

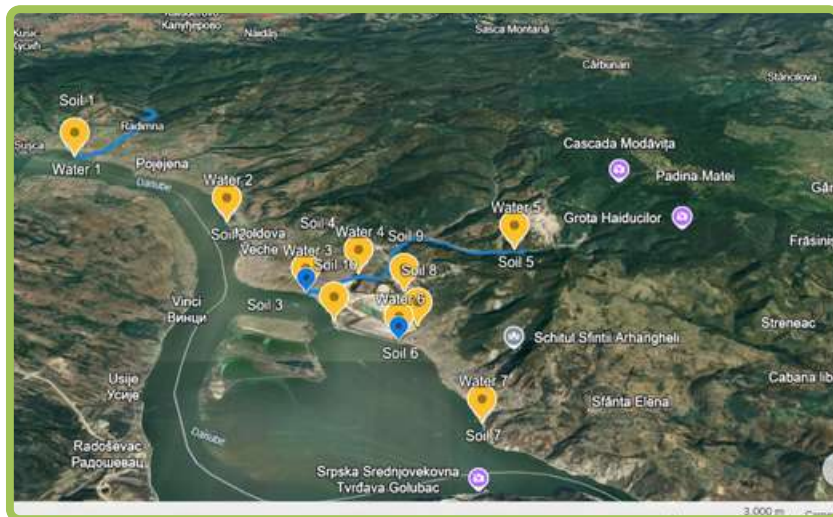
Proiect ERA-MIN

**Rezistența bacteriană
și ecotoxicitatea ecosistemelor miniere cuprifere.
Implicații pentru monitorizarea mediului și
bioremediere în zona transfrontalieră România–Serbia**



Proiectul ERA-MIN

Zona Moldova Nouă reprezintă un punct de interes major pentru monitorizarea calității mediului în context transfrontalier, având în vedere persistența depozitelor istorice de steril în apropierea graniței și influența lor potențială asupra ecosistemelor din bazinul Dunării.



Amplasarea punctelor de prelevare a probelor de mediu

- Sector de control: pentru stabilirea fondului natural: rețeaua hidrografică locală: râurile Radimna (W₁), Pârva Reca (W₂) și solurile adiacente (S₁, S₂).
- Zone din arealul localității Moldova Nouă: canal colector (W₃), râul Boșneag (W₄), respectiv solurile adiacente (S₃, S₄).
- Fluviul Dunărea, cu accent pe sectoarele din apropierea depozitelor de steril (W₆, W₇, respectiv S₆, S₇).
- Zone cu amprentă industrială: în proximitatea carierei miniere (W₅, respectiv S₅), respectiv perimetral iazurilor Tăușani-Boșneag (S₈, S₉, S₁₀).
- Resurse subterane: probe recoltate din fântâni locale (W₈, W₉, W₁₀).

Stabilirea fondului natural /Amonte: W_I–W₂, S_I–S₂

- Solul (S_I–S₂): Are valori normale, ecologice, pentru o zonă cu zăcăminte metalifere (Cu: 42 mg/kg, Ni: 29 mg/kg, Pb: 18 mg/kg). Toate valorile sunt sub pragurile de alertă pentru soluri mai puțin sensibile.
- Apa (W_I–W₂): Deși spală această zonă, apa are o mineralizare foarte mică (TDS 103 mg/L în sol / 223 mg/L în apă).
- *Impact microbiologic*: Aceasta este zona etalon (martor). Aici UFC/ml pe agar nutritiv este maxim, biodiversitatea este intactă, iar bacteriile nu sunt supuse unui stres toxic sever.



