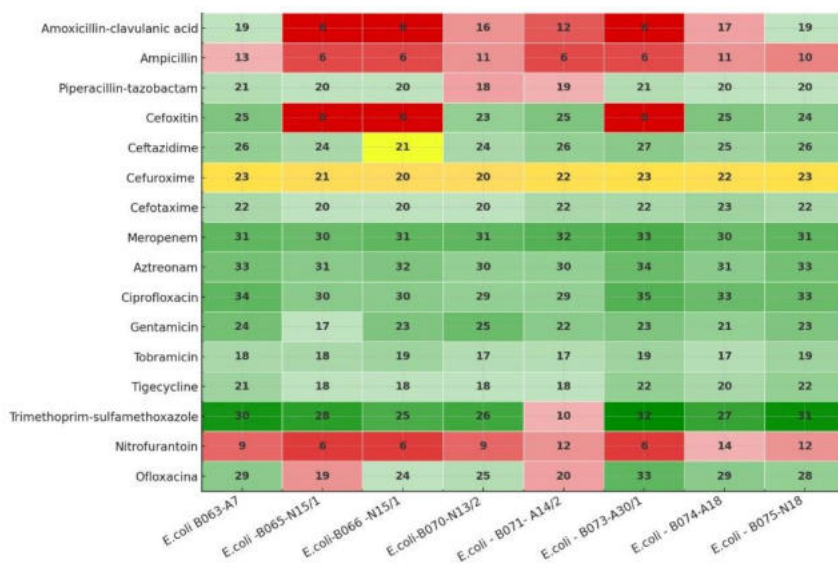


Figura 2. Profilul de antibioretistență al tulpinilor de *Escherichia coli* izolate din apă și nisip

Din analiza hărții de antibioretistență evidențiază o serie de aspecte relevante din perspectiva sănătății publice și a ecologiei bacteriene.

Antibiotice cu nivel ridicat de rezistență. Tulpinile de *E. coli* izolate prezintă rezistență crescută față de: ampicilină, amoxicilin-clavulanat și nitrofurantoină. Aceste antibiotice se numără

printre cele mai utilizate în practică medicală și pot reflecta expunerea microorganismelor la reziduuri antibiotice provenite din mediul urban, turistic și agrozootehnic. Rezistența la aceste clase sugerează:

- prezența enzimelor β -lactamaze cu spectru restrâns sau extins
- adaptarea microorganismelor la condițiile ecologice locale
- posibil transfer orizontal de gene de rezistență în mediul costier

Tulpinile din nisip prezintă un nivel de rezistență ușor mai ridicat, comparativ cu cele din apă.

Microbiologic, acest fenomen se explică prin faptul că nisipul:

- funcționează ca rezervor ecologic stabil pentru bacterii, unde acestea pot persista mai mult timp;
- permite formarea de biofilme și concentrarea de gene de rezistență;
- reține materie organică și microcontaminanți proveniți din activități umane.

Nisipul poate acționa ca un spațiu favorabil pentru conservarea și circulația tulpinilor multirezistente (MDR).

Tulpinile de *Escherichia coli* izolate din mediul costier românesc prezintă niveluri semnificative de rezistență la antibiotice uzuale precum ampicilina, amoxicilin-clavulanatul și nitrofurantoinul, indicând expunerea la surse antropice de contaminare. Totuși, sensibilitatea lor la antibiotice critice precum meropenem, ciprofloxacina și aztreonam sugerează că presiunea antibiotică în mediul marin este moderată, iar tulpinile nu au dobândit mecanisme complexe de rezistență la antibiotice de ultimă linie.

Rezultatele subliniază necesitatea monitorizării continue a rezistenței bacteriene în apă și nisip, întrucât mediile litorale pot deveni rezervoare importante pentru tulpini MDR, cu potențial de transmitere către populație.

În cadrul acestui raport de cercetare am analizat relațiile dintre parametrii microbiologici ai nisipului și factorii de mediu, cu scopul de a identifica variabilele care influențează cel mai mult nivelul de contaminare bacteriană în zona costieră. Nisipul reprezintă un mediu complex, caracterizat prin variabilitate ridicată a umidității, temperaturii și expunerii solare, iar microorganismele prezente în acest substrat sunt puternic influențate de modificările microclimatice locale.

Pentru a cuantifica relațiile dintre acești factori, a fost utilizată corelația Spearman, o metodă robustă pentru evaluarea asocierilor monotone între variabile care nu urmează neapărat o

distribuție normală. Această abordare este adecvată pentru date ecologice, unde dinamica mediului și interacțiunile complexe pot influența semnificativ prezența bacteriilor indicator precum Enterococii și coliformii termotoleranți.

Graficul următor oferă o reprezentare sintetică a acestor relații, permițând identificarea factorilor care favorizează sau inhibă contaminarea nisipului.

Figura 3. Corelația parametrilor microbiologici și de mediu în nisipul de pe litoralul românesc.

