



UNIVERSITATEA „BABES–BOLYAI”  
CLUJ-NAPOCA

FACULTATEA DE ȘTIINȚA ȘI INGINERIA  
MEDIULUI  
ȘCOALA DOCTORALĂ ȘTIINȚA  
MEDIULUI



## ***REZUMAT***

### ***TEZĂ DE DOCTORAT***

#### ***Caracteristici geochemice ale sistemului hidric din zona minieră Roșia Montană***

**Conducător de doctorat:**

***Prof. Univ. Dr. Laurențiu – Călin Baciu***

**Student doctorand:**

***Alexandra Iulia Cozma – Colcer***

**Cluj-Napoca  
2019**

# MULȚUMIRI

*Susținerea tezei de doctorat reprezintă o etapă de o mare însemnătate din întregul proces de pregătire profesională și are la bază un cumul de muncă, visuri realizate, eforturi, sacrificii și bineînțeles o echipă căreia aș vrea să îi mulțumesc.*

*Aș dori pe această cale, să îmi exprim aprecierea sinceră tuturor persoanelor care m-au susținut în cei 7 ani a perioadei de doctorat, perioadă de o nuanță aparte pentru mine ca individ, căci în orice vis care devine realitate cu multă muncă și dorință de cunoaștere, un procent mare îl reprezintă parcursul acestui drum.*

*Mă simt onorată, să adresez alese mulțumiri și deosebită recunoștință domnului **Prof. Dr. Călin Baci**, în calitate de conducător științific, pentru tot sprijinul acordat în această perioadă, timpul alocat pentru această lucrare și pentru răbdarea de care a dat dovadă pe parcursul tuturor etapelor redactării acestei lucrări. Domnul profesor a reprezentat un real sprijin profesional și a deschis orizontul meu în carieră oferindu-mi sprijin teoretic și practic, facilitând totodată participarea la conferințe internaționale.*

*Calde mulțumiri îi adresez doamnei cercetător **dr. Delia Cristina Papp**, din cadrul Institutului Geologic al României, pentru colaborarea în clarificarea unor aspecte ale studiului și pentru disponibilitatea de care a dat dovadă.*

*Doresc să adresez mulțumiri domnului conferențiar **dr. Forray Ferenc** pentru colaborarea în domeniul măsurătorilor izotopice.*

*Doresc să mulțumesc și echipei din Finlanda, colegilor **Soile Backnäs, Kaisa Turunen, Pekka Forsman** pentru frumoasa colaborare și devotamentul acestora.*

*Aprecieri calde îndrept către membrii comisiei de îndrumare: **Prof. dr. Cristina Roșu, Conf. Dr. Liviu Muntean și Lect. Dr. Dan Costin** pentru sugestiile utile care au conturat lucrarea.*

*În egală măsură aduc mulțumiri **dr. Giuseppe Etiope** pentru ajutorul acordat în vederea inițierii colaborării cu echipa de la Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, CNR, Roma. **Dr. Mauro Brilli, dr. Francesca Giustini, dr. Giancarlo Ciotoli** au arătat multă disponibilitate în realizarea unor analize izotopice comparative.*

*Sincere mulțumiri și recunoștință doresc să adresez doamnei **Conf. Dr. Nicoleta Brișan** pentru colaborare, sugestii și prezența caldă care au avut o importanță deosebită în toți acești ani.*

*Pe această cale aș dori să mulțumesc și domnului **Lector. Dr. George Roșian** pentru disponibilitatea și ajutorul acordat în vederea realizării hărților de interes pentru lucrarea de față.*

*Calde mulțumiri adresez și doamnei **Monica Baci**, pentru disponibilitatea și prezența caldă a dânzei pe perioada timpului petrecut la biblioteca de Geologie din cadrul Universității Babeș Bolyai și ajutorul oferit la documentarea lucrării de doctorat.*

Mulțumesc **dr. Mircea Moldovan** pentru colaborarea la studiile de radioactivitate. Nu în ultimul rând, adresez mulțumiri colegului **dr. Cristian Pop**, pentru munca depusă în teren în cei 2 ani de prelevări probe și colaborarea în proiectele ulterioare în care am fost colegi.

Doresc să le mulțumesc și colegilor mei: **Adriana Olenici, Ildiko Martonoș, Artur Ionescu, Gabriela Popiță, Carmen Roba, Gyöngyi Jakab, Laura Lazăr, Nicolae Frunzeti, Alin Nicula, Dan Petaca, George Ispas, Dragoș Luntraru, Sandra Nistea și Iulia Crăciun** pentru anii frumoși petrecuți împreună în birou și pentru colaborare.

Calde mulțumiri adresez doamnei **Greta Mândrean** pentru disponibilitatea întocmirii tuturor actelor necesare pe perioada deplasărilor în scopul cercetării și pentru prezența caldă.

Adresez mulțumiri și doamnei **Simona Lucăcel**, doamnei **Luana Turcu** și lui **Gabriel Dobrei** pentru colaborare și sprijin în vederea întocmirii actelor necesare.

Mulumiri calde adresez colegilor de la Departamentul de Radioactivitate, **Alexandra Cuceș, Anca Țenter, Kinga Szacsvai, Bety Burghel și Papp Botond**.

Le mulțumesc pentru colaborarea frumoasă și utilă domnului **Hadrian Bobar** și doamnei **Luminița Bobar**, domnului **Mircea Mărineanu** și echipei **Stației Meteorologice Roșia Montană**. Mulțumiri calde adresez și Centrului Meteorologic Regional Transilvania Nord, Cluj-Napoca.

Mulțumiri speciale adresez domnului **profesor universitar Tiberiu Rusu** de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, domnului **doctor Marian Munteanu**, director științific al Institutului Geologic al României și domnului **conferențiar doctor Călin Tămaș** de la Universitatea Babeș Bolyai din Cluj-Napoca, care mi-au făcut onoarea de a fi referenții tezei de doctorat.

Mulțumiri, dragoste și multă recunoștință adresez **familiei mele, părinților mei și fratelui meu** pentru sprijinul acordat necondiționat, atât moral, cât și financiar în vederea finalizării cu succes a lucrării de doctorat. Familia mea mereu a subliniat importanța educației, spiritualității, principiilor morale și a eticii. Dumnezeu să îi binecuvânteze!

Totodată, vreau să îi mulțumesc **soțului meu, Daniel** pentru sprijinul permanent și înțelegerea de care a dat dovadă în vederea finalizării cu succes a tezei. Dumnezeu să îl binecuvânteze!

Pentru realizarea cu succes a cercetării am beneficiat de sprijin financiar din partea CCCDI–UEFISCDI, proiect 3-005 **Tools for sustainable gold mining in EU (SUSMIN)**.

# LISTA CU LUCRĂRI ORIGINALE PUBLICATE

## ARTICOLE COTATE ISI

1. Isotopic composition of precipitations in Western Transylvania (Romania) reflected by two new Local Meteoric Water Lines. **Alexandra Iulia Cozma**, Calin Baci, Delia Papp, Gheorghe Rosian, Ioan Cristian Pop. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. July 2017, Vol.12, No. 2. p. 357 – 364.
2. Tanned Leather waste: a hazardous waste or not? C. Rosu, G.E.Popita, D. Manciu, A. Popovici, O. Corbu, **A. Cozma**. Journal of Environmental Protection and Ecology (JEPE) 16, No. 3, p. 899 – 907 (2015).
3. Origin and geochemistry of mine water and its impact on the groundwater and surface water in post-mining environments: Zlatna gold mining area (Romania). Delia Cristina Papp, Ioan Cociuba, Călin Baci, **Alexandra Cozma**. Aquatic Geochemistry (AQUA-D-17-00018R1).

## ARTICOLE INDEXATE ISI

4. Using natural tracers to track the groundwater flow in a mining area. **Alexandra Iulia Cozma**, Calin Baci, Mircea Moldovan, Ioan-Cristian Pop. Procedia Environmental Science, 32 (2016) 211 – 220. Elsevier, ScienceDirect.doi:10.1016 /j.proenv.2016.03.026.
5. Composition and origin of mine water at Zlatna gold mining area (Apuseni Mountains, Romania). Delia Cristina Papp, Ioan Cociuba, Călin Baci, **Alexandra Cozma**. Procedia Earth and Planetary Science, 17 (2017) 37 – 40. Elsevier, ScienceDirect. doi:10.1016/j.proeps.2016.12.018.

## CONTRIBUȚII COMUNICATE LA CONFERINȚE INTERNAȚIONALE

6. Radon and radium monitoring in several groundwaters from Rosia Montana area, Romania. **Alexandra Iulia Cozma**, Mircea Moldovan, Calin Baci, Bety Burghel. Rn SEERAS, Second East European Radon Symposium, Nis, Serbia, 27 – 30 mai 2014, Proceedings , p. 9 – 12.
7. Goldschmidt Conference Abstracts (2016) 2430. Isotopes as tracer for groundwater – surface water – mine water interactions in post-mining environments: the case study of Zlatna mining area (Romania), in: Goldschmidt Abstracts, 2016 2430. Delia Cristina Papp, Ioan Cociuba, Călin Baci, **Alexandra Cozma**.
8. Environment&Progress, National Symposium with International Participation, 25 octombrie 2013: **Alexandra Iulia Cozma**, G.Popita, C.Roba, C.Pop, C. Baci. The pattern of water pollution in Roșia Montană mining area. Preliminary results, Cluj-Napoca, 25 octombrie 2013 – **prezentare**.
9. Rn SEERAS, Second East European Radon Symposium: **Alexandra Iulia Cozma**, M. Moldovan, C. Baci, B. Burghel. Radon and radium monitoring in several groundwaters from Rosia Montana area, Romania. Rn SEERAS, Second East European Radon Symposium, Nis, Serbia, 27 – 30 mai 2014 – **poster**.
10. The Central and Eastern European Conference on Health and the Environment, The Environment – A Platform for Health: **Alexandra Iulia Cozma**, C. Baci, G. Popita, D. Costin. Tracking the heavy metals contamination of watercourses in Rosia Montana mining area, Romania, Cluj-Napoca, 25 – 30 mai 2014 – **poster**.
11. ELSSEDIMA, International Conference, 2014: **Alexandra Iulia Cozma**, Calin Baci, Gheorghe Rosian, Gabriela Popita, Ioan Cristian Pop. Monitoring of heavy metals in water bodies, from Rosia Montana mining area (Romania), Cluj-Napoca, 18 – 19 septembrie 2014 – **poster**.
12. European Geoscience Union General Assembly, International Conference, 12 – 17 aprilie 2015, Vienna. **Alexandra Iulia Cozma**, Calin Baci, Adriana Olenici, Dorian Brahaita, Cristian Pop, Laura Lazar, Carmen Roba, Gabriela Popita. Characterizing the hydrological system in Rosia Montana mining area for AMD mitigation – **prezentare**.

13. European Geoscience Union General Assembly, International Conference, 12 – 17 aprilie 2015, Vienna. Olenici A., Baciuc C., Momeu L., **Cozma A.**, Brahaita D., Pop C., Lazar L., Popita G., Teodosiu G. Establishing the Ecological Status of MINING-Impacted Fresh waters from Abrud River Catchment Area Using Benthic Diatom Communities (Rosia Montana, Romania) – **prezentare.**
14. Environment&Progress, National Symposium with International Participation, 30 octombrie 2015: **Alexandra Iulia Cozma**, Calin Baciuc, Lazar Laura, Gabriela Popita, Cristian Pop. Monthly variations of heavy metal concentrations in the hydrological system from Rosia Montana mining area, Romania – **prezentare.**
15. ECOSMART International Conference, 12 – 15 Nov 2015, București: **Alexandra Iulia Cozma**, Baciuc C., Moldovan M., Pop C. Using natural tracers to track the ground water flow path and the residence time in a mining area – **prezentare.**
16. ELSESEDIMA International Conference, 26 – 28 may 2016, Cluj-Napoca: Alexandra Iulia Cozma, Baciuc C., Pop C., Lazar L., Popita G. The impact of the past mining activity on the water resources in Rosia Montana mining area – **poster.**
17. Central and Eastern European Conference on Health and Environment 10 – 14 aprilie 2016, Calin Baciuc, **Alexandra Iulia Cozma**, Dan Costin, Laura Lazar, Ioana Pistea, Carmen Roba, Dorian Brahaita. Manganese mobilisation induced by acid mine drainage-processes and health effects – **poster.**
18. 15<sup>th</sup> International Symposium on Water-rock interaction, 16 – 21 October 2016, Evora, Portugal. Papp D.C., Cociuba I., Baciuc C., **Cozma A.** Composition and origin of mine water at Zlatna gold mining area (Apuseni Mountains, Romania).
19. Goldschmidt Conference, 26 June – 1 July 2016, Yokohama. Papp D.C., Cociuba I., Baciuc C., **Cozma A.** Isotopes as Tracer for Groundwater-Surface Water-Mine Water Interactions in Post-Mining Environments: The Case of Study of Zlatna Mining Area (Romania) – **poster.**
20. Simpozion Geo 2015, Electrical Signatures of Groundwater, 20 Nov, Bucuresti. **A. I. Cozma**, N.B., Brisan, A. Ionescu, C. Baciuc, M. Moldovan. Considerations on the origin of mineral waters in Ciomadul area (Eastern Carpathians) based on chemical and chemometric data – **prezentare.**

21. Simpozion Geo 2015, Electrical Signatures of Groundwater, 20 Nov, Bucuresti. A. Ionescu, B.M. Kis, C. Baci, **A.I. Cozma**, A. Sciarra, M. Moldovan, G. Etiope. First Assessment of the flux and origin of methane at the Ciomadu post-volcanic area (Romania) – **prezentare**.
22. Simpozion Geo 2015, Electrical Signatures of Groundwater, 20 Nov, Bucuresti. M.Moldovan, N.B. Brisan, **A. Cozma**, A. Ionescu, T. Sferle. Radon measurements in soil and mineral waters from Balvanyos, Tusnad and Homord areas – **poster**.
23. XIV<sup>th</sup> Edition of Isotope Workshop ESIR 2017, Băile Govora, România 25 – 29 June 2017. Calin Baci, Delia Papp, **Alexandra Cozma**. Application of Stable Isotopes for Investigating the Dynamics of Waters in Rosia Montana and Zlatna Mining Areas – **prezentare**.
24. 12<sup>th</sup> International Conference Environmental Legislation, Safety Engineering and Disaster Management ELSEDIM 2018, 17 – 19 May 2018, Cluj-Napoca, Romania. **Alexandra Iulia Cozma**, Calin Baci, Nicoleta Brisan. Hydrogeochemical features of the mineral waters from Ciomadul volcanic area, Eastern Carpathians, Romania) – **prezentare**.