Campanii prelevare W_I, W₂

Sectorul de interferență a haldelor de steril și râul Boșneag: W₃-W₄ / S₃-S₄

- Solul (S₃-S₄): Solul acumulează concentrații masive de metale. Din punct de vedere microbiologic, acest sol suferă o presiune de selecție.
- Apa (W₃-W₄): Valoarea CBO₅ este foarte scăzută ($3,9 \pm 0,5$ mg/L), iar COD-Mn este de $7,2 \pm 0,5$ mg/L. Acest consum biochimic redus de oxigen arată că în apă activitatea bacteriilor heterotrofe (cele care descompun materia organică) este inhibată. Cauza principală este prezența metalelor grele dizolvate, care acționează ca bactericide sau inhibitori enzimatici.
- *Impact microbiologic*: Bacteriile comune dispar, fiind înlocuite de microorganisme extremofile și metalo-tolerante (de exemplu, bacterii din genurile *Pseudomonas* sau *Bacillus* capabile să bioacumuleze sau să precipite metalele).



Punct prelevare W₃/S₃

Impactul sitului minier: W5 și S5

- Solul (S5): Înregistrează o poluare istorică masivă. Solul a absorbit și a reținut metalele grele timp de 20 de ani. Acest lucru se vede în conductivitatea uriașă a solului (EC: 1190 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indicând o acumulare masivă de săruri și sulfati.
- Apa (W5): Deși solul este extrem de poluat, apa de suprafață din acest punct are doar 53,6 $\mu\text{g}/\text{L}$ de cupru. Aici pH-ul joacă rol de tampon biologic. pH-ul solului este de 6,7 (ușor acid spre neutru), iar al apei este de 7,6. Acest pH blochează chimic metalele în matricea solului. Ele nu se pot dizolva masiv în apă.
- *Impact microbiologic*: Flora bacteriană normală a fost înlocuită în ultimii 20 de ani de comunități microbiene specializate, capabile de biosorbție (fixarea cuprului pe pereții celulari) și bioacumulare. Solul este stabilizat biologic, dar fragil.



Campanii prelevare probe, W5

Albia majoră a Dunării: W6–W7 și S6–S7

- Solul (S6–S7): Are concentrații mari de metale (Cu: 162 mg/kg, Pb: 106 mg/kg). Dunărea colectează sedimentele fine spălate din situl minier de-a lungul deceniilor, depunându-le în albia majoră în timpul viiturilor.
- Apa (W6–W7): Așa cum am observat, apa are o poluare metalică moderată, dar o poluare organică uriașă (COD-Mn: 36 mg/L).
- *Interpretare ecologică:* În aceste puncte de prelevare, reprezentate de apa din Dunăre există atât o diluare a concentrațiilor elementelor chimice datorate debitului masiv al fluviului, cât și o stagnare a apei, cu acumulare de vegetație în descompunere, poate chiar deversări domestice necontrolate.
- *Impact microbiologic:* Pe agar nutritiv standard, UFC este de ordin extrem de mare, mascând prezența metalelor, deoarece bacteriile heterotrofe se înmulțesc masiv pe baza nutrienților organici disponibili.



Campanii prelevare probe, W7

Perimetrul haldelor de steril Tăușani – Boșneag: S8–S10

- Solul (S8–S10): Prezintă valori crescute (Cu: 216 mg/kg, Pb: 138 mg/kg). Haldelor de steril le lipsește o acoperire vegetală completă, iar praful purtat de vânt (fenomen cunoscut în zona Moldova Nouă) contaminează solul perimetral.
- Corelare și diagnostic: Solul din jurul haldelor Tăușani-Boșneag reține metalele ca un burete. Solul de suprafață (pH 7,1) și straturile geologice succesive funcționează ca un filtru biogeochimic. Bacteriile rezistente din sol captează poluanții și opresc migrarea lor pe verticală.
- *Impact microbiologic: filtrarea biologică (biosorbție):* Microorganismele și materia organică din sol acționează ca un filtru biologic natural. Bacteriile din sol captează ionii de metale pe pereții lor celulari, curățând apa care se infiltrează.