Harta de corelație evidențiază modul în care variabilele de mediu influențează nivelurile bacteriilor indicator din nisip, conturând un profil clar al factorilor favorizanți și inhibitori.

Umiditatea și precipitațiile – principalii factori favorizanți ai contaminării. Există o corelație pozitivă puternică între umiditate și concentrațiile de:

- Enterococi ($\rho = 0.38$)
- Coliformi termotoleranți ($\rho = 0.56$)

Precipitațiile sunt, de asemenea, puternic corelate cu umiditatea ($\rho = 0.78$), ceea ce explică creșterea încărcăturii microbiene după episoade de ploaie.

Umiditatea ridicată menține un mediu favorabil supraviețuirii bacteriilor, prevenind uscarea celulelor și promovând transferul microbial în stratul superficial al nisipului. Precipitațiile pot transporta materii organice și microorganisme din zone adiacente, contribuind la creșterea concentrațiilor.

Expunerea solară – factor inhibitor important. Durata de strălucire a soarelui prezintă corelații negative cu:

- Enterococi ($\rho = -0.56$)
- Coliformi termotoleranți ($\rho = -0.41$)

Radiațiile UV induse de expunerea solară au un efect bactericid demonstrat, degradând ADN-ul microbial și reducând capacitatea de multiplicare. De asemenea, uscarea nisipului limitează mobilitatea și supraviețuirea bacteriilor indicator.

Contaminarea microbiologică a nisipului este determinată preponderent de factorii microclimatici, în special umiditatea și precipitațiile, care favorizează supraviețuirea și multiplicarea bacteriilor indicator. În contrast, expunerea solară constituie un factor inhibitor puternic, favorizând reducerea naturală a contaminării. Activitatea turistică intensă nu influențează

negativ nivelul de contaminare, ceea ce sugerează o autoepurare eficientă a nisipului sau practici adecvate de administrare a plajelor.

Monitorizarea dinamică a condițiilor meteorologice este esențială pentru evaluarea riscului microbiologic al nisipului și pentru implementarea unor măsuri corective în perioadele cu condiții favorabile contaminării.

Detecția acestor specii în surse de apă recreativă potențial utilizate de oameni poate sugera o contaminare fecaloidă, o igienă precară a sistemului de distribuție sau o sursă de apă netratată corespunzător. Rezultatele subliniază necesitatea unei monitorizări constante și a unor măsuri de control pentru prevenirea riscurilor de sănătate publică.

Luând în considerare atât probele de apă, cât și cele de nisip, speciile de levuri cu frecvență comună ridicată au fost: *Candida parapsilosis*, *Candida lusitanae*, *Candida krusei* și *Candida albicans* (Figura 12).