## **CO-AUTOR ÎN RAPOARTE TEHNICE ÎN CADRUL PROIECTELOR INTERNAȚIONALE FP 7**

1. Environmental risk assessment practices and applications for gold mines in EU - Assessing environmental risks at three mine sites: Kittilä mine in Finland and Roșia Montană and Zlatna mines in Romania. C. Baci, L. Lazăr, **A. Cozma**, A. Olenici, I.C. Pop, C. Roba, D. Costin (Babes Bolyai University): Roșia Montană case, D. C. Papp, I. Cociuba (Geological Institute of Romania): Zlatna case. ERA-MIN –SUSMIN Project Deliverable D5.4.
2. Prediction of long-term impacts using environmental monitoring and modelling tools at two mine sites: Kittilä mine in Finland and Roșia Montana in Romania. T. Lahtinen, K. Turunen, E. Hämäläinen, M. Hämäläinen, S. Nieminen, T. Forsman, (Geological Survey of Finland): Kittila case and Rosia Montana case, C. Baci, **A. Cozma**, I.C. Pop, C.

Roba, D. Costin (Babes Bolyai University): Rosia Montana case. ERA-MIN –SUSMIN Project Deliverable D5.3.

3. Use of geochemical characteristics and isotopes for assessing migration of harmful substances at three mine sites: Kittilä mine in Finland and Roșia Montană and Zlatna mines in Romania. D.C. Papp, I. Cociuba (Geological Institute of Romania): Zlatna case, C. Larkins, I. Mänttari, K. Turunen, Y. Lahaye, N. Hendriksson, P. Forsman, S. Nieminen (Geological Survey of Finland): Kittila case and Rosia Montana case, C. Baci, **A. Cozma**, L. Lazar, I.C.Pop, C. Roba (Babes Bolyai University): Rosia Montana case. ERA-MIN –SUSMIN Project Deliverable D5.1.

## Participări la școli de vară, seminarii și cursuri formative

1. Participant la National Workshop on Implementation of Basic Safety Standards on Public Exposure due to Radon and Building Materials. Organized by National Commission for Nuclear Activities Control (CNCAN) and Babes Bolyai University Cluj-Napoca (UBB) in co-operation with International Atomic Energy Agency (IAEA) Within the framework of the TC National Project ROM/0/008 *"Further Development of Romanian Nuclear Regulatory Authority Capabilities"* – perioada 23 – 27.01.2017.
2. Organizator la concursul național *"Să păstrăm un mediu sănătos"*, ediția a IV-a, concurs aprobat de Ministerul Educației Naționale cu nr. 46761/21.11.2016.
3. Organizator la concursul național *"Să păstrăm un mediu sănătos"*, ediția a VI-a, concurs aprobat de Ministerul Educației Naționale cu nr. 377683/23.10.2018.
4. Responsabil de practica profesională ce vizează studenții facultății *"Utilizarea echipamentelor in teren pentru analiza si interpretarea factorilor de mediu – Field Camp Balvanyos, jud. Covasna, România"* – perioada 04 – 08.07.2016.
5. Participant la Scoala de vară *"The impact of mining activities on the environment ERASMUS IP"* – Certificat de participare. Spisska Nova Ves, Slovacia, perioada 1– 12 iulie 2013.
6. Participant la Scoala de vară *"Environmental Technologies in mining and waste management ERASMUS IP"* – Certificat de participare. Kosice, Slovacia, perioada 30 iunie – 11 iulie 2014.
7. Obținerea celor două nivele ale Modulului Pedagogic realizat în cadrul Universității Babes – Bolyai, Nivel I, respectiv Nivelul II în perioada studiilor doctorale.
8. Participant la workshop-ul parțial finanțat de către Parlamentul European prin programul *European Youth Event*, din perioada 20 – 21 mai, Strasbourg, Franța.



## **MOBILITATE**

Stagiu profesional la Universitatea Sapienza și Istituto Di Geologia Ambientale e Geoingegneria, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) – Roma, Italia în vederea îmbunătățirii cunoștințelor cu privire la izotopii stabili de oxigen și hidrogen ai apei, dar și a unei colaborări propice în acest sens. Stagiul a fost scindat în două perioade, 22 – 29 noiembrie 2014, respectiv 19 – 26 aprilie 2015, având oportunitatea de a utiliza laboratoarele de măsurători izotopice ale probelor de apă.

Dr. Mauro Brilli și dr. Francesca Giustini au fost responsabili de laborator, de îndrumarea activității și finalizarea măsurărilor izotopice realizate în cadrul Institutului (IGAG, CNR, Roma), dar și în cadrul Universității Sapienza, Roma, Italia.

## **EXPERIENȚĂ DE CERCETARE**

Asistent de cercetare în 3 proiecte naționale și internaționale.

- 1.** Proiectul TOOLS FOR SUSTAINABLE GOLD MINING IN EU (SUSMIN) 3-005/24.03.2014.
- 2.** Proiectul nr. 2090 G TA 101 “ Reduced Carbon in Earth: Origin, Form, Quantities and Movements.
- 3.** Proiectul PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0721- INstrumente de modelare a proceselor de inTERfață- Apă–Sol–Plante–Aer pentru administrarea inteligentă și durabilă a bazinelor hidrografice și a ecosistemelor dependente de apa subterană.

## Cuprins

INTRODUCERE .....	28
I. Cadrul fizico-geografic al zonei Roșia Montană .....	31
1. Caracteristici hidrologice ale zonei Roșia Montană .....	32
1.1. Precipitații .....	32
1.2. Rețeaua hidrografică de suprafață .....	33
1.3. Ape subterane (potențial necontaminate) / Ape de mină (potențial contaminate) de activitatea minieră .....	35
2. Cadrul geologic general și resurse minerale .....	35
3. Noțiuni teoretice și delimitări conceptuale .....	38
3.1. Istoricul activităților miniere la Roșia Montană .....	38
3.2. Obiective rezultate în urma exploatarea miniere cu impact asupra mediului .....	47
3.2.1. Lucrări miniere subterane .....	48
3.2.2. Iazuri de decantare .....	48
3.2.3. Evoluția structurii iazurilor de decantare Gura Roșiei, respectiv Săliște ..	51
3.2.4. Considerații asupra haldelor de steril în raport cu arealul limitrof .....	54
3.2.5. Formarea apelor de mină și interacțiunea acestora cu corpurilor de apă ...	57
4. Date existente și starea actuală a mediului din bazinul minier Roșia Montană .....	60
4.1. Calitatea aerului .....	60
4.2. Calitatea solului și a sedimentelor .....	60
4.3. Calitatea apelor subterane și a celor de suprafață .....	61
II. CONTRIBUȚII PERSONALE .....	63
1. Metodologia de cercetare .....	63
1.1. Prelevarea probelor .....	63
1.2. Parametrii fizico-chimici .....	72
1.3. Colectarea probelor .....	72
1.3.1. Metale grele .....	72
1.3.2. Ionii principali .....	73
1.3.3. Compoziția izotopică a apei ( $\delta O^{18}$ și $\delta H^2$ ) .....	74
1.3.4. Prelevarea probelor în vederea măsurătorilor de $Ra^{226}$ și $Rn^{222}$ .....	75
2. Analize de laborator .....	76
2.1. Metale grele .....	76
2.2. Ionii principali .....	77
2.3. Izotopii stabili $^{18}O$ și $^2H$ .....	78
2.4. Măsurarea radionuclizilor $^{222}Rn$ și $^{226}Ra$ în probe de apă .....	80
2.5. Procesarea rezultatelor .....	81
3. Rezultate și discuții .....	82
3.1. Caracterizarea geochemică a corpurilor de apă, geneza, dinamica și alimentarea acviferelor .....	82

3.2. Variații .....	98
3.2.1. Variația sezonieră a pH-ului .....	98
3.2.2. Variația sezonieră a temperaturii .....	102
3.2.3. Variația sezonieră a turbidității .....	105
3.2.4. Variația sezonieră a potențialului de oxido-reducere .....	107
3.2.5. Compoziția izotopică a precipitațiilor .....	111
3.2.6. Variația sezonieră a izotopilor stabili de $\delta^2\text{H}$ și $\delta^{18}\text{O}$ ai apei .....	115
3.2.7. Variația sezonieră a concentrațiilor de ioni principali și de metale grele .....	118
3.3. Variația sezonieră a chimismului amonte și aval de zona minieră .....	130
4. Originea apelor subterane și a apelor de mină .....	139
4.1. Corelații între $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta\text{D}$ , pH și EC .....	139
4.2. Corelații între Ni, Pb, Cd, Cr, Cu și Zn .....	144
4.3. Compoziția izotopică a apelor cuprinse în studiul geochimic de monitorizare .....	146
4.3.1. Ape de suprafață curgătoare .....	146
4.3.2. Ape de mină .....	147
4.3.3. Izvoare .....	147
4.3.4. Fântâni .....	148
4.3.5. Lacuri .....	149
5. Potențialul radioactiv al perimetrului minier Roșia Montană .....	152
6. Aplicabilitatea trasorilor naturali și calitatea corpurilor de apă .....	154
6.1. Calitatea apelor de suprafață .....	157
6.2. Calitatea apelor din izvoare și fântâni .....	157
6.3. Calitatea apelor de mină .....	157
7. Dinamica apelor subterane și timpul de rezidență .....	169
8. Modelul conceptual al circulației corpurilor de apă .....	182
CONCLUZII .....	186
BIBLIOGRAFIE .....	193

**Cuvinte cheie:** activități miniere, ape acide de mină, ape subterane, Roșia Montană, izotopi stabili, geochimie, timp de rezidență.

## I. INTRODUCERE

*„El varsă ploaia pe pământ și trimite apă pe câmpii.”*

***Iov 5:10***

Cele mai vechi scrieri, inclusiv Biblia, includ descrieri ale relației dintre om și mediu. Pe măsură ce cunoașterea filosofică și științifică a evoluat dependența societății umane de starea mediului a fost tot mai clar reliefată. În consecință, ne revine obligația morală de a păstra o stare corespunzătoare a mediului, atât pentru ecosisteme, cât și pentru societatea umană. Conceptul de Dezvoltare Durabilă, răspândit începând cu anii 1990 sintetizează această necesitate într-o propoziție simplă, care a cunoscut imediat o difuzare globală: *„urmărește satisfacerea nevoilor prezentului, fără a compromite posibilitatea generațiilor viitoare de a-și satisface propriile nevoi”* (WCED, 1994).

Lucrarea intitulată ***Caracteristici geochimice ale sistemului hidric din zona minieră Roșia Montană*** sintetizează date provenite din studii anterioare privind starea mediului în zona Roșia Montană, la care se adaugă o contribuție personală consistentă privind în principal starea resursei acvatice în zona de studiu. Activitățile miniere perturbă funcționalitatea normală a unui areal prin multitudinea de schimbări pe care le generează la nivel de sol, apă, vegetație și aer. Apele de mină netratate eliberate în emisarii naturali, constituie o problemă pentru fiecare zonă minieră și totodată o provocare în a găsi soluții de neutralizare a acestora.

În arealul minier Roșia Montană există 140 km galerii, un sistem în care procesele de amestec și transfer ale apelor sunt deosebit de complexe. Mobilizarea metalelor se produce îndeosebi prin acțiunea apelor acide, care se formează în urma oxidării sulfurilor din zăcământ, la contactul cu aerul atmosferic și apele meteorice. În urma oxidării, sulful generează acid sulfuric, ceea ce reduce drastic pH-ul apelor de mină, care atinge frecvent valori de 2 sau 3. Apele acide prezintă agresivitate crescută față de rocă, ceea ce duce la alterarea acesteia, cu mobilizarea metalelor. Propagarea poluării în lungul cursurilor de apă face ca impactul de mediu datorat exploatărilor miniere să se extindă pe zeci de km în aval. Drept consecință, una dintre condițiile necesare pentru funcționarea exploatărilor miniere este gestiunea corespunzătoare a apelor acide, cu minimizarea generării lor și tratarea adecvată înainte de deversarea lor în emisar.

Teza de față își propune mai buna înțelegere a generării apelor de mină și a dinamicii lor în subteran, în vederea elaborării unor strategii de management cât mai eficiente. În acest sens se vor utiliza tehnici hidrogeochimice, bazate pe evaluarea chimismului apelor și analizelor izotopice.

## 1. Obiectivele prezentei teze de doctorat

În vederea atingerii scopului amintit anterior, s-au definit următoarele obiective:

- *înțelegerea modificărilor pe care existența lucrărilor miniere le introduce în ciclul natural al apelor de suprafață și subterane la scară locală. Este vorba de expunerea unor suprafețe extinse de rocă la acțiunea factorilor atmosferici, crearea unor căi de infiltrație și drenaj a apelor și modificări de chimism ale apei care se manifestă datorită contactului cu roca;*
- *înțelegerea dinamicii apei în zone miniere;*
- *creerea unui model conceptual de circulație al apei la nivel local;*
- *compararea analizelor izotopice pentru ape de suprafață curgătoare și subterane cu cele de precipitații pe baza liniei meteorice locale;*
- *stabilirea unei baze de cunoștințe în vederea fundamentării măsurilor pentru limitarea producerii apelor acide și limitării acestora.*

Studiul chimic al apei s-a bazat pe analiza metalelor grele (Ni, Cu, Cd, Pb, Zn, Cr) și a ionilor principali. Abordarea s-a bazat pe monitorizarea riguroasă a variației temporale compoziției chimice a apelor. A fost stabilită o rețea de monitorizare cuprinzând ape curgătoare, lacuri, fântâni, izvoare, ape de mină, atât din zona afectată de exploatarea minieră, cât și din afara ei. Probele au fost colectate cu periodicitate lunară timp de 24 de luni și analizate din punct de vedere chimic și izotopic. Potențialul radioactiv al zonei a fost estimat prin analiza radionuclizilor Rn <sup>222</sup> și Ra <sup>226</sup>.