Iazurile de steril Tăușani-Boșneag

Evaluarea apelor din fântâni: W8–W10

- Toate metalele grele au valori extrem de mici, aproape neglijabile (Cu: 4,4 µg/L, Ni: 4,5 µg/L, Pb: 0,6 µg/L), fiind mult sub limitele de potabilitate.
- Bariera de pH: pH-ul solului și al apei subterane (7,5) favorizează precipitarea metalelor. Cuprul și plumbul din infiltrațiile de la suprafață sunt blocate în straturile superioare ale solului și nu ajung în pânza freatică.

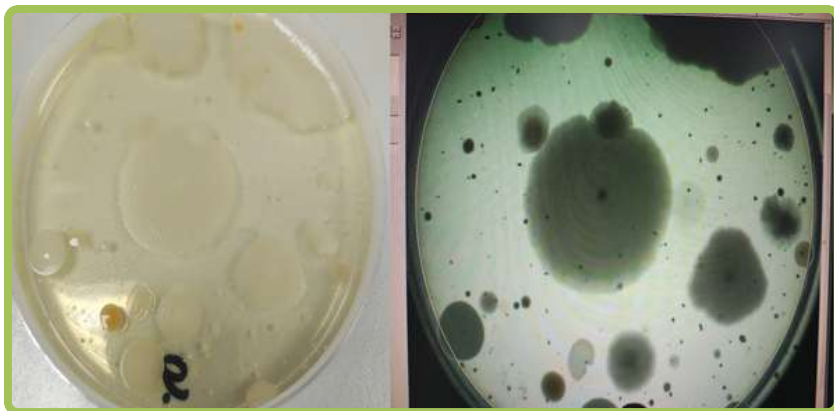


Campanii prelevare ape fântâni, Moldova Nouă

- Calitatea apei din fântâni: apa subterană este bogată în săruri minerale dizolvate (fenomen normal pentru fântâni), iar indicatorii organici confirmă o apă curată din punct de vedere biologic și chimic.

Importanța Numărului Total de Germeni (NTG), exprimat sub formă de Unități Formatoare de Colonii (UFC), în evaluarea ecotoxiciții

- În cazul unui sit minier închis, de extracție a cuprului, determinarea UFC în apă și sol are o importanță critică din două motive principale:
- *Indicator de stres toxic*: Cuprul în concentrații mari este un bactericid puternic. Un număr extrem de scăzut de UFC în solul sau apa din interiorul sitului, comparativ cu o zonă nepoluată, indică un nivel ridicat de toxicitate care inhibă viața microbiană normală.
- Evaluarea stării ecologice: UFC reflectă capacitatea de regenerare a solului. Solurile miniere cu un număr minim de microorganisme heterotrofe (care descompun materia organică) sunt „soluri moarte”, lipsite de cicluri biogeochimice funcționale.



Plăci incubate 48h, pentru estimarea UFC

Modul de interpretare a rezultatelor (UFC/mL, UFC/g), exprimat sub forma ratei de inhibiție (RI)