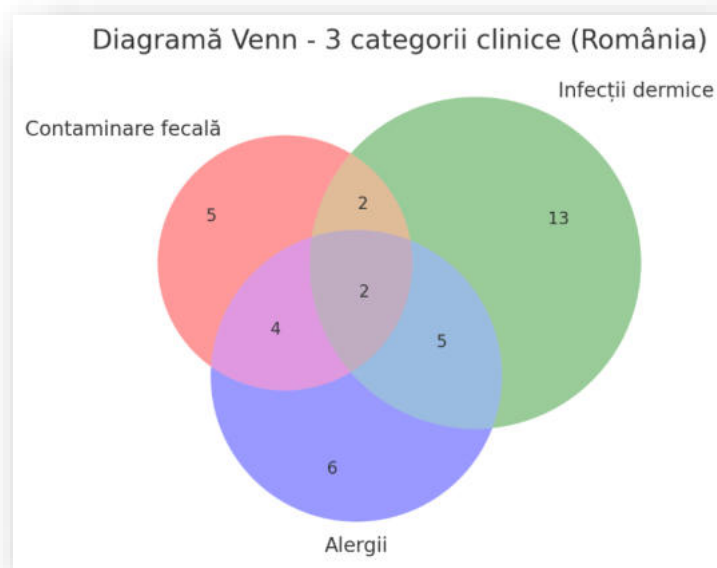


Figura 3 – Diagram Venn pentru fungi – categorii clinice

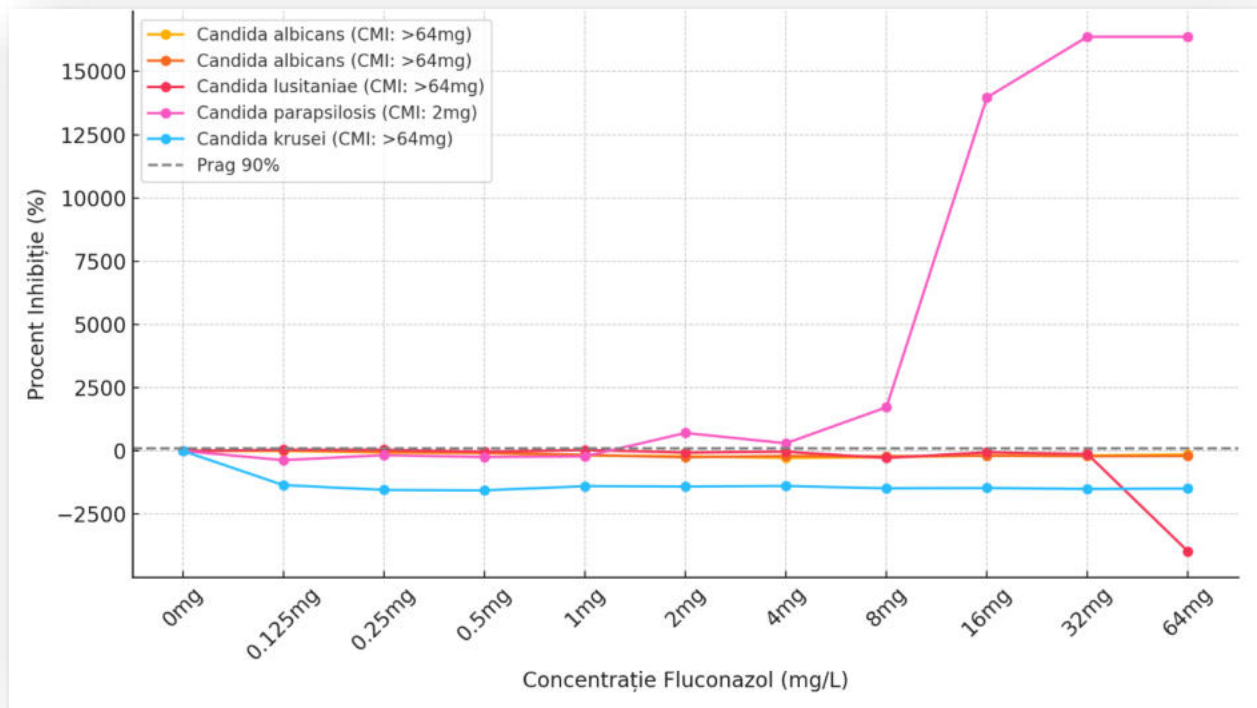
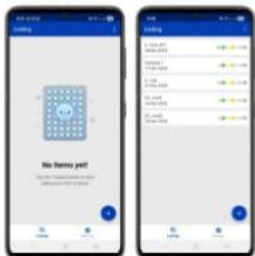


Figura 4 – Speciile de *Candida* izolate din apă și nisip - profilul de rezistență față de antifungice

Identificarea speciilor comune în ambele medii, apă și nisip, oferă informații valoroase privind adaptabilitatea fungilor la condiții variate de umiditate, temperatură și compoziție substratală. Prezența aceluiași specii în ambele surse indică faptul că acestea au o capacitate ridicată de supraviețuire și diseminare în mediile costiere, fiind potențial indicatori biologici ai contaminării antropice sau ai unui dezechilibru ecologic.

Calitatea microbiologică a apelor recreaționale reprezintă un indicator esențial pentru sănătatea publică, cu impact direct asupra siguranței utilizatorilor plajelor și asupra managementului sanitar costier. Zonele de înbăiere sunt expuse constant la surse variate de contaminare – de la descărcări accidentale de ape uzate, la aportul de nutrienți și microorganisme provenite din activități umane sau procese naturale. În aceste condiții, *necesitatea unor instrumente moderne, rapide și precise pentru monitorizarea microorganismelor patogene devine critică.*