Studiul formării apelor de mină pe baza măsurătorilor izotopice este unul de actualitate, cu precădere folosind izotopi stabili ai oxigenului și hidrogenului, sulfului, stronțului. Dinamica apei în zone poluate este esențială, iar izotopii stabili ai oxigenului și hidrogenului din apă vin în ajutorul elucidării acesteia (Leybourne et al. 2006; Leybourne et al. 2007). Izotopii stabili din apă ai oxigenului și hidrogenului aduc contribuții științifice consistente cu privire la studiul distribuției apei în atmosferă și hidrosferă (Clark & Fritz, 1998).

Este necesară o abordare pluridisciplinară a resursei de apă, însumându-se cunoștințe privind geneza, hidrodinamica, hidrogeochimia și factorii poluanți din vecinătatea resursei de apă. În perimetre cu ape acide, unde au loc scurgeri, interacțiunea rocă-apă este controlată în principal de pH și potențialul de oxido-reducere.

Studiile izotopice pot oferi informații cu privire la: timpul de rezidență, interacțiunea rocă-apă, pH la interfața rocă-apă (Ghomshei & Allen, 1999; Seal II et al. 2008). Izotopii oxigenului și hidrogenului sunt trasori naturali ai dinamicii apei contribuind la îmbogățirea cunoașterii privind sistemele cuplate apă de suprafață-apă subterană. În ultimele decenii s-au elaborat numeroase studii privind geneza apelor de mină, circuitul acestora și amestecul lor cu apele de suprafață (Melchiorre et al. 2005; Hazen et al. 2001; Gammons et al. 2010; Gammons et

al. 2013; Sracek et al. 2004; Caruso et al. 2011; Hem, 1985; Hofmann et al. 2008), dar și utilizarea izotopilor stabili pentru a identifica alimentarea apelor subterane (Oiro et al. 2018). Interpretarea analizelor izotopice pentru apele de suprafață și subterane din zona minieră se bazează pe linia meteorică locală construită pentru Stația Meteo Roșia Montană.

Lucrarea de față este dezvoltată sub forma a două părți principale astfel încât:

**Partea I** redă cadrul fizico-geografic al zonei, caracteristici ale bazinului hidrografic, noțiunile generale sistematizate în urma studiului bibliografic în capitole și subcapitole cu privire la istoricul activităților miniere din bazinul minier Roșia Montană și zonele adiacente acesteia, impactul activităților miniere asupra ecosistemelor, studii asemănătoare realizate în context internațional, tipurile de activități miniere efectuate în perimetrul minier Roșia Montană, formarea apelor de mină și considerații asupra haldelor de steril și a iazurilor de decantare. De asemenea sunt discutate aspecte legate de starea actuală a mediului.

**Partea a II-a** a lucrării, care este cea mai extinsă descrie contribuțiile personale la cunoașterea zonei de studiu incluzând analizele geochimice și interpretarea acestora. S-a realizat un model conceptual de circulație al apei în zona minieră Roșia Montană considerând interacțiunea dintre apele de suprafață și cele subterane.

**Capitolul 1** descrie metodologia de cercetare abordată pentru fiecare parametru urmărit și modul de prelevare a probelor de apă. **Capitolul 2** descrie modul de realizare a analizelor de laborator pentru metale, ioni principali, izotopi, aparatura utilizată și protocoalele de lucru. S-a utilizat în principal spectrometrul de absorbție atomică Zeenit 700, Ion Cromatograful Dionex, analizorul izotopic Picarro etc. Totodată în acest capitol sunt descrise tehnicile de procesare a rezultatelor. În **capitolul 3** se regăsesc rezultatele măsurătorilor parametrilor investigați luate în considerare pentru acest studiu, și statistică descriptivă. În **capitolul 3** sunt incluse grafice care redau variații sezoniere ale unor parametri: pH, temperatura, turbiditate, izotopii stabili ai oxigenului și hidrogenului din apă. **Capitolul 4** descrie corelația între izotopii stabili ai oxigenului și hidrogenului, pH și TDS pentru a contribui la elucidarea proceselor de amestec și a dinamicii. Compoziția izotopică a corpurilor de apă este redată printr-o serie de grafice. Tot în acest capitol se face referire la compoziția izotopică a precipitațiilor, analizând probe prelevate de la Stația Meteo Roșia Montana și Cluj-Napoca conform procedurilor stabilite de IAEA Viena. Acest capitol este mai puțin detaliat în teză deoarece datele obținute s-au valorificat într-un articol cotate ISI. **Capitolul 5** prezintă considerații privind potențialul radioactiv al zonei, iar datele sunt valorificate într-un articol publicat într-o revistă BDI. **Capitolul 6** face referire la aplicabilitatea trasorilor naturali pentru această zonă și calitatea corpurilor de apă, iar **capitolul 7** urmărește să elucideze dinamica apelor subterane în contextul analizelor și interpretărilor efectuate, dar și timpul de rezidență al apelor subterane. În **capitolul 8** se regăsește un model conceptual construit pe baza datelor obținute și a informațiilor preexistente pentru zona văii Roșia, Corna, respectiv Săliște. **Capitolul 9** prezintă succint **concluziile** studiului întreprins.

## 2. Prezentare generală

### 2.1. Relief și climat

Relieful este influențat puternic de rețeaua hidrografică, cu precădere de valea Roșia și bineînțeles și de celelalte văi: Corna, Săliște, Abruzel etc., care au modelat masivele existente în zonă. Altitudinea variază între 550 metri (valea Arieșului) și 1256 metri (Curmătura).

Climatul din zona Roșia Montană este unul temperat continental, cu mici excepții în zonele cu altitudine mai mare, unde domină microclimatul montan cu ierni reci și precipitații solide semnificative, cu un interval între 4 și 6 luni (RMGC, 2006). Sezoanele de primăvară și toamnă sunt relativ reci și cu un aport de umiditate ridicat, ca urmare a ploilor abundente. Anotimpul cald este unul scurt, cu temperaturi modeste. Temperatura medie anuală este de 7.38°C, cu o maximă medie lunară de 18.6°C înregistrată în sezonul cald, luna august, și cu o minimă medie lunară de -2.4°C pe perioada iernii, înregistrată în luna ianuarie (Stația Meteo Roșia Montană).

Vegetația perimetrului Roșia Montană este caracteristică zonei de munte, cu păduri de foioase și conifere, iar pe alocuri cu pășuni alpine. O bună parte a pădurilor sunt defrișate, ca o consecință a exploatărilor miniere.

### 2.2. Cadrul geologic

Din punct de vedere geologic și structural, edificiul Munților Apuseni, deși relativ unitar ca morfologie, este divizat în două unități majore, cu evoluție distinctă și caracteristici diferite, Munții Apuseni de Nord, respectiv Munții Apuseni de Sud.

Apusenii sudici, care includ și zona prezentului studiu, reprezintă rezultatul funcționării suturii tethysiene majore, care a început, probabil, înaintea Jurasicului și a durat până spre sfârșitul Cretacicului.

Este binecunoscut Patrulaterul aurifer, care delimitează un district metalogenetic deosebit de fertil, cunoscut de peste două milenii, îndeosebi pentru resursele de metale prețioase. Zăcămintele prezente în zonă sunt de tipul auro-argentifer (ex. Roșia Montană), auro-cuprifer (ex. Rovina) și cuprifere, de tip *porphyry copper* (ex. Roșia Poieni), la care se adaugă depozite cu metale neferoase comune (plumb, zinc). Din punct de vedere al dispunerii în spațiu, se evidențiază trei centuri de magmatite neogene, purtătoare de mineralizații, Roșia Montană aparținând celei mai nordice (Mutihac, 1990).

Mineralizația auro-argentiferă se prezintă sub formă de filoane, corpuri de breccie, stockwerk-uri (**Figura 1**). Roșia Montană reprezintă o structură de tip maar-diatremă, cantonată într-o masă de sedimente cretacee, între care predomină șisturile negre. Ca tip de roci, domină brecciile de tip freatomagmatic, roci vulcanoclastice, între care se întrepătrund corpuri subvulcanice de dacite porfirice, dyke-uri dacitice și breccii freatomagmatice târzii. Mineralizația de interes din zona Roșia Montană este interpretată ca un sistem epitermal de adâncime moderată spre mică (Tămaș, 2007).

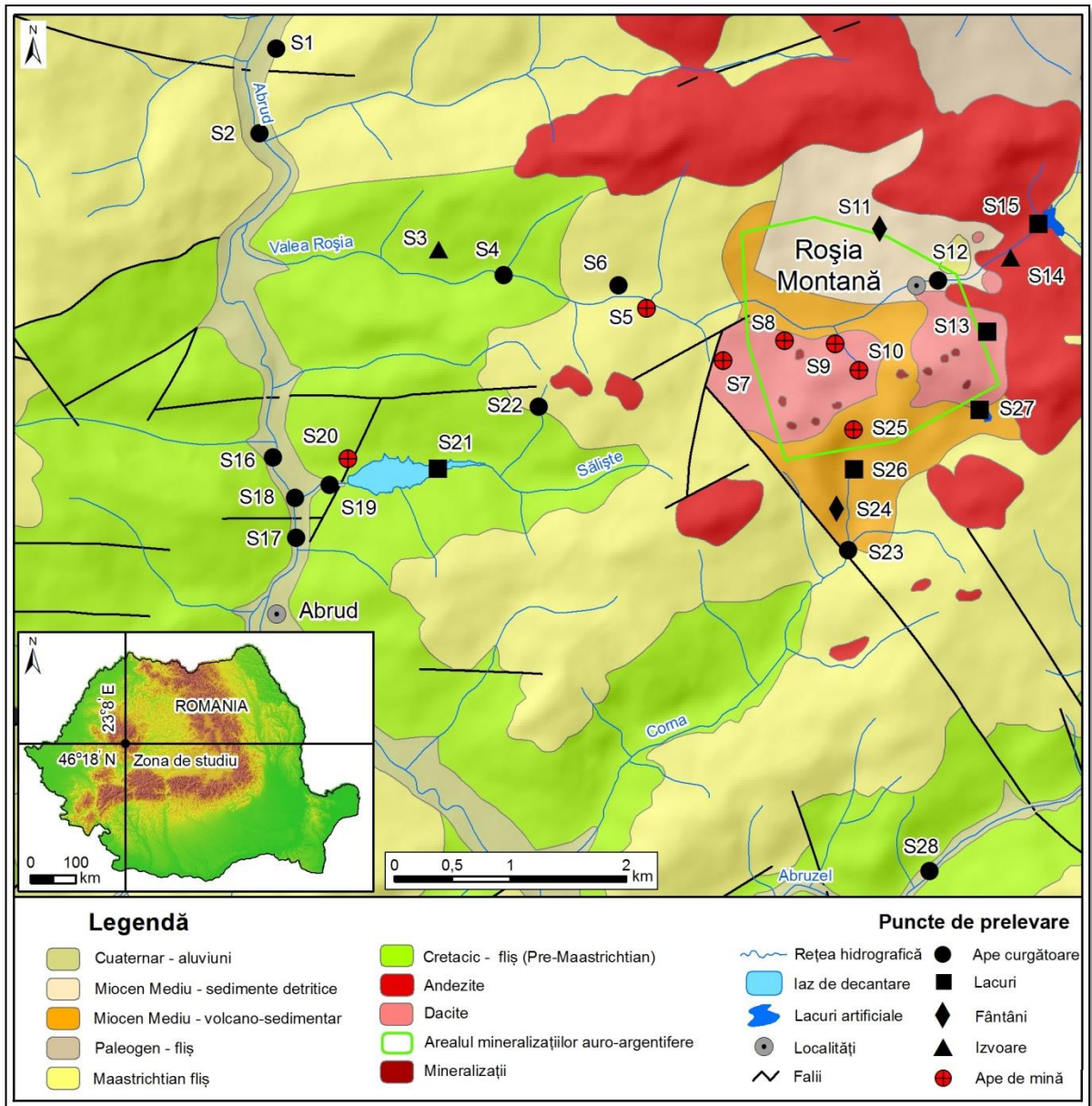


Figura 1. Geologia zonei Roșia Montană (după Harta geologică 1:50.000, foaia Abrud, Bordea et al. 1979).

### 2.3. Rețea hidrografică

Cea mai importantă resursă de apă din munții Apuseni este râul Arieș. Acesta curge la aproximativ 10 km nord de Roșia Montană și colectează majoritatea apelor mai mici din zonă. Printre acestea se numără și Abrud, un corp hidrografic important, care la rândul său preia toate cursurile de apă din perimetrul minier Roșia Montană (Figura 2).



În localitatea Roșia Montană, pârâul Roșia sau Foieș cum este denumit de către localnici, este principalul curs de apă ce curge de la est la vest, preluând apele de pe versanți.

Debitul acestuia este dependent de cantitatea de precipitații, de înmagazinarea apei din lacurile poziționate în amonte și de cantitățile de apă deversate de lucrările miniere, pârâul preluând apele acide care sunt generate de fostele exploatări (RMGC, 2006).

Pentru studiul de față au fost selectate puncte de probare ce se situează pe cursurile de apă Roșia, Corna, Săliște, Abruzel, respectiv Abrud. Un loc aparte între apele de suprafață îl ocupă lacurile artificiale din zonă, denumite „tăuri” de către localnici. Acestea au avut un rol important în istorie, deoarece alimentau șteampurile în procesul de măcinare a minereurilor. În total în prezent există 8 tăuri în zonă, cele mai mari ca suprafață și volum fiind Tău Mare, Tău Țarina, Tău Brazi, Tău Anghel și Tău Corna, iar cele mai mici sunt Tău Cartuș, Tău Găuri și Tău Țapului. În perioade istorice au fost săpate 110 lacuri artificiale, însă cele menționate mai sus au apă în mod curent.

Din totalul tăurilor, s-au ales patru în vederea monitorizării, pentru a stabili corelații cu văile pe care sunt situate, care vor fi descrise succint în capitolul aferent prelevării.



Figura 2. Confluența râului Arieș (dreapta) cu râul Abrud (stânga).

### 3. Minerit și obiective rezultate în urma exploatărilor miniere cu impact asupra mediului

#### 3.1. Lucrări miniere subterane

Primele încercări de exploatare în zona minieră Roșia Montană au fost realizate la suprafață, ulterior filioanele fiind urmărite în profunzime. În acest fel au fost realizate o rețea de lucrări în subteran, continuându-se sub această formă pentru aproximativ 2000 de ani.

Lucrările subterane se evidențiază sub formă de sisteme verticale și orizontale, extragerea materialului având loc prin intermediul galeriilor cu ajutorul vagonetilor de lemn. Rețeaua de lucrări subterane este alcătuită din 140 km de galerii miniere.