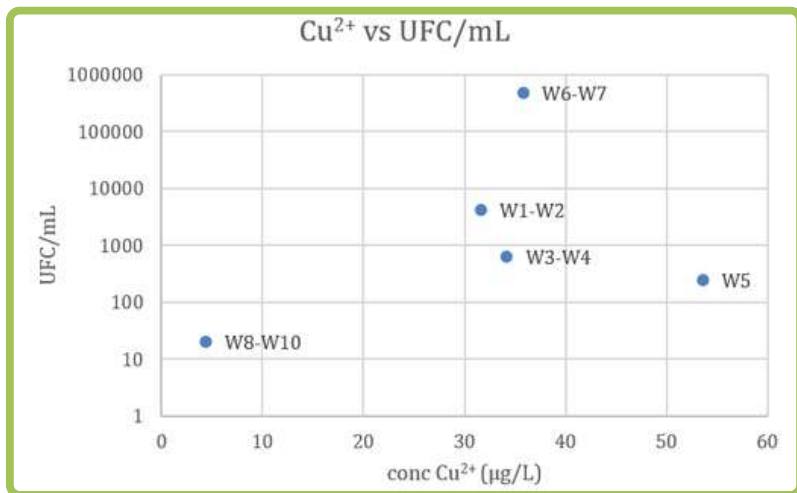
- Într-un sit închis de exploatare minieră, numărul de UFC este un bioindicator sensibil al stresului toxic. Cuprul la concentrații ridicate este bactericid, astfel încât un număr foarte scăzut de UFC - comparativ cu o probă de referință (control) neafectată - semnalează inhibarea vieții microbiene normale.
- Spre deosebire de standardele privind apa potabilă, unde un număr ridicat de UFC indică o calitate slabă, într-un context de impact asupra mediului interpretarea este inversată: o probă de sol sau apă sănătoasă și biologic activă este de așteptat să prezinte un număr ridicat de UFC, deoarece acest lucru reflectă cicluri biogeochimice funcționale și rezistență ecologică.
- Deoarece valorile brute ale UFC variază în mod natural în funcție de anotimp și umiditate, indicatorul comparativ cheie este rata de inhibiție (RI), calculată în raport cu un punct de control nepoluat:

$$RI = \frac{UFC \text{ punct prelevare}}{UFC \text{ punct control}} \times 100$$

- Inhibiție 90–100% → *poluare critică/extremă* — colapsul numărului de UFC)
- Inhibiție 50–90% → *poluare moderată spre puternică* — stres bacteriostatic, activitate microbiană redusă, dar nu eliminată.
- Inhibiție < 50% → *poluare slabă sau toleranță biologică dobândită* — o comunitate microbiană rezistentă, adaptabilă.

Corelație între concentrația de cupru dizolvat (Cu^{2+} , $\mu\text{g/L}$) și Numărul Total de Germeni din apă (UFC/mL)

Distribuția punctelor în graficul de corelație directă evidențiază o decuplare clară între poluarea cu metale grele și dinamica microbiană a sitului, determinată de factori ecologici auxiliari.

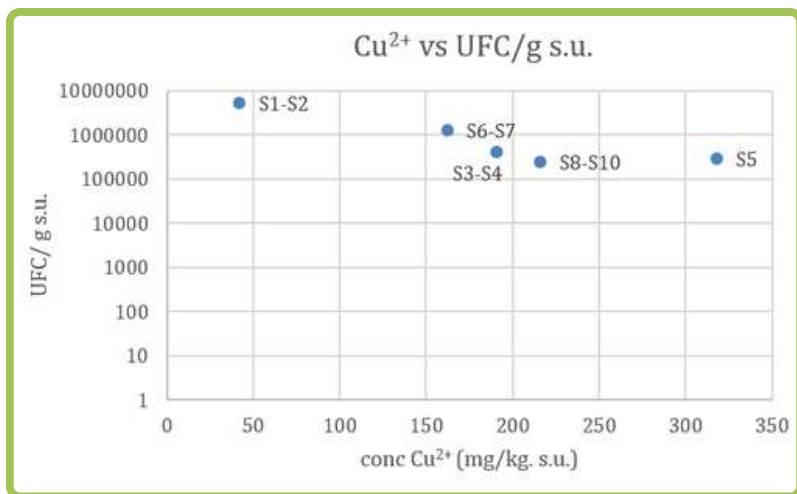


Diagramă de corelație între concentrația de cupru dizolvat (Cu^{2+} , $\mu\text{g/L}$) și Numărul Total de Germeni (UFC/mL) în probele de apă

- Efectul ecranului organic (W6-W7): Deși prezintă o concentrație de cupru rezidual moderată, surplusul masiv de materie organică din această zonă stimulează o explozie a bacteriilor heterotrofe ($4,8 \times 10^5$ UFC/mL), anulând complet toxicitatea metalului.
- Zonarea clasică a toxicității (W1-W2 → W3-W4 → W5): se observă un trend biologic perfect descrescător, din amonte către zona cu impact minier.
- Eficiența hidrogeologică (W8-W10): număr redus de bacterii în apa fântânilor demonstrează că solul acționează ca un filtru protector eficient, reținând poluanții la suprafață.