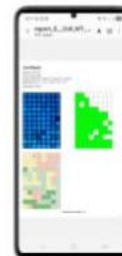
Listing Screen / Ecranul de listare



Add New Item Screen / Ecranul de adaugare item nou



PDF Viewer



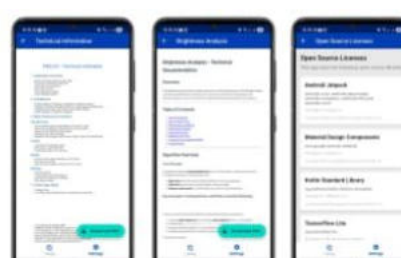
Details Screen
Ecranul de Detalii probe



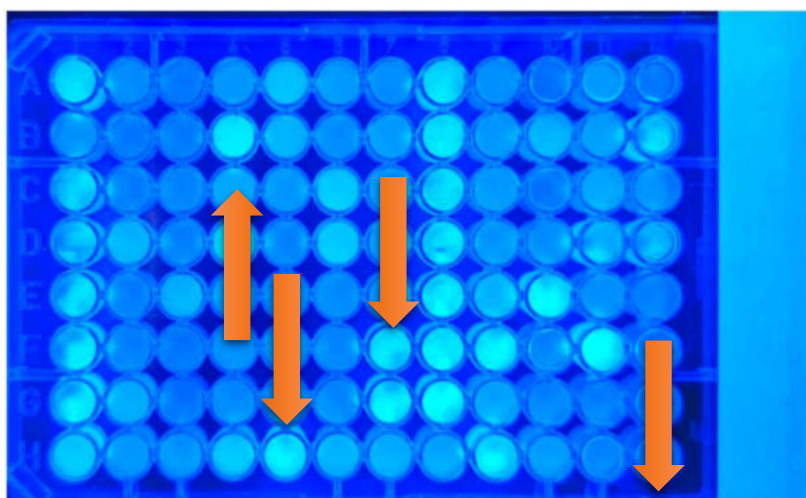
Setting Screen
Ecranul de Setari



Technical Information Screens
Ecrane cu informatii tehnice



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12



1. *Escherichia coli* ATCC
2. *Serratia marcescens*
3. *Pseudomonas stutzeri*
4. *Pseudomonas putida*
5. *Pseudomonas mendocina*
6. *Enterobacter cloacae*
7. *Vibrio cincinnatiensis*
8. *Escherichia coli* apă
9. *Escherichia coli* ATCC
10. *Escherichia coli* ATCC
11. *Escherichia coli* apă
12. *Escherichia coli* apă

Figura 5. Aplicația AquaCheck pentru detecția rapidă și automată a *Escherichia coli* și enterococilor

În prezent, metodele convenționale de analiză microbiologică implică proceduri laborioase și timp îndelungat de răspuns, limitând capacitatea autorităților de a reacționa prompt la episoade de contaminare. Proiectul de față răspunde acestei provocări prin dezvoltarea și validarea unui sistem integrat, bazat pe:

- aplicația AquaCheck pentru detecția rapidă și automată a *Escherichia coli* și enterococilor;

- model matematic pentru estimarea riscului epidemiologic zilnic și anual;
- integrarea inteligenței artificiale pentru creșterea acurateței și pentru predicția episoadelor de contaminare;
- evaluarea calității apei și nisipului printr-un sistem unic de clasificare adaptat condițiilor din Marea Neagră;
- testarea unui biosenzor electrochimic ca instrument complementar de diagnostic rapid.

Prin combinarea acestor tehnologii, proiectul facilitează trecerea de la monitorizarea reactivă la monitorizarea preventivă, oferind un cadru modern pentru gestionarea sanitară a plajelor și pentru protecția utilizatorilor.

Rezultatele obținute confirmă faptul că AquaCheck reprezintă o soluție modernă, eficientă și accesibilă pentru monitorizarea microbiologică a plajelor, oferind:

- Rapiditate în obținerea datelor, cu rezultate disponibile în aceeași zi.
- Acuratețe crescută, datorită algoritmilor de procesare automată a imaginilor care reduc semnificativ erorile de interpretare.
- Integrare avansată de inteligență artificială, cu rol în predicția contaminării și în optimizarea deciziilor sanitare.
- Corelare cu factorii de mediu, demonstrând influența determinantilor climatici și antropici asupra nivelului de contaminare.
- Valoare epidemiologică reală, permițând evaluarea riscului de infecție atât la nivel zilnic, cât și anual.

În ansamblu, metodologia propusă constituie un progres major în domeniul supravegherii sanitare costiere. Aceasta oferă o bază solidă pentru implementarea unui sistem modern de clasificare a siguranței apei și nisipului, răspunzând eficient nevoilor autorităților, operatorilor de plajă și publicului larg. Prin accesibilitatea și performanța sa, AquaCheck facilitează tranziția către monitorizarea inteligentă, integrată și orientată spre prevenție, contribuind la creșterea nivelului de protecție a sănătății publice și la managementul durabil al ecosistemelor costiere.

Aplicarea analizelor climatice avansate și a modelelor AI în predicția contaminării microbiene. În cadrul acestui raport de cercetare am urmărit nu doar caracterizarea distribuției bacteriene și evaluarea riscurilor microbiologice din mediile recreaționale ale litoralului, ci și dezvoltarea unui instrument predictiv inteligent, capabil să anticipeze nivelurile de contaminare ale nisipului pe baza factorilor climatici.

Din perspectivă microbiologică, încărcătura bacteriană din nisip este rezultatul unei interacțiuni complexe dintre microorganismele prezente (enterococi, coliformi termotoleranți, fungi, levuri), variabilele de mediu (umiditate, precipitații, expunere solară, temperatură) și dinamica antropogenică. De aceea, utilizarea analizelor climatice avansate și a algoritmilor de inteligență artificială reprezintă o inovație necesară pentru înțelegerea evoluției acestor microorganisme și pentru anticiparea perioadelor cu risc sanitar crescut.

Prin integrarea Analizei Componentelor Principale (PCA) și a algoritmului XGBoost, proiectul a urmărit transformarea datelor brute într-un sistem de supraveghere microbiologică, capabil să preconizeze depășirea pragurilor critice și să optimizeze gestionarea zonelor de plajă.