#### 3.2. Iazuri de decantare și evoluția acestora

În perimetrul minier Roșia Montană au funcționat două iazuri de decantare, Gura Roșiei, respectiv Săliște. Operațiunile de depunere a sterilului au fost sistate în anul 2006 în cazul ambelor iazuri menționate. Iazul Gura Roșiei este poziționat în lungul râului Abrud, sub forma unui depozit de coastă, având o suprafață de 230.000 m<sup>2</sup>. La momentul actual, depozitul este reabilitat, în urma operațiunilor de corectare geometrică a taluzurilor, acoperire cu geomembrană și sol, respectiv plantare de vegetație ierboasă. În consecință, sterilul depozitat pe iazul Gura Roșiei este izolat față de factorii externi de mediu și nu a fost inclus în prezentul studiu.

Iazul Săliște a generat un depozit de sterile (aproximativ 4.000.000 metri cubi) amplasat pe valea Săliște, ocupând o bună parte din bazinul acestei văi. Suprafața aproximativă a iazului este de 16,1 ha ([Raport la studiu de impact, 2014](#)). Spre deosebire de iazul Gura Roșiei, acesta este un iaz de vale, sprijinindu-se pe ambii versanți și blocând total cursul văii. Construcția lui urmărește principiile generale folosite pentru iazurile de decantare de vale. Apa pârâului Săliște este dirijată printr-o galerie care subtraversează depozitul de sterile, și se racordează la valea Săliște. Iazul Săliște a fost supus operațiunilor de reabilitare, după o procedură asemănătoare cu cea folosită la Gura Roșiei.

Toate probele de apă pentru studiul curent au fost colectate înainte de debutul operațiunilor de remediere. În etapa respectivă, plaja ocupa cea mai mare parte din suprafața iazului, o cantitate de apă fiind acumulată, probabil din precipitații, în extremitatea amonte. Acest bazin de extindere redusă conținea apă limpede și suporta o vegetație alcătuită din plante acvatice.

### 3.3. Halde de steril

În zona Roșia Montană există un mare număr de halde (**Tabelul 1**), în general de dimensiuni reduse, rezultate în diferitele etape de exploatare a zăcămintului. Cele mai multe sunt halde de coastă, depuse la ieșirea galeriilor miniere sau în vecinătatea carierelor. În urma acoperirii cu vegetație, unele dintre haldele vechi sunt greu de recunoscut în teren. La Roșia Montană haldele de steril sunt depozitate în imediata vecinătate a carierelor Cetate și Cîrnic, respectiv în perimetrele miniere Orlea și Jig. În anul 2012, Direcția Generală de Resurse Minerale a realizat un inventar al tuturor haldelor de steril inactive din România, rezultând un total de 627 depozite. În zona Roșia Montană au fost inventariate 33 de depozite miniere, ale căror caracteristici principale sunt prezentate în **Tabelul 1**.

Aceste forme de depozitare a sterilului (halde de roci sterile și iazuri de decantare), sunt susceptibile de a genera un impact semnificativ asupra mediului, în primul rând asupra apelor de suprafață și subterane, dar și asupra solului, utilizării terenului și aerului. Pentru a evidenția rolul depozitelor de steril în determinarea stării resurselor acvatice din zona Roșia Montană, în rețeaua de monitorizare au fost incluse mai multe puncte de probare ce suferă influența acestor depozite. O serie de imagini foto cu materialul steril haldat, realizate în bazinul minier, se regăsesc în **Figura 3**.

Tabel 1. Inventarul haldelor de steril de la Roșia Montană, conform Direcției Generale de Resurse Minerale, România ([www.minind.ro](http://www.minind.ro)).

Nr.	Denumire haldă	H.G. închidere	Suprafață ha	Volum mii mc	Sterilul se află sub incidența vântului Da/Nu
1	VERKEȘ	644/2007	1,26	6	DA
2	IRINA RACOȘI	644/2007	0,30	26,85	DA
3	IULIANA	644/2007	1,49	9,50	DA
4	AFINIȘ	644/2007	1,96	9,40	DA
5	AURORA	644/2007	0,20	8,00	DA
6	GĂURI	644/2007	0,20	13,60	DA
7	VALEA VERDE	644/2007	5,75	30,60	DA
8	GALERIA 23 AUGUST	644/2007	0,12		DA
9	CÎRNICEL	644/2007	0,10	9,58	DA
10	GALERIA NAPOLEON +984 m	644/2007	0,20	5,54	DA
11	GALERIA NAPOLEON +954 m	644/2007	0,20	8,62	DA
12	MĂNEȘTI	644/2007	0,81	4,50	DA
13	GAL. +887m	644/2007	0,20	9,65	DA
14	GAL. +938 m	644/2007	0,20	20,15	DA
15	PÂRÂUL CORBULUI	644/2007	0,10	6,36	DA
16	PIATRA CORBULUI	644/2007	0,10	4,23	DA
17	HOP	644/2007	4,58	23,70	DA
18	ZONA GĂURI	644/2007	1,83	12,20	DA
19	RÂPA ALBĂ	644/2007	1,41	8,60	DA
20	RAKOȘI	644/2007	0,43	3,20	DA
21	GAL DE COASTĂ	644/2007	0,61	4,18	DA
22	GĂURI 1	644/2007	0,80		DA
23	GĂURI 2	644/2007	0,21	2,10	DA
24	PIATRA CORBULUI 1A	644/2007	0,31	2,72	DA
25	PIATRA CORBULUI 1B	644/2007	0,75	7,00	DA
26	PIATRA CORBULUI 2	644/2007	0,62	5,40	DA
27	ROSTOGOL COLECTOR NAPOLEON	644/2007	0,56	4,50	DA
28	IPEG (+895 și +907)	644/2007	1,16	9,28	DA
29	VOLBURA CANTALIȘTE ȘI CORNURI	644/2007	3,98		DA
30	VOLBURA CANTALIȘTE EST	644/2007	1,85	11,00	DA
31	CÎRNICEL ORIZ+941	644/2007	0,52	3,40	DA
32	CÎRNICEL ORIZ +907	644/2007	0,59	4,00	DA
33	CÎRNICEL ORIZ+885	644/2007	0,36	2,60	DA

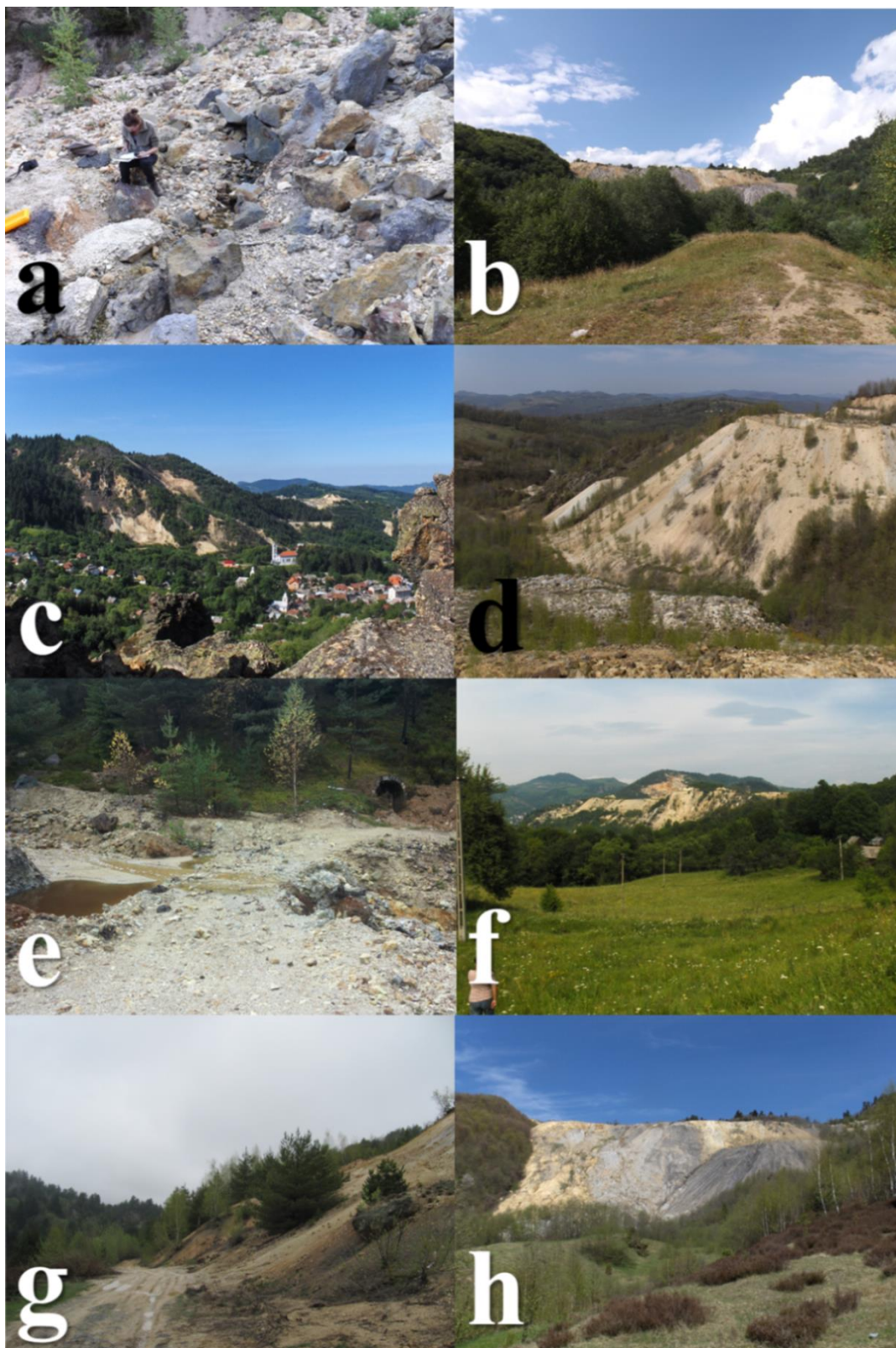


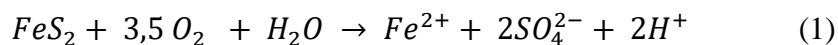
Figura 3. Depozite de steril din proximitatea perimetrului minier Roșia Montană. (a - Cetate); (b, h - valea Verde); (c, f - imagine de ansamblu); (d - Cetate Vest); (e - Cetate); (g - Cârnic).

### 3.2.5. Formarea apelor de mină și interacțiunea acestora cu corpurile de apă

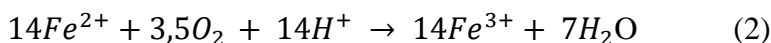
În urma operațiunilor de exploatare a minereurilor, cu precădere a celor metalifere, se formează apele acide. Sunt activate în mod spontan o serie de reacții chimice, datorită materialului expus unui mediu oxidant (Deutsch, 1997). Acestea se formează în interiorul lucrărilor subterane și al carierelor și procesul se dezvoltă atunci când, minereul este expus aerului, în timpul operațiunilor miniere și a drenării zăcămintului. În prezența apei și a oxigenului, bacteriile favorizează un mediu acid (Baciu & Costin, 2008), în care sulfurile se descompun și eliberează acid sulfuric și metale solubile.

Formarea apelor acide este redată în următoarele ecuații:

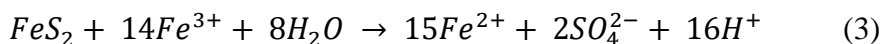
Reacția clasică care descrie oxidarea piritei în prezența oxigenului și a apei a fost redată de mai mulți cercetători (Singer & Stumm, 1970; Nordstrom, 1979):



Această formă bivalentă de fier de regulă oxidează după reacția:



În procesul de oxidare a piritei și de generare a apelor acide de mină, un rol important îl joacă  $Fe^{3+}$ , care este capabil să oxideze pirita în mediul anoxic în condiții de soluție apoasă, cu o rată mai mare decât cea a oxigenului molecular, potrivit reacției (Garrels & Thompson, 1960):



În etapa inițială, pirita reacționează cu oxigenul și apa pentru a produce fier feros, sulfat și aciditate. A doua etapă implică transformarea fierului feros în fier feric. A treia ecuație include hidroliza fierului feric cu apa pentru formarea hidroxidului feric solid (ferhidrit) și eliberarea de aciditate suplimentară. În această etapă un rol important îl joacă pH-ul. Dacă aciditatea este foarte ridicată, spre exemplu pH mai mic de 3.5, mineralele solide nu se formează și fierul feric rămâne în soluție. La un pH mai mare se formează un precipitat de culoare galben brună numit „yellowboy”. Ultima etapă implică oxidarea piritei suplimentare de fier feric, generat de reacțiile de oxidare ale etapelor inițiale 1 și 2. Această difuzie ciclică a fierului este una foarte rapidă și se continuă până la epuizarea furnizării fierului feric sau a piritei.

Maximul acidității unui areal minier, în cele mai multe cazuri intervine la 5 – 10 ani după încetarea operațiunilor miniere, mai apoi urmând o scădere treptată între 20 și 40 de ani (Ziemkiewicz et al. 1991; Hart et al. 1991). O serie de factori controlează aciditatea arealului minier, spre exemplu litologia (Vasilatos et al. 2015), mineralogia, condițiile hidrologice etc. Iazurile de decantare conțin cantități mari de deșeuri rezultate în urma prelucrării minereurilor.

În iaz se depozitează materialul steril rezultat în urma separării mineralelor utile. În general iazurile conțin minerale de gangă, dar și sulfuri, acestea generând caracterul acid al apelor de mină.

Sursele principale de generare a apelor acide sunt iazurile de decantare, haldele de steril, scurgerile de suprafață din carierele active/inactive sau exurgerțe din subteran (**Figura 4**).



Figura 4. a,b,c,d – ape de mină din zona Roșia Montană (a - exfiltrații bază iaz Săliște, b - Galeria RO88, c - Galeria Cetate, d - Galeria 714).

## II. CONTRIBUȚII PERSONALE

### 1. Metodologia de cercetare

**Metodele geochimice**, incluzând **analize izotopice**, stau la baza acestei lucrări, evidențiind parcursul substanțelor toxice provenite din activitățile miniere în apele subterane și de suprafață. Caracteristicile izotopice ale oxigenului și hidrogenului din apă au fost folosite pentru evaluarea **traseelor de curgere** ale apelor subterane, **fenomene de amestec** și interacțiunea dintre apele din precipitații, apele de suprafață și cele subterane. De asemenea potențialul radioactiv al zonei Roșia Montană a fost investigat prin măsurarea concentrațiilor de  $^{222}\text{Rn}$  și  $^{226}\text{Ra}$  în apă.