Corelație între concentrația de cupru (Cu^{2+} , mg/kg s.u.) și Numărul Total de Germeni din sol (UFC/g s.u.)

Graficul de corelație directă pentru matricea de sol (S1–S10) evidențiază o amprentă clară a poluării istorice, remanente, și o presiune de selecție mult mai stabilă și severă decât cea observată în cazul probelor de apă. Repartizarea punctelor pe grafic relevă o dinamică ecologică în trei paliere distincte.

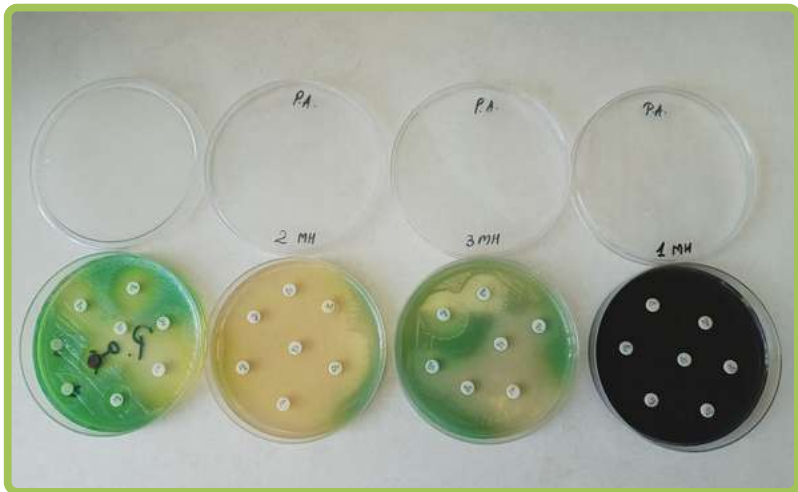


Diagramă de corelație între concentrația de cupru dizolvat (Cu^{2+} , mg/kg s.u.) și Numărul Total de Germeni (UFC/g s.u.) în probele de sol

- Declinul exponențial al microflorei sub presiune metalică (S1–S2 → S3–S4 → S5): Se observă o corelație invers proporțională pronunțată între acumularea cuprului și viabilitatea microbiană heterotrofă.
- Efectul de tamponare al ecosistemului fluviatil (S6–S7): Solurile din albia majoră a Dunării reprezintă o deviație pozitivă importantă de la curba de toxicitate.
- Rezistența cronică în perimetrul haldelor (S8–S10): Solurile din jurul haldelor Tăușani-Boșneag prezintă un nivel ridicat de contaminare, dar susțin o comunitate microbiană stabilizată.

Rezistența la metale grele și co-selecția rezistenței la antibiotice

- Cuprul poate exista sub forme Cu^+ și Cu^{2+} și poate participa la reacții redox generatoare de specii reactive de oxigen.
- Excesul de cupru poate produce stres oxidativ, alterarea proteinelor, afectarea membranelor și lezarea ADN-ului. Bacteriile răspund prin legarea metalului, export activ, modificarea permeabilității și sisteme antioxidante.
- În urma realizării acestui studiu observațional, bazat pe o combinație de caracterizare chimică a zonei studiate, cultivare și testare fenotipică a speciilor bacteriene identificate, se poate afirma că datele permit evaluarea unei posibile asocieri care să determine co-selecția, fără însă a demonstra cauza acesteia.



Culturi bacteriene incubate pentru stabilirea rezistenței la antibiotice

Comunități bacteriene și susceptibilitate antimicrobiană

Presiunea geochimică selectează comunități microbiene capabile să tolereze concentrații crescute de metale, variații de umiditate și schimbări ale disponibilității nutrienților. În zonele afectate de exploatare istorice pot apărea nișe oligotrofe și restrictive, în care taxonii sensibili sunt înlocuiți de microorganisme specializate. Din acest motiv, monitorizarea microbiologică completează analiza chimică și poate furniza indicatori timpurii ai modificării funcționării ecosistemului.