Preprocesarea datelor climatice și selecția variabilelor. Baza de date inițială a inclus multiple variabile meteorologice și condiții de mediu, esențiale din punct de vedere microbiologic. Factorii selectați — temperaturi, umiditate, precipitații, expunere solară, viteză a vântului, presiune atmosferică și starea mării — influențează în mod direct supraviețuirea și multiplicarea bacteriilor indicator.

- **umiditatea ridicată** menține viabilitatea microorganismelor în nisip;
- **precipitațiile** pot transporta bacteriile către stratul superficial;
- **temperatura apei și aerului** influențează rata metabolică și replicarea microbiană;
- **expunerea solară (UV)** acționează ca bactericid;
- **wind-driven dispersion** afectează redistribuirea particulelor de nisip contaminate.

Standardizarea variabilelor a fost esențială pentru prevenirea dominării artificiale a componentelor PCA.

Analiza Componentelor Principale (PCA) – interpretare microbiologică. PCA a permis reducerea dimensionalității datelor și identificarea „semnăturilor climatice” care guvernează contaminarea bacteriană.

PC1 – Gradient climatic „Uscat–Însorit ↔ Umed–Ploios”. Această componentă a separat clar condițiile favorabile scăderii încărcăturii microbiene (zile însorite, temperaturi ridicate, UV intens) de cele favorabile proliferării bacteriene (umiditate, precipitații, cer acoperit).

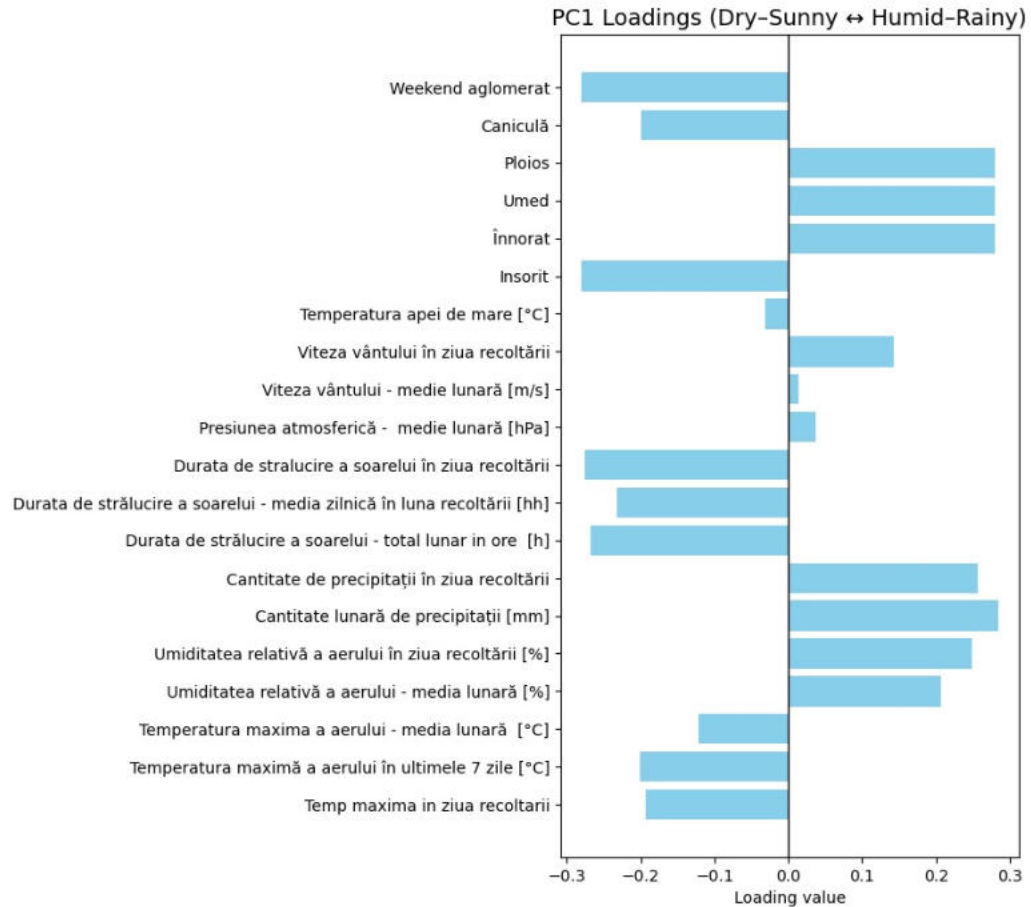


Figura 6 - Analiza Componentelor Principale (PCA) –
„Uscat-Însorit ↔ Umed-Ploios”

Enterococii și coliformii termotoleranți cresc semnificativ în mediu umed, unde supraviețuirea celulară este extinsă, iar transportul microbial prin apă este facilitat. Zilele uscate și însorite favorizează inactivarea bacteriană, datorită radiațiilor UV.