#### 1.1. Rețea de prelevare

În vederea caracterizării și a estimării variabilității parametrilor compoziționali ai apelor din zona de studiu, a fost definită o rețea de monitorizare, care inițial a cuprins 28 de puncte, iar ulterior a fost reconfigurată la 24 de puncte, considerate ca fiind reprezentative pentru scopul propus. Prelevarea probelor s-a făcut lunar, aproximativ în aceeași perioadă a fiecărei luni, între august 2013 și august 2015. Sursele de apă incluse în studiu au fost clasificate în 5 tipuri: 12 puncte de probare din ape curgătoare, 7 ape acide de mină, 5 lacuri artificiale, 2 fântâni săpate și 2 izvoare captate, în configurația inițială, iar în cea de-a doua fază s-a renunțat la 3 puncte de probare a apelor de suprafață din râuri și 1 punct corespunzător lacurilor artificiale. Probele au fost colectate într-un interval altitudinal cuprins între 576 și 1077 de metri (**Figura 5**).

Punctele de probare a apelor de suprafață au fost selectate în funcție de poziția față de principalele surse de poluare, astfel încât să cuprindă ape potențial necontaminate aflate în amonte de aceste surse (3 puncte), puncte în aval de emergența unor ape de mină (8 puncte) și un punct de referință, aflat la distanță față de zona minieră. Pentru probarea apelor subterane lipsite de o influență directă a zonei miniere au fost selectate izvoare (2 puncte) și fântâni (2 puncte) utilizate pentru alimentarea cu apă a populației din zonă. Apele de mină provin de pe un iaz de decantare (1 punct), scurgere de pe haldele de steril (2 puncte) și exurgente la gura galeriilor miniere (4 puncte).

Au fost, de asemenea, probate lacurile artificiale (tăuri) folosite în trecut ca rezervoare de apă pentru spălarea minereului (4 puncte).

Astfel, s-au efectuat următoarele tipuri de măsurători: pH-ul, temperatura apei, conductivitatea electrică, turbiditatea, oxigen dizolvat, potențial redox, salinitate,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ , precum și concentrația ionilor ( $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) și a metalelor (Ni, Cd, Pb, Cr, Zn, Cu).



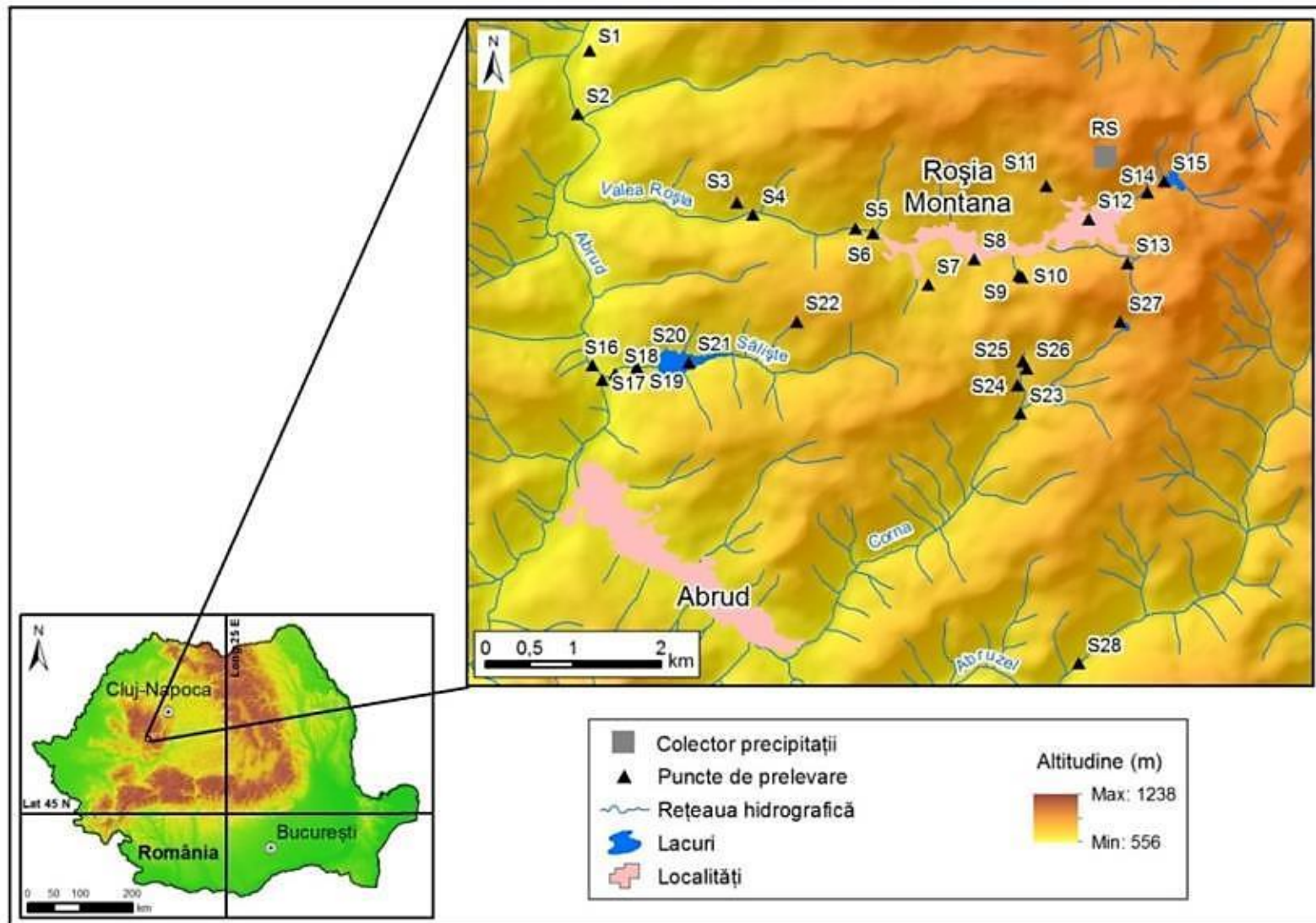


Figura 5. Localizarea punctelor de prelevare din zona de studiu.

## 2. Rezultate și discuții

### 2.1. Caracterizarea geochimică a corpurilor de apă, geneza, dinamica și alimentarea acviferelor.

Caracterul chimic al corpurilor de apă de la Roșia Montană este reflectat de diagrama Piper (**Figura 6**). Apele de mină (S20 – Exfiltrații bază iaz, S25 – Galeria C122, S5 – Galeria 714, S9 – Galeria Cetate, S7 – Haldă Cetate 2, S8 – Galeria RO88) se regăsesc în câmpul diagramei Piper caracterizate ca ape sulfatice-calcice, subordonat magneziene. În triunghiul anionilor apele curgătoare se poziționează pe linia  $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$  fiind predominant sulfatice, cele influențate de lucrările miniere și predominant bicarbonatate, cele care nu au suferit o astfel de influență.

Din punct de vedere al cationilor apele curgătoare sunt calcice subordonat magneziene cu puțin sodiu, plus potasiu. Lacurile artificiale (S13 – Tău Brazi, S15 – Tău Mare, S21 – Luciu iaz Săliște, S26 – Tău Cartuș, S27 – Tău Corna) sunt bicarbonatate, subordonat sulfatice-calcice. Fântânile (S11 – fântâna RO78, S24 – fântâna C120) au ape bicarbonatate-calcice, iar în cazul punctului S24 se observă influența lucrărilor miniere care generează o dominanță sulfatică. Izvoarele (S3 – RO11 și S14 – RO43) sunt bicarbonatate-calcice.

Diagrama Schoeller ([Schoeller, 1955](#)) este frecvent folosită în investigații hidrogeochimice în vederea stabilirii calității apelor subterane și de suprafață. În perimetrul investigat, se constată concentrații foarte mari pentru ionii principali în cazul apelor de mină (**Figura 7**).

Concentrațiile cele mai mici sunt în cazul izvoarelor și a lacurilor artificiale. Apele curgătoare au concentrații variabile ale ionilor principali în funcție de poziția lor, amonte sau aval față de sursele de poluare și de amestecul între diferitele categorii de apă.

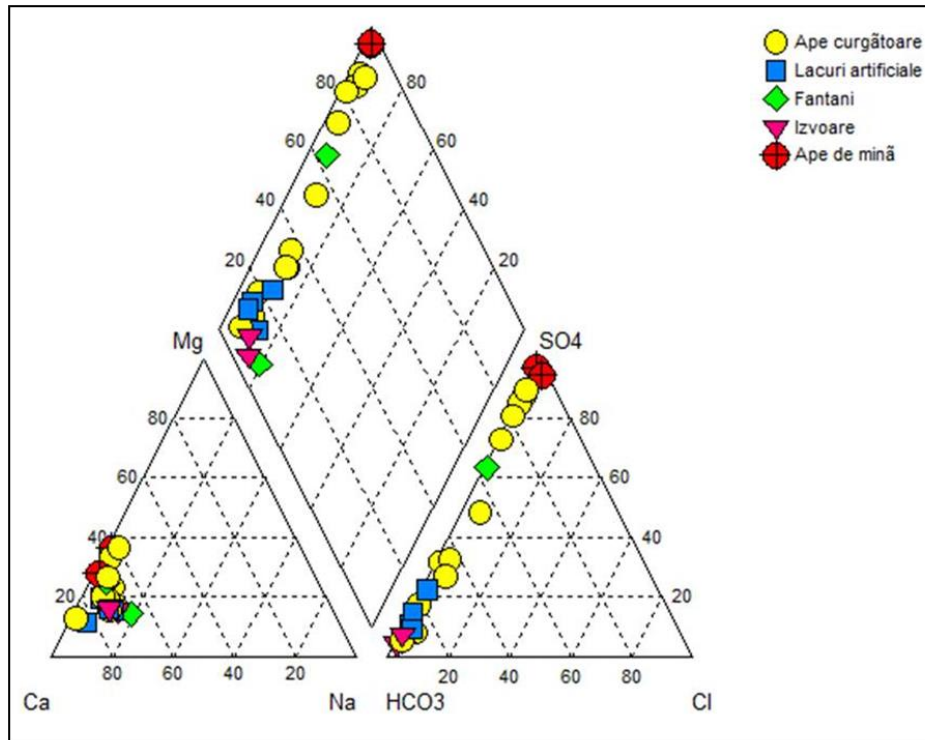


Figura 6. Diagrama Piper utilizată pentru diferitele categorii de apă integrate în studiul geochemic din zona minieră Roșia Montană pentru a reprezenta chimismul acestora.

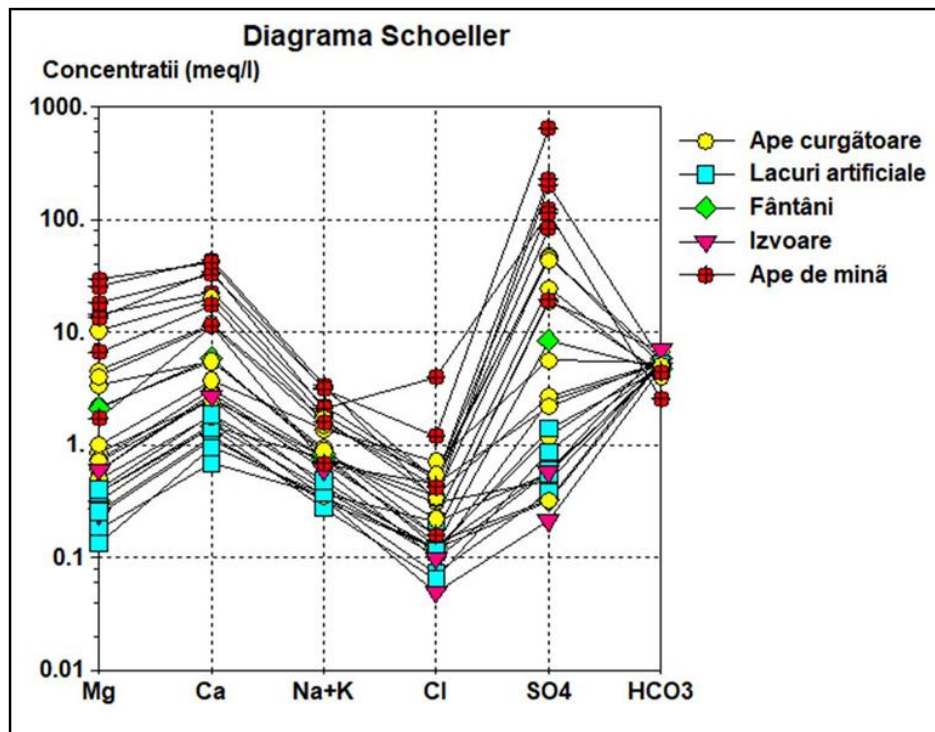


Figura 7. Diagrama Schöeller (valori medii ale ionilor principali pentru toate categoriile de apă incluse în studiu).

Apele de mină din perimetrul minier Roșia Montană conțin concentrații mari de sulfăți, precum și metale grele (**Figura 8**) față de celelalte categorii de apă luate în considerare. Cu precădere cele 5 ape de mină S9 (Galerie Cetate), S5 (Galeria 714), S25 (Galeria C122), S10 (Haldă Cetate 1) și S8 (Galeria RO88) sunt în contact direct cu mineralizația și ocupă în diagrama Ficklin, poziția apelor clasificate ca fiind ultra acide, în concordanță cu suma metalelor urmărite. Punctul S9 are concentrațiile de metale cele mai ridicate și pH-ul cel mai scăzut aflându-se la limita domeniului ultra acid. De asemenea punctele S5, S8, S10 și S25 se remarcă prin valori scăzute ale pH-ului (acid/ultra acid) și valori ridicate ale concentrației de metale. Punctele S7 și S20 se situează în domeniul acid cu concentrații moderate de metale. Apele de suprafață influențate de obiectivele miniere (S4 și S28) pot să se situeze la limita dintre domeniul acid și ultra acid și să conțină concentrații ridicate de metale. Pe măsură ce influența lucrărilor miniere este mai redusă concentrația metalelor și aciditatea scad în apele curgătoare de suprafață. Valorile cele mai mici ale concentrațiilor de metale se remarcă în cazul lacurilor și a apelor subterane neinfluențate de lucrările miniere. Valorile pH-ului în acest caz se situează în domeniul neutru.