Zonă	Locație probă	Taxoni predominanți	Observație
W1-W2	Amonte	<i>Escherichia coli</i> ; <i>Pseudomonas anguilliseptica</i>	Predominant sensibil; fenotip wild-type
W3-W5	Zona minieră	<i>Bacillus spp.</i> ; <i>Escherichia coli</i> ; <i>Pseudomonas spp.</i>	Taxoni rezilienți adaptați stresului
W6-W7	Dunăre	<i>Rheinheimera soli</i> ; <i>Aeromonas spp.</i> ; <i>Acidovorax temperans</i>	Predominant sensibil
W8-W10	Fântâni	<i>Ralstonia pickettii</i> ; <i>Streptococcus lutetiensis</i> ; <i>Staphylococcus warneri</i>	Rezistență intrinsecă la <i>Ralstonia</i> ; profil variabil la ceilalți

Taxoni predominanți identificați în arealul de studiu

Impactul asupra microbiomului și ciclurilor biogeochimice

- Presiunea geochimică selectează comunități microbiene capabile să tolereze concentrații crescute de metale.
- În zonele afectate de exploatare minieră istorice pot apărea nișe oligotrofe și restrictive, în care taxonii sensibili sunt înlocuiți de microorganisme specializate.
- Zonele cu presiune minerală ridicată au fost caracterizate de bacterii adaptate stresului toxic, inclusiv *Bacillus* cu capacitate de sporulare și *Pseudomonas* cu potențial de biosorbție.
- Toleranța la metale și rezistența la antibiotice pot coexista la nivel ecologic. Din acest motiv, monitorizarea microbiologică completează analiza chimică și poate furniza indicatori timpurii ai modificării funcționării ecosistemului.
- Monitorizarea UFC, comparată cu pH-ul, conductivitatea și concentrațiile de metale dizolvate, poate constitui un instrument de avertizare timpurie, cu cost redus, pentru urmărirea redresării ecologice - sau a degradării continue - a siturilor miniere.
- Rezultatele monitorizării au relevat un platou constant de inhibiție microbiană de aproximativ 92-95% în zonele cu cele mai mari încărcături de cupru - o dovadă că, după două decenii, comunitățile microbiene supraviețuitoare ale sitului s-au adaptat la stresul cronic al metalelor, în loc să continue să scadă. Punctele monitorizate de-a lungul luncii inundabile a Dunării au rupt acest tipar: încărcătura organică ridicată de acolo chează cuprul și alimentează o înflorire bacteriană, mascand temporar semnalul toxic al metalului.
- Monitorizarea transfrontalieră ar trebui să combine indicatorii chimici și microbiologici într-un cadru One Health, pentru detectarea timpurie a riscurilor de mediu și sănătate publică.

Interreg



Cofinanțat de
Uniunea Europeană

IPA România – Serbia

Contactează-ne:



004 0256 404 509



nicoleta.nemes@upt.ro



Timișoara, Gavril Musicescu nr. 138



www.transfrontaliera.upt.ro

Titlul proiectului: Evaluarea riscului de mediu din activități miniere ca urmare a depozitării sterilului în zona transfrontalieră România – Serbia

Cod JEMS RORS00063

Editorul materialului: Universitatea Politehnica Timișoara

Data publicării: August 2026

Responsabilitatea pentru conținutul acestui material revine autorilor.

Conținutul materialului nu reprezintă în mod necesar poziția oficială a Uniunii Europene.

Reproducerea este autorizată cu condiția să fie menționată sursa și să fie indicate orice modificări. În cazul unor reclamații contactați: **romania-serbia@mdlpa.gov.ro**

www.romania-serbia.net