PC2 – Gradient „Vânt/Presiune ↔ Temperatura mării”. Această componentă diferențiază perioadele reci și instabile (vânt intens, presiune ridicată) de cele calde și calme, când temperatura mării este crescută.

Microbiologic:

- temperaturile ridicate din apă pot alimenta indirect contaminarea nisipului prin aerosolizare și transfer;
- perioadele reci limitează multiplicarea microbială.

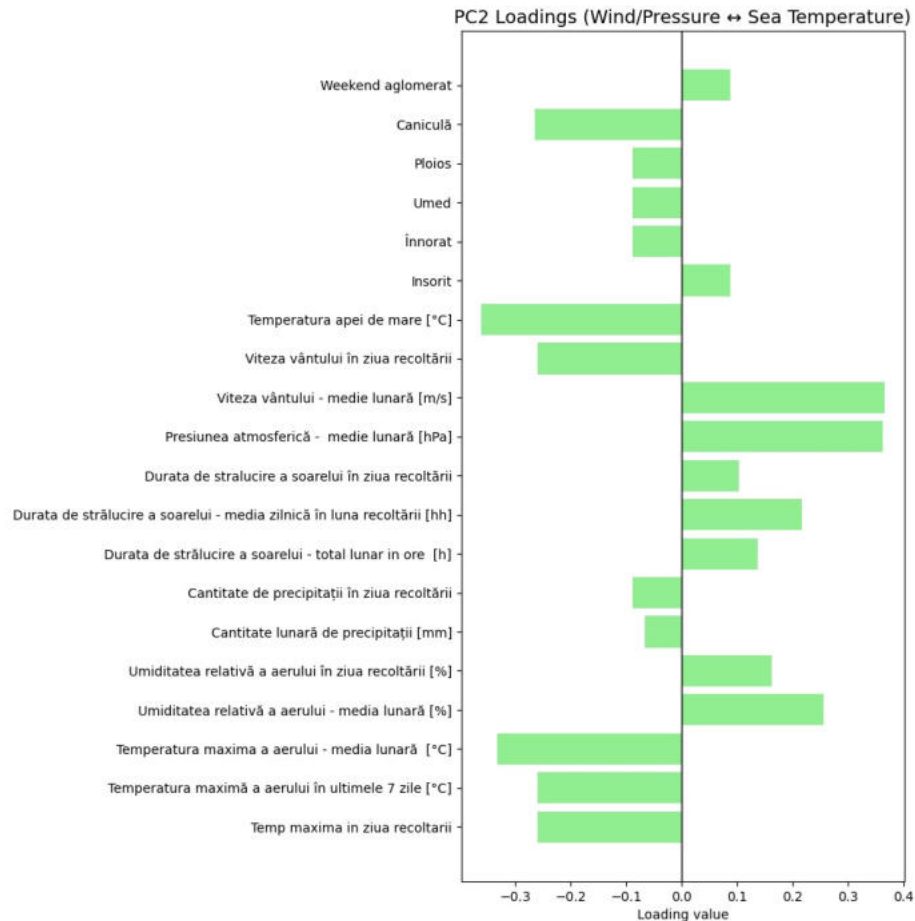


Figura 6 - Analiza Componentelor Principale (PCA) –
„Vânt/Presiune ↔ Temperatura mării”

Corelația PCA–microorganisme. Corelațiile Spearman au confirmat relevanța componentelor PCA:

- **PC1 negativ (umid–ploaie)** → niveluri ridicate de enterococi și coliformi
- **PC1 pozitiv (însorit–uscat)** → niveluri reduse, datorită efectelor bactericide ale radiațiilor UV

Aceste relații validează robustețea PCA ca predictor climatic al contaminării microbiene.

Construirea modelului XGBoost pentru predicția contaminării. Modelul XGBoost a fost utilizat pentru clasificarea riscului microbiologic în două categorii:

- **0 – SAFE** (≤ 100 UFC/g coliformi termotoleranți)
- **1 – NOT SAFE** (>100 UFC/g)

Variabilele utilizate: PC1, PC2, umiditate și precipitații — toți factorii cu relevanță microbiologică demonstrată.

Relevanța microbiologică a predicției. Aceste variabile sunt indicatori indirecti ai

- „stării de risc microbial”, deoarece: bacteriile indicator se multiplică în medii umede,

- precipitațiile pot mobiliza microorganisme din surse adiacente,
- PC1 și PC2 capturează combinațiile climatice care determină supraviețuirea microbiană.

XGBoost a fost ales datorită capacității sale de a modela:

- relații complexe, non-liniare între climă și bacterii,
- interacțiuni subtile între variabilele PCA și variabilele individuale.

Probleme întâmpinate și soluții implementate. Dezechilibrul de clase („Not safe” > „Safe”) reprezintă o situație frecventă în microbiologia mediului.

SMOTE a generat în mod sintetic exemple suplimentare pentru clasa „Safe”, îmbunătățind:

- capacitatea modelului de a recunoaște perioade cu risc redus,
- recall-ul pentru clasa minoritară,
- stabilitatea generală a modelului.