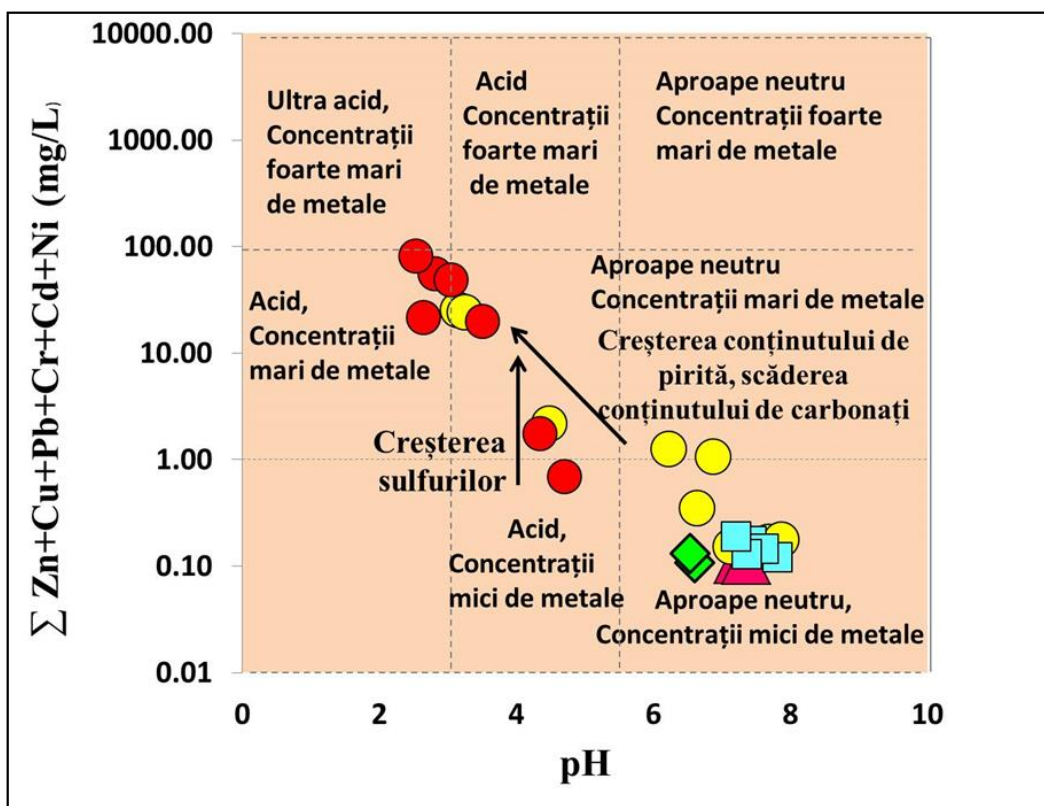


Figura 8. Diagrama Ficklin (1992) redă suma metalelor grele urmărite în studiu în funcție de pH (sunt reprezentate aceleași simboluri precum în Figurile 4 și 5).

În vederea identificării relațiilor dintre sursele de apă investigate s-a realizat o analiză de tip "*Hierarchical Cluster*", utilizând 15 parametri fizico-chimici (pH, conductivitate electrică, Ni, Cu, Zn, Cr, Cd, Pb, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>). Analiza cluster a fost elaborată pe baza datelor mai sus menționate standardizate, utilizând metoda Ward (1963) a distanțelor euclidiene ca măsură a similarității. Dendrograma (Figura 9) evidențiază trei grupe de surse ce se deosebesc după caracteristicile comune pe care le dețin.

Prin urmare, grupa A1 corespunde punctelor cu concentrațiile de metale cele mai mici, grupa A2 reunește punctele cu o contaminare moderată, iar grupă A3 conține punctele cu contaminarea cea mai intensă ca rezultat al activităților miniere (Figura 9).

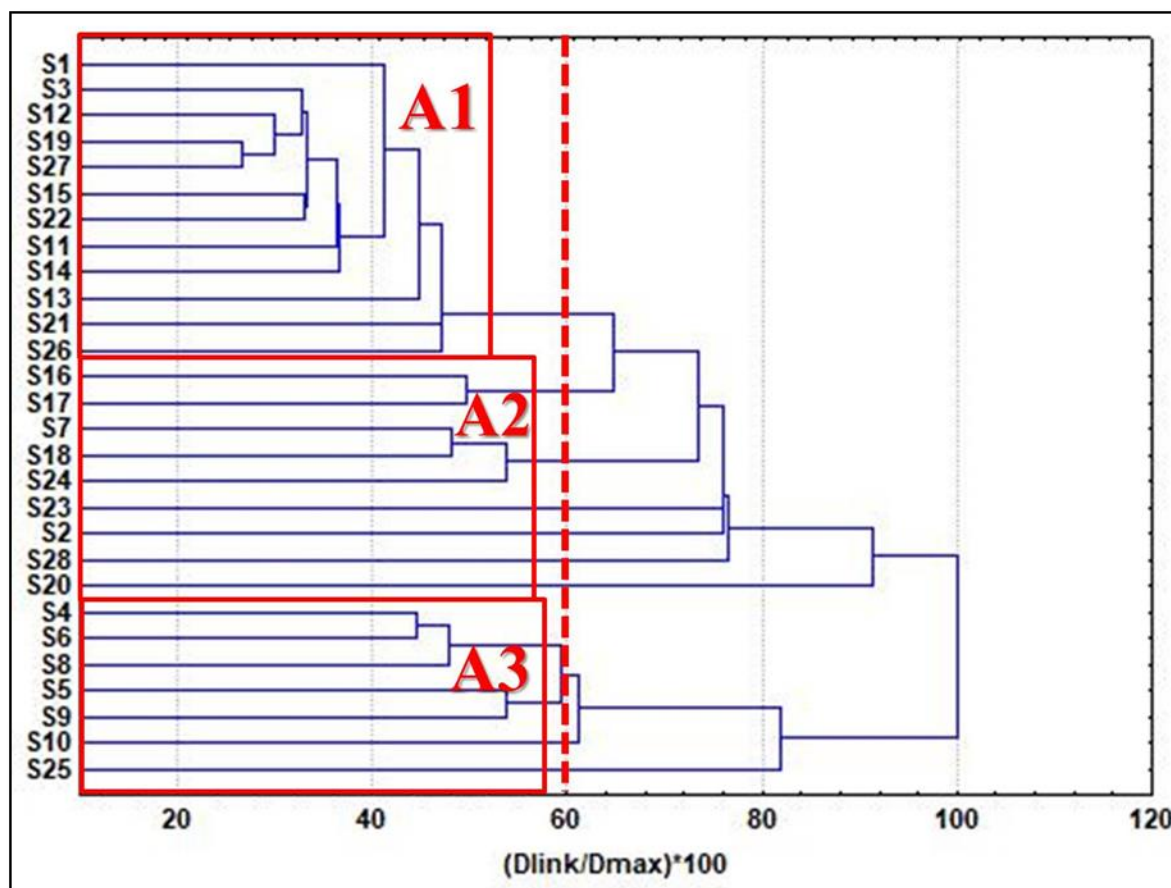


Figura 9. Dendrograma realizată în urma analizei "*Hierarchical Cluster*" pentru toate categoriile de ape investigate în studiul de față

## 2.2. Compoziția izotopică a apelor integrate în studiul geochemic de monitorizare

Izotopii stabili de  $\delta^{18}\text{O}$  și  $\delta\text{D}$  ai apei furnizează informații esențiale cu privire la circuitul apei. Infiltrația precipitațiilor în bazinul hidrografic, scurgerea de suprafață, evapo-transpirația și multe alte procese care au loc pot fi elucidate prin intermediul acestor izotopi stabili.

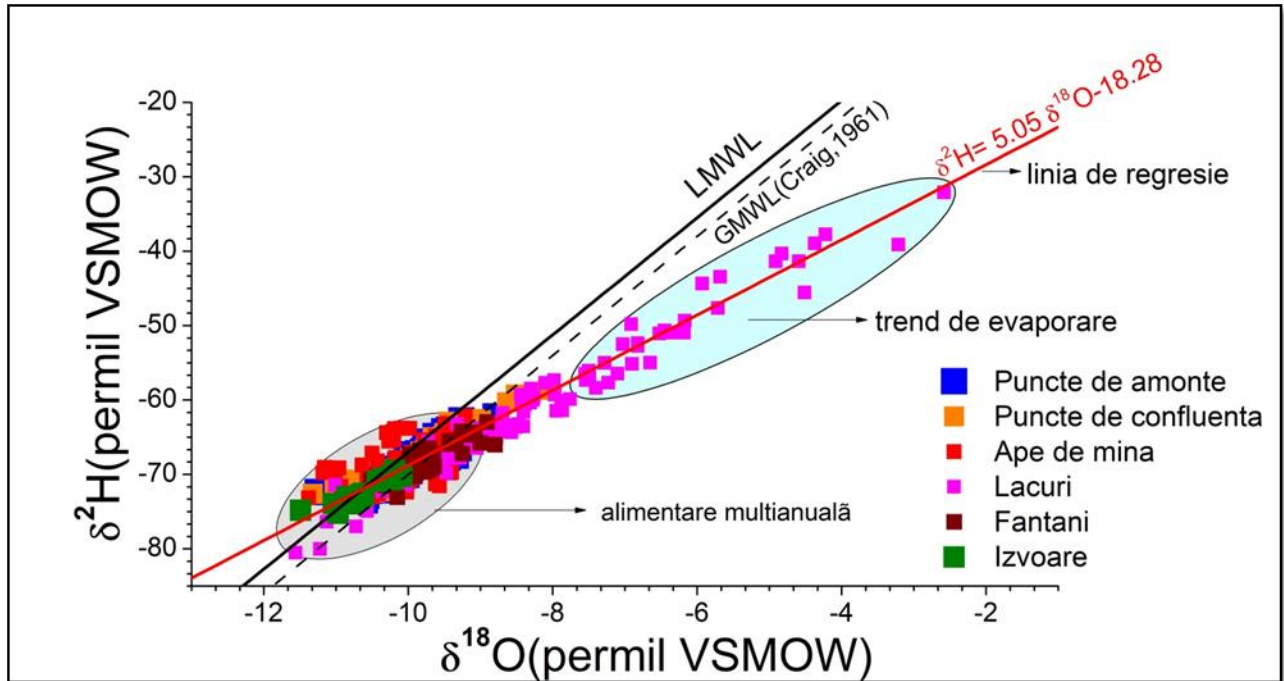


Figura 10. Compoziția izotopică a tuturor categoriilor de apă vizavi de LMWL și GMWL și ecuația de regresie a rezultatelor pentru studiul de față.

Toate tipurile de apă din zona de studiu au origine meteorică, fapt relevat prin poziția lor față de linia meteorică locală. În cazul lacurilor se observă un trend evident de evaporare.

Linia de regresie a tuturor apelor din zona minieră Roșia Montană este redată în ecuația numărul 4 și prezentată în **figura 10**:

$$\delta\text{D} = 5.05 \times \delta^{18}\text{O} - 18.28 \quad (4)$$

În timpul evaporării are loc o fracționare izotopică, izotopii ușori astfel concentrându-se în vapori, iar apa care rămâne este îmbogățită în izotopii grei. Acest proces este mult mai accentuat în cazul oxigenului. Linia de regresie este puternic deviată spre dreapta datorită prezenței lacurilor care imprimă o tendință de evaporare (**Figura 10**).

Apele de suprafață curgătoare și de mină se situează în partea inferioară a liniei de regresie, pe când în cazul lacurilor evaporarea produce o îmbogățire în izotopii grei ceea ce amplasează punctele la partea superioară a liniei de regresie.

### 2.3. Potențialul radioactiv al perimetrului minier Roșia Montană

Trasorii naturali urmăriți în acest studiu hidrogeochimic contribuie la elucidarea unor aspecte de natură geochimică, a originii și dinamicii apelor, astfel încât au fost selectați și cei radioactivi (radon și radiu), pentru a estima potențialul radioactiv al zonei. Izotopii de radon și radiu sunt frecvent folosiți în studii hidrogeochimice cu scopul de a revela procesele particulare ce au loc în rezervorul hidrologic, cu precădere a interacțiunii cu roca gazdă și depozitele deschise la suprafață și ceea ce roca poate imprima acviferului în urma migrării apei în subteran.

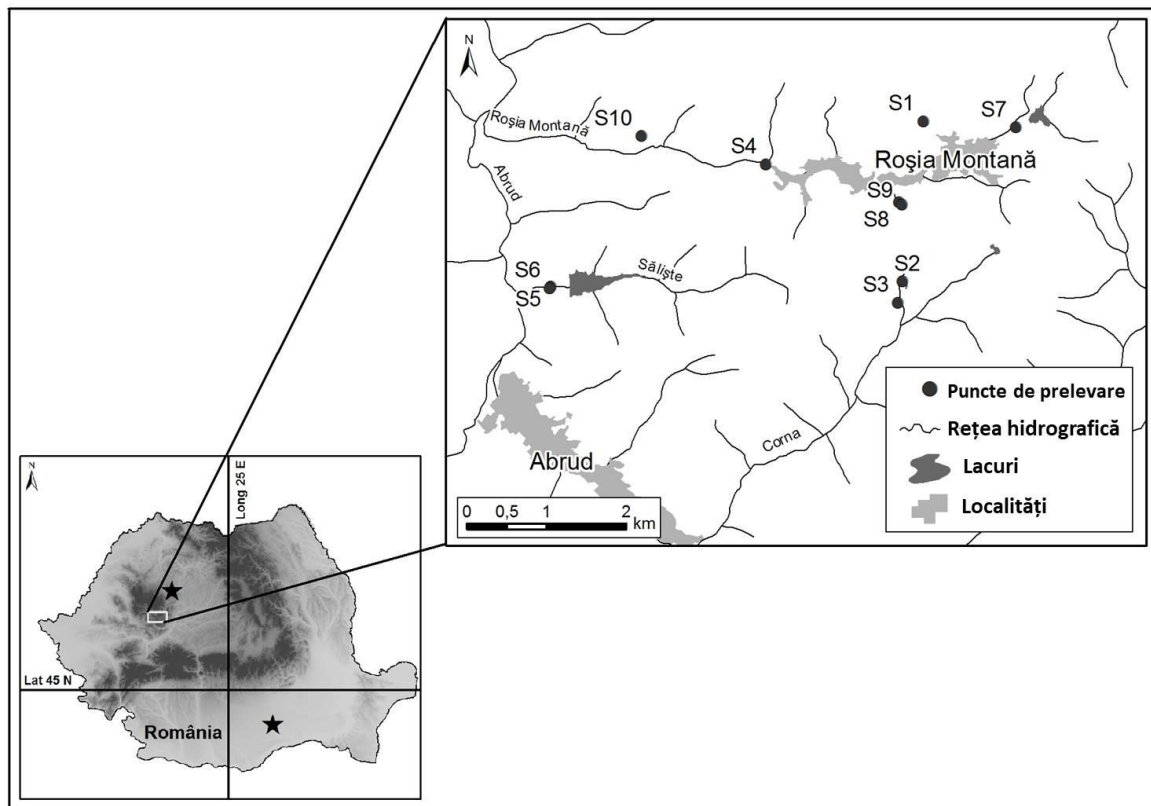


Figura 11. Harta zonei de studiu și locația celor 10 puncte de prelevare în vederea estimării potențialului radioactiv (Cozma et al. 2016).