Microbiologic, acest lucru permite sistemului să distingă mai bine „situațiile normale” de cele în care contaminarea este generată de condiții extreme.

Performanța modelului. Acuratețea finală (0.68–0.73) este considerată bună pentru un set climatic relativ limitat, iar matricea de confuzie a arătat:

- detectare excelentă a situațiilor „NOT SAFE” → modelul este util pentru intervenție preventivă
- ameliorarea identificării situațiilor „SAFE” → datorită SMOTE
- performanță generală adecvată pentru decizii operaționale

Automatizarea procesului de predicție. Pipeline-ul implementat permite:

- introducerea unei singure observații climatice
- prelucrarea automată prin PCA
- generarea predicției cu XGBoost
- afișarea mesajului vizual „SAFE” sau „NOT SAFE”
- exportul rezultatului în fișier CSV

Acest sistem poate funcționa ca un **instrument de avertizare timpurie** pentru administrațiile de plajă, DSP/ANSP sau operatorii turistici.

Prin combinarea tehnicilor PCA, XGBoost și SMOTE, a fost dezvoltat un model scalabil și robust pentru predicția riscului microbiologic al nisipului pe baza datelor climatice. Integrarea condițiilor meteo cu microbiologia mediului permite:

- identificarea rapidă a perioadelor cu risc crescut,
- optimizarea programelor de recoltare și analiză,
- luarea deciziilor preventive privind siguranța recreațională.

Această abordare reprezintă un pas inovator către digitalizarea supravegherii microbiologice a litoralului și poate fi extinsă în viitor pentru apă, sedimente și ecosisteme marine complexe.

In acest context recomandările practice pentru administrația plajelor ar putea sa includă:

1. Monitorizare integrată apă–nisip

- Extinderea programelor de supraveghere microbiologică și către nisip, nu doar asupra apei de îmbăiere
- Realizarea analizelor cu o frecvență mai mare în perioadele cu umiditate ridicată și precipitații frecvente
- 2. *Avertizare și comunicare publică adaptată condițiilor meteorologice*
 - Emiterea de informări atunci când sunt înregistrate condiții favorabile dezvoltării bacteriene
 - Actualizarea vizibilă a indicatoarelor de calitate sanitară pe plajă
- 3. *Creșterea eficienței activităților de igienizare a plajelor*
 - Îndepărtarea depozitelor organice care pot favoriza proliferarea microorganismelor (alge, resturi biologice)
 - Instruirea personalului privind manipularea deșeurilor în zonele cu expunere ridicată
- 4. *Planuri de intervenție rapidă după episoade de precipitații*
 - Reevaluarea calității microbiologice a plajelor în maximum 24–48 h de la ploi abundente
 - Posibila restricționare temporară a utilizării plajei în caz de contaminare crescută
- 5. *Optimizarea amenajărilor de plajă*
 - Configurarea spațiilor de recreere pentru a reduce retenția de apă în nisip
 - Promovarea măsurilor ce favorizează uscarea rapidă a nisipului (curățare mecanică, nivelare)
- 6. *Colaborare interinstituțională și cercetare continuă*
 - Schimb de date între autorități, institute de cercetare și operatori economici
 - Implementarea de programe pilot pentru evaluarea riscului patogen pe litoral.

Concluzii

Studiul a evidențiat faptul că mediul costier românesc prezintă o variabilitate microbiologică determinată în principal de condițiile climatice și hidrologice locale. În apa de îmbăiere, izolarea speciilor de *Vibrio* cu diferite niveluri de patogenitate subliniază necesitatea unei monitorizări continue, mai ales în perioadele cu temperaturi crescute și salinitate favorabilă dezvoltării microorganismelor.

În ceea ce privește nisipul, analizele de corelație au arătat că umiditatea, precipitațiile și expunerea la radiațiile solare sunt factorii principali care influențează încărcătura bacteriană, în timp ce activitatea umană intensă nu determină o creștere semnificativă a contaminării.

Astfel, microclimatul costier reprezintă un determinant major al prezenței bacteriilor indicator și al microorganismelor potențial patogene, atât în apă, cât și în nisip. Rezultatele obținute confirmă importanța unei strategii integrate de monitorizare a plajelor, adaptată dinamicii mediului marin și litoral, cu scopul protejării sănătății publice și a menținerii calității zonelor de recreere.

Referințe bibliografice

1. Boggild, A.K., Libman, M., Greenaway, C., McCarthy, A.E., 2016. CATMAT statement on disseminated strongyloidiasis: prevention, assessment and management guidelines. *Can. Commun. Dis. Rep.* 42, 12–19.
2. Brandao, J., Solo-Gabriele, H.M., Gordon, B., Ferguson, A.C., 2015. Recreational environments – pathogenic fungi in public places. In: Viegas C. et al. (Eds.), *Environmental Mycology in Public Health*. Elsevier.
3. Brandao, J., Verissimo, C., Rosado, M.L., Falcão, M.L., Giraldes, A., Rosado, C., et al., 2002. Qualidade microbiologica de areias de praias litorais, relatório final. Associação Bandeira Azul da Europa (ABAE).
4. Britton, E., Hales, S., Venugopal, K., Baker, M.G., 2010. Climate variability and change on cryptosporidiosis and giardiasis rates in New Zealand. *Water Health* 8, 561–571.
5. Brown, J.S., Stein, E.D., Ackerman, D., Dorsey, J.H., Lyon, J., Carter, P.M., 2013. Metals and bacteria partitioning to various size particles in stormwater runoff. *Environ. Toxicol. Chem.* 32, 320–328.
6. Brown, K.I., Boehm, A.B., 2016. Transport of fecal indicators from beach sand to the surf zone by recirculating seawater. *Environ. Sci. Technol.* 50, 12840–12847.
7. Brown, K.I., Graham, K.E., Boehm, A.B., 2017. Risk-based threshold of gull-associated fecal marker concentrations for recreational water. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 4, 44–48.
8. Brown, S.J., Caesar, J., Ferro, C.A.T., 2008. Global changes in extreme daily temperature since 1950. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113.
9. Burge, C.A., Eakin, C.M., Friedman, C.S., Froelich, B., Hershberger, P.K., Hofmann, E.E., et al., 2014. Climate change influences on marine infectious diseases. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 6, 249–277.
10. Cosgrove, S.E., Carmeli, Y., 2003. The impact of antimicrobial resistance on health and economic outcomes. *Clin. Infect. Dis.* 36, 1433–1437.
11. Eichmiller, J.J., Borchert, A.J., Sadowsky, M.J., Hicks, R.E., 2014. Decay of genetic markers for fecal bacterial indicators and pathogens in sand. *Water Res.* 59, 99–111.

12. Gast, R.J., Gorrell, L., Raubenheimer, B., Elgar, S., 2011. Impact of erosion and accretion on the distribution of enterococci in beach sands. *Cont. Shelf Res.* 31, 1457–1461.
13. Zhang, Q., Eichmiller, J.J., Staley, C., Sadowsky, M.J., Ishii, S., 2016. Correlations between pathogen concentration and fecal indicator marker genes in beach environments. *Sci. Total Environ.* 573, 826–830.
14. Baker-Austin, C., Oliver, J.D., Alam, M., Ali, A., Waldor, M.K., Qadri, F., Martinez-Urtaza, J., 2018. *Vibrio* spp. infections. *Nat. Rev. Dis. Primers* 4, 8.
15. Vezzulli, L., Grande, C., Reid, P.C., Hélaouët, P., Edwards, M., et al., 2016. Climate influence on *Vibrio* and associated human diseases during the past half-century. *PNAS* 113, E5062–E5071.
16. Martinez-Urtaza, J., Baker-Austin, C., 2013. Environmental determinants of *Vibrio* infections. *Microbiol. Spectrum* 1(1).
17. Solo-Gabriele, H.M., Harwood, V.J., Kay, D., Fujioka, R., Sadowsky, M.J., Whitman, R.L., et al., 2016. Beach sand and the potential for infectious disease transmission. *Environ. Sci. Technol.* 50, 3606–3623.
18. Hartmann, M., Stenlid, J., Hallenberg, N., 2017. Persistence of microorganisms in coastal sediments and sands. *Appl. Environ. Microbiol.* 83(13).
19. Boehm, A.B., Yamahara, K.M., 2016. Microbial ecology of the beach environment. *Nat. Rev. Microbiol.* 14, 513–523.
20. Stocker, R., 2012. Marine microbes see a sea of gradients. *Science* 338, 628–633.
21. WHO, 2020. Antimicrobial resistance: global report on surveillance.
22. Harnisz, M., Kochanowicz, A., 2018. Antibiotic-resistant bacteria in aquatic ecosystems. *Sci. Total Environ.* 624, 1175–1182.
23. Leonard, A.F.C., Zhang, L., Balfour, A.J., Gaze, W.H., et al., 2015. Exposure to antibiotic-resistant *E. coli* in coastal waters. *Environ. Int.* 82, 92–100.
24. Doornik, J.A., 2018. PCA for environmental datasets. *Environmental Modelling & Software* 108, 1–13.
25. Chen, T., Guestrin, C., 2016. XGBoost: A scalable tree boosting system. *KDD Conference Proceedings*, 785–794.

26. Meyer, A., Pagel, H., 2022. Machine learning approaches *for environmental microbial prediction. Environ. Microbiol. 24(3), 1234–1250.*

Semnătura:

Şef lucr. dr. Andra-Cristina BOSTĂNARU-ILIESCU –



Drd. Robert CAPOTĂ -



Drd. Paula LOREŢ (CUCU)



Drd. Mălina Maria ŞURUBARU -