În **figura 11** se regănesc cele 10 puncte de prelevare în vederea estimării potențialului radioactiv. Punctele au fost selectate astfel încât să fie cele mai reprezentative (ape subterane afectate de activitatea minieră, respectiv neafectate de activitatea minieră) pe o perioadă de 9 luni de monitorizare, noiembrie 2013 – iulie 2014.

Rezultatele reflectă un nivel scăzut al radioactivității în zonă. Concentrațiile de radon și radium nu depășesc pragurile impuse de legislația internațională (Cozma et al. 2016). Astfel cele mai mari concentrații s-au regăsit în izvorul S3 (RO11), cu o valoare de 210 mBq/L în cazul  $Ra^{226}$  și 11.2 Bq/L în cazul  $Rn^{222}$ , punct de monitorizare înafara lucrărilor miniere, neafectat de lucrările miniere (**figura 12**).

Partea de nord a regiunii indică cele mai mari concentrații ale acestor izotopi, pe când cele mai mici concentrații sunt în partea sudică a zonei de studiu (**figura 12**) conform Cozma et al. (2016).

În ciuda faptului că în zona Roșia Montană sunt prezente o serie de halde de steril, și roci expuse factorilor externi și o puternică interacțiune rocă-apă, concentrațiile acestor radionuclizi se mențin mici în zona afectată puternic de activitatea minieră. Acest lucru se explică prin prisma geologiei din zonă care nu favorizează un potențial radioactiv (Cozma et al. 2016).



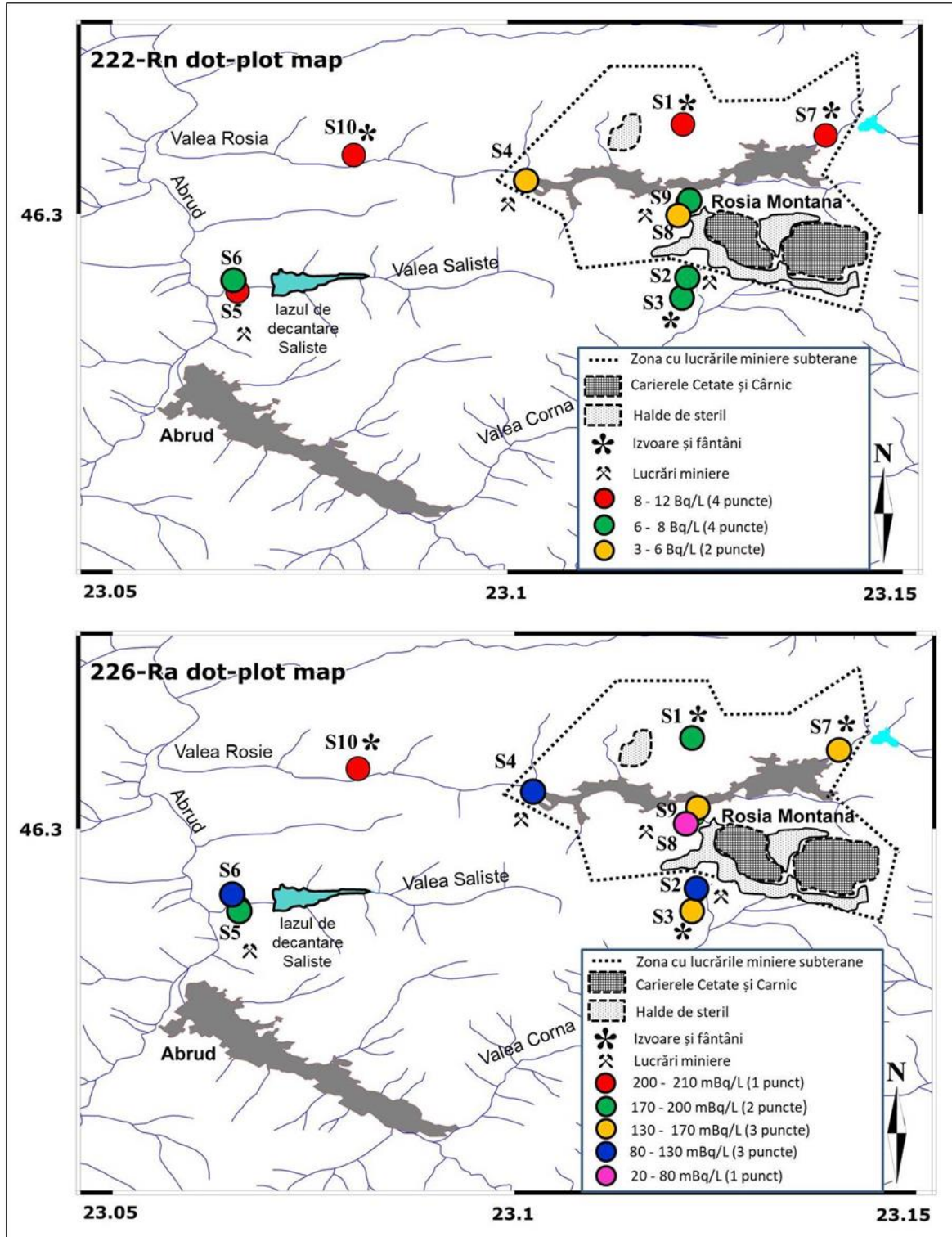


Figura 12. Harta concentrațiilor de  $Rn^{222}$  și  $Ra^{226}$  în zona de studiu (Cozma et al. 2016).

## 2.4. Aplicabilitatea trasorilor naturali și calitatea corpurilor de apă

### 2.4.1. Calitatea apelor de suprafață

Concentrații mari de Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, sulfati, amoniu, magneziu și calciu au fost măsurate în punctul S2 (Aval confluență Roșia cu Abrud), S4 (Aval valea Roșia), S6 (Aval Galeria 714), S28 (valea Abruzel) (**Tabele nr. 2 și 3**). În aceste puncte valorile depășesc limita pentru clasa a III-a și sunt incluse în clasa a IV-a de calitate, conform **Ordinului 161/2006**. De asemenea și pH-ul este foarte scăzut în aceste puncte, sub valoarea de 6.5.

Totodată și pentru valea Corna sunt depășiri ale valorilor admisibile, fiind încadrată în clasa a IV-a de calitate. Cele mai puțin afectate sunt punctele de amonte ale văilor. În cazul lacurilor se constată depășiri la NO<sub>2</sub> și NH<sub>4</sub> provenite în urma poluării organice.

Din cauza calității precare a apelor de suprafață speciile de diatomee sunt afectate, în zonele foarte contaminate de activitatea minieră, comunitățile de diatomee au dispărut aproape complet (**Baciu et al. 2018**).

### 2.4.2. Calitatea apelor din izvoare și fântâni

Conform **legii 458/2002** izvoarele și fântânile au înregistrat valori peste limită în cazul nitratilor și a plumbului. Toate izvoarele și fântânile integrate în studiu au concentrații excedentare de plumb. Concentrațiile de sulfati sunt excesive în punctul S24 (C120), în celelalte 3 surse de apă potabilă încadrându-se în limite normale (**Tabele nr. 2 și 3**).

### 2.4.3. Calitatea apelor de mină

Apele de mină descarcă mari concentrații de contaminanți în emisari, peste limita impusă de **HG 352/2005**. Astfel se regăsesc depășiri în cazul Cd, Ni, Cu, Zn, Pb, nitrati, sulfati, magneziu, calciu, amoniu cu mult peste limita impusă în cazul apelor uzate (**Tabele nr. 2 și 3**).

Valorile ridicate în cazul sulfatilor, azotaților și a metalelor din apele de mină, alături de pH-ul scăzut reprezintă o problemă esențială pentru mediu în zona Roșia Montană. Aceste ape se scurg direct în apele de suprafață, cu efecte foarte puternice în valea Roșia și mai estompate în valea Corna și valea Săliște. Toate aceste văi își au la rândul lor vărsarea în râul Abrud, care suferă o contaminare semnificativă.

Concentrația de nitrati din ape poate fi o consecință a utilizării îngrășămintelor sau a lucrărilor de pușcare efectuate în perioada funcționării minei.




Tabel 2. Concentrații medii ale metalelor grele analizate și depășiri ale valorilor admisibile stabilite prin normativele în vigoare (HG188/2002 modificată HG 352/2005), (Legea 458/2002), (Ordinul 161/2006).

Sursa	Tipul apei	pH	Metale grele ( $\mu\text{g/L}$ )					
			Ni	Cu	Zn	Cr	Cd	Pb
S1	Apă curgătoare	7.71	33.18	16.06	27.34	9.70	40.57	31.65
S2	Apă curgătoare	6.23	73.36	40.09	1052.30	9.53	40.37	37.87
S4	Apă curgătoare	3.15	296.97	444.44	24154.90	27.99	80.24	85.00
S6	Apă curgătoare	3.25	262.11	559.95	23034.80	24.53	69.81	83.46
S12	Apă curgătoare	7.60	29.39	17.45	25.27	8.56	41.76	22.47
S16	Apă curgătoare	7.13	28.15	13.65	65.96	9.27	7.89	26.56
S17	Apă curgătoare	7.62	24.12	19.26	61.85	5.15	12.31	31.45
S18	Apă curgătoare	6.64	46.82	36.41	143.13	12.75	56.73	51.54
S19	Apă curgătoare	7.68	29.49	15.07	30.00	12.07	48.04	32.05
S22	Apă curgătoare	7.87	31.48	29.75	26.61	8.39	38.45	40.64
S23	Apă curgătoare	6.88	158.33	46.18	704.88	21.31	42.54	78.60
S28	Apă curgătoare	4.48	86.13	906.55	1059.16	14.31	33.87	52.59
S3	Izvor	7.25	20.26	28.72	26.68	7.31		32.59
S11	Fântână	6.61	22.41	21.31	25.47	9.59		28.73
S14	Izvor	7.36	24.07	22.69	28.92	10.39		28.73
S24	Fântână	6.54	32.73	21.51	24.38	12.45		40.30
S13	Lac artificial	7.44	33.44	37.10	34.80	41.98		21.70
S15	Lac artificial	7.82	27.73	24.02	25.80	9.14		33.32
S27	Lac artificial	7.61	42.67	22.35	37.42	8.47		34.01
S26	Lac artificial	7.37	31.23	19.62	37.10	11.62		29.35
S21	Lac artificial	7.21	31.03	23.93	91.04	7.51		34.78
S5	Apă de mină	2.82	868.06	1535.21	52227.90	62.98	217.42	178.08
S7	Apă de mină	4.71	83.36	63.97	414.79	16.56	42.73	60.00
S8	Apă de mină	3.05	375.01	806.18	46665.20	44.76	236.67	97.15
S9	Apă de mină	2.54	1730.29	2294.48	75516.70	103.00	649.06	207.00
S10	Apă de mină	2.65	565.93	2514.48	18161.90	62.22	42.63	102.72
S20	Apă de mină	4.35	180.27	40.51	1284.08	38.98	50.46	156.52
S25	Apă de mină	3.51	606.80	169.20	18564.90	36.46	56.18	163.38

HG 188/2002 modificată 352/2005 pentru apele industriale/uzate  
Legea 458/2002 pentru apă potabilă  
Ordinul 161/2006 pentru clasa a III-a de calitate a apelor de suprafață

Tabel 3. Concentrații medii ale ionilor principali măsurați și depășiri ale valorilor admisibile stabilite prin normativele în vigoare (HG 188/2002 modificată HG 352/2005), (Legea 458/2002), (Ordinul 161/2006).

Sursa	Tipul apei	Anioni (mg/L)					Cationi (mg/L)				
		F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
S1	Apă curgătoare	0.09	10.94	2.51	3.12	22.77	7.32	18.2	10.39	49.97	19.24
S2	Apă curgătoare	2.19	25.25	2.5	4.13	269.52	11.17	34.51	12.15	75.15	38.63
S4	Apă curgătoare	1.76	12.07	SLD	14.99	2227.31	20.95	31.95	55.49	235.06	240.57
S6	Apă curgătoare	1.92	19.17	SLD	81.62	2097.97	15.39	32.02	48.94	229.62	SLD
S12	Apă curgătoare	0.06	3.67	1.13	3.4	116.32	6.09	5.16	4.58	30.52	23.41
S16	Apă curgătoare	0.18	12.67	2.65	3.88	130.14	10.23	12.89	8.93	63.18	88.14
S17	Apă curgătoare	0.3	15.88	2.78	22.83	105.77	10.37	8.81	7.33	57.47	SLD
S18	Apă curgătoare	SLD	5.56	3.76	6.09	898.34	7.78	23.6	26.46	109.95	63.83
S19	Apă curgătoare	0.61	4.24	3.05	2.26	56.8	5.18	7.86	8.7	50.27	63.86
S22	Apă curgătoare	0.13	4.3	1.85	1.49	15.31	3.87	7.12	6.11	36.37	35.15
S23	Apă curgătoare	0.14	17.62	15.96	16.74	2250.5	20.69	38.05	126.55	403.22	440.65
S28	Apă curgătoare	1.71	7.81	SLD	7.76	1182.45	8.61	19.62	40.88	110.15	81.68
S3	Izvor	0.15	3.49	3.35	1.86	27.53	9.35	7.89	7.28	54.11	39.03
S11	Fântână	0.07	4.85	1.06	1.75	15.47	9.72	13.26	3.82	29.58	43.98
S14	Izvor	0.05	1.74	0.92	1.12	10.21	5.09	4.45	2.97	22.35	8.35
S24	Fântână	SLD	4.4	4.57	7.19	405.2	11.26	13.04	25.78	118.54	59.41
S13	Lac artificial	0.06	2.55	0.99	1.19	18.25	5.19	5.03	2.17	13.81	13.45
S15	Lac artificial	0.06	4.3	1.18	1.84	28.8	4.87	4	3.12	23.68	14.9
S27	Lac artificial	0.09	4.02	1.98	2.21	66.91	6.31	8.06	4.9	37.22	55.07
S26	Lac artificial	0.1	7.4	0.92	1.36	26.66	1.58	11.85	1.61	19.14	17.28
S21	Lac artificial	0.12	2.3	1.82	1.19	41.88	2.78	5.95	4.59	28.62	3.64
S5	Apă de mină	9.59	17.33	SLD	62.27	11085	38.67	59.25	222.11	659.72	764.92
S7	Apă de mină	0.36	5.6	SLD	14.08	934.21	5.1	17.95	20.78	229.97	2190.97
S8	Apă de mină	2.02	15.06	SLD	33.43	4024.77	16.14	34.97	80.84	351.51	364.97
S9	Apă de mină	6.91	42.47	SLD	98.23	31051.9	32.47	68.23	359.99	841.04	2697.97
S10	Apă de mină	2.81	18.26	SLD	24.83	5960.22	22.44	48.06	175.12	452.8	798.52
S20	Apă de mină	SLD	11.6	SLD	243.62	9773.13	24.34	90.94	311.54	874.41	4397.91
S25	Apă de mină	4.74	141.72	SLD	46.4	5535.73	19.55	49.97	164.35	685.24	563.91

 HG 188/2002 modificată 352/2005 pentru apele industriale/uzate  
 Legea 458/2002 pentru apă potabilă  
 Ordinul 161/2006 pentru clasa a III-a de calitate a apelor de suprafață

## CONCLUZII

Perimetrul minier Roșia Montană este situat în Apusenii sudici, partea de Vest a României și aparține Patrulaterului Aurifer, găzduind unul dintre cele mai importante zăcăminte de aur și argint din Europa (Manske et al. 2006). Relieful este influențat puternic de rețeaua hidrografică, cursurile cele mai importante fiind Roșia, Corna, Săliște și Abruzel, care au modelat masivele existente în zonă.

Pentru studiul de față au fost selectate puncte de probare ce se situează pe cursurile de apă Roșia, Corna, Săliște, Abruzel, respectiv Abrud. Apele acide care provin din lucrările miniere au un aport semnificativ la debitul total cumulat al apelor curgătoare. Un loc aparte între apele de suprafață îl ocupă lacurile artificiale din zonă, denumite „tăuri” de către localnici. Din totalul tăurilor, s-au ales patru în vederea monitorizării, pentru a stabili corelații cu văile pe care sunt situate.

Climatul din zona Roșia Montană este unul temperat continental, cu mici excepții în zonele cu altitudine mai mare, unde domină microclimatul montan cu ierni reci și precipitații solide semnificative, cu un interval între 4 și 6 luni (RMGC, 2006). Temperatura medie anuală este de 7.38°C, cu o maximă medie lunară de 18.6°C înregistrată în sezonul cald, luna august, și cu o minimă medie lunară de -2.4°C pe perioada iernii, înregistrată în luna ianuarie (Stația Meteo Roșia Montană).

Apusenii sudici, care includ și zona prezentului studiu, reprezintă rezultatul funcționării suturii tethysiene majore, care a început, probabil, înaintea Jurasicului și a durat până spre sfârșitul Cretacicului. Este binecunoscut Patrulaterul aurifer, care delimitează un district metalogenetic deosebit de fertil, cunoscut de peste două milenii, îndeosebi pentru resursele de metale prețioase. Zăcămintele prezente în zonă sunt de tipul auro-argintifer (ex. Roșia Montană), auro-cuprifer (ex. Rovina) și cuprifere, de tip *porphyry copper* (ex. Roșia Poieni), la care se adaugă depozite cu metale neferoase comune (plumb, zinc). Roșia Montană reprezintă o structură de *tip maar-diatremă*, cantonată într-o masă de sedimente cretacee, între care predomină șisturile negre. Ca tip de roci, domină brecciile de tip freatomagmatic, roci vulcanoclastice, între care se întrepătrund corpuri subvulcanice de dacite porfirice, dyke-uri dacitice și breccii freatomagmatice târzii. **Mineralizația de interes** din zona Roșia Montană este interpretată ca un sistem epitermal de adâncime moderată spre mică (Tămaș, 2007).

Arealul minier Roșia Montană este caracterizat de o **istorie îndelungată a extracției** aurului și argintului, fiind o zonă de interes încă din perioada Imperiului Roman. Localitatea Roșia Montană apare documentată pentru prima dată în anul 131, sub numele roman de Alburnus Maior, această dată fiind găsită pe o tăbliță cerată într-una din galeriile minei.

**Rețeaua de lucrări subterane** include 140 km de galerii, extinse în zona masivelor Cârnic, Cetate și Orlea. Această rețea cuprinde lucrări miniere din toate perioadele de exploatare, începând de la epoca romană, până în perioada recentă.

Alăturat rețelelor de lucrări subterane, sunt prezente și alte obiective miniere rezultate în urma explorărilor, și anume **2 iazuri de decantare**, **33 halde de steril** și **2 cariere**.

Influența acestor lucrări miniere asupra mediului înconjurător este foarte evidentă prin prisma modificării terenurilor, ocuparea unor mari suprafețe de teren, degradarea acestora, **impurificarea apelor**, **schimbarea regimului hidrodinamic**, poluarea solurilor și afectarea biotei.

În vederea caracterizării și a estimării variabilității parametrilor compoziționali ai apelor din zona de studiu, a fost definită o rețea de monitorizare, care inițial a cuprins **28 de puncte**, iar ulterior a fost reconfigurată la 24 de puncte, considerate ca fiind reprezentative pentru scopul propus. Prelevarea probelor s-a făcut lunar, aproximativ în aceeași perioadă a fiecărei luni, între **august 2013** și **august 2015**. Sursele de apă incluse în studiu au fost clasificate în 5 tipuri: 12 puncte de probare din ape curgătoare, 7 ape acide de mină, 5 lacuri artificiale, 2 fântâni săpate și 2 izvoare captate, în configurația inițială, iar în cea de-a doua fază s-a renunțat la 3 puncte de probare a apelor de suprafață din râuri și 1 punct corespunzător lacurilor artificiale.

Pentru o mai bună înțelegere a genezei și dinamicii apelor din zona minieră Roșia Montană, au fost incluse **analize fizico-chimice** și **chimice** (pH, conductivitate electrică, turbiditate, oxigen dizolvat, potențialul redox, salinitate, concentrația metalelor grele și a ionilor principali), de **radioactivitate** (Ra <sup>226</sup> și Rn <sup>222</sup>) și **izotopice**, optându-se pentru izotopii stabili ai hidrogenului și oxigenului din apă. Pentru ca studiul izotopic să fie complet și relevant, este necesară construcția liniei locale meteorice de precipitații. Au fost selectate două locații pentru colectarea probelor, prima fiind amplasată la **Stația Meteo Roșia Montană**, la o altitudine de aproximativ 1200 m, iar a doua stație fiind amplasată în **Cluj Napoca** la o altitudine de 365 m. În cele două locații au fost instalate colectoare de precipitații cu sistem care previne evaporarea probelor. Probele au fost colectate cu o frecvență lunară, la data de 1 a fiecărei luni.

În teren au fost mășurați următorii parametri fizico-chimici:

Oxigen dizolvat, pH, potențialul redox, turbiditatea, salinitatea, conductivitatea electrică și temperatura apei. Pentru măsurarea parametrilor fizico-chimici s-au utilizat multiparametrul portabil WTW 350I (Germania) și turbidimetrul portabil WTW Turb 430IR.

În teren s-au colectat probe în vederea analizei de laborator pentru metale grele, ioni principali, rapoarte izotopice, radionuclizi.

**Apele de mină** și cele de **suprafață curgătoare** au variațiile cele mai pronunțate față de celelalte categorii de apă. Majoritatea **apelor de mină** au un interval al pH-ului între **2 – 4**, iar apele de **suprafață curgătoare** au valori ale pH-ului între **6 – 8**.

Distribuția ionilor principali este reflectată de diagrama Piper. **Apele de mină** (S20 – Exfiltrații bază iaz, S25 – Galeria C122, S5 – Galeria 714, S9 – Galeria Cetate, S7 – Haldă Cetate 2, S8 – Galeria RO88) se regăsesc în câmpul diagramei Piper caracterizate ca ape **sulfatice-calcice**, **subordonat magneziene**. În triunghiul anionilor **apele curgătoare** se poziționează pe linia **SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>**, fiind **predominant sulfatice**, cele influențate de lucrările miniere și **predominant bicarbonatate**, cele care nu au suferit o astfel de influență.

Din punct de vedere al cationilor **apele curgătoare** sunt **calcice subordonat magneziene cu puțin sodiu, plus potasiu**. **Lacurile artificiale** (S13 – Tău Brazi, S15 – Tău Mare, S21 –

Luciu iaz Săliște, S26 – Tău Cartuș, S27 – Tău Corna) sunt **bicarbonatate, subordonat sulfatice-calcice**.

*Fântânile* (S11 – fântâna RO78, S24 – fântâna C120) au ape **bicarbonatate-calcice**, iar în cazul punctului S24 se observă influența lucrărilor miniere care generează o dominanță sulfatică. *Izvoarele* (S3 – RO11 și S14 – RO43) sunt **bicarbonatate-calcice**.

Diagrama Ficklin cât și dendrograma construită pe baza valorilor medii standardizate ale parametrilor investigați, arată trei tipuri de apă din punct de vedere calitativ, prezente în arealul minier Roșia Montană. Acestea sunt: **1. ape puternic afectate de activitatea minieră (ape de mină), 2. ape de suprafață curgătoare contaminate ca urmare a deversărilor provenite de la gurile de mină, 3. ape neafectate de activitatea minieră (zonele de amonte față de cariere, haldele de steril, gurile de mină, lacurile artificiale și o serie de izvoare și fântâni)** care nu interacționează cu sistemul hidrogeologic care cuprinde zona operațiunilor miniere.

Datorită datelor insuficiente pe teritoriul României, cu precădere în zona munților Apuseni, am luat inițiativa creerii a două noi linii meteorice locale, Roșia Montană și Cluj-Napoca (Cozma et al. 2017), care vor fi referințe pentru alte studii izotopice și care au fost utilizate în studiul prezent pentru o mai bună interpretare a datelor izotopice obținute.

Compoziția izotopică a precipitațiilor din Roșia Montană pentru  $\delta D$  are un interval între -115.58‰ (februarie 2015) și -25.88‰ (august 2015), cu o medie de  $-65‰ \pm 0.09‰$ . Pentru  $\delta^{18}O$  acesta variază între un minim de -15.17‰ (decembrie 2014) și -3.78‰ (august 2015), cu o medie de  $-9.47‰ \pm 0.01‰$ . Prin urmare, ecuația liniei de regresie conform rezultatelor pentru **Roșia Montană** este:

$$\delta D = 7.87^{18}O + 11.72‰$$

Pentru Cluj-Napoca, intervalul rapoartelor izotopice pentru  $\delta D$  este de -7.49‰ (decembrie 2014) și -23.79‰ (iulie 2015), cu o medie de  $-63.32‰ \pm 0.09‰$ . Cu privire la  $\delta^{18}O$  s-a înregistrat o minimă de -14.89‰ (decembrie 2014) și o maximă de -4.27‰ (iulie 2015), cu o medie de  $-9.29‰ \pm 0.03‰$ . Linia de regresie pentru **Cluj-Napoca** are următoarea ecuație:

$$\delta D = 8.03^{18}O + 11.29‰$$

Analizele izotopice confirmă că toate tipurile de apă din zona de studiu au origine meteorică. Toate corpurile de apă au alimentarea din precipitații, având variații sezoniere puternice redate de caracteristicile izotopice, în special în cazul apelor de suprafață curgătoare, dar fără deviații semnificative față de LMWL. Majoritatea punctelor sunt așezate între LMWL și GMWL.

Zona minieră Roșia Montană a fost examinată și din punct de vedere al potențialului radioactiv. Rezultatele studiului, ce a monitorizat 10 puncte pe o durată de 9 luni, noiembrie 2013 – iulie 2014, reflectă un **nivel scăzut al radioactivității în zonă**. Concentrațiile de radon și radium nu depășesc pragurile impuse de legislația internațională.

**Lucrările subterane** sunt parțial inundate ca urmare a închiderii minelor, ceea ce denotă creerea unor condiții favorabile de amestec. Prin urmare, variațiile sezoniere ale parametrilor chimici și izotopici în **apele de mină** sunt mici, cu câteva excepții (**S8, S9 și S25**). Timpul de rezidență în aceste 3 galerii este unul scurt, acviferul fiind superficial și în strânsă legătură cu factorii externi care îi conturează caracteristicile geochemice.

Dintre toate cele 4 galerii poziționate pe masivul Cetate (S5, S8, S9 și S10) **S5 și S10** au un sistem relativ omogen și sunt alimentate din subteran. De asemenea prin prisma comportamentului asemănător al celor 2 galerii menționate S5 și S10 se poate presupune un **timp de rezidență al apelor de ordinul anilor, până la decenii**. S8 și S9 au o legătură strânsă cu factorii externi, prin urmare sunt foarte influențate de condițiile meteorologice.

## ACTIVITĂȚI VIITOARE

Într-un sistem hidrogeologic complex, în care procesele sunt multiple este foarte greu de cuantificat debite, timp de rezidență absolut sau un traseu clar al apelor. Trasorii naturali utilizați pe scară largă în multe areale ale lumii ajută la elucidarea acestor aspecte într-o proporție destul de mare. În studiul de față au existat limitări în cercetare, în special cu privire la localizarea punctului de amestec a diferitelor surse de apă în interiorul lucrărilor subterane, căile de curgere ale acestora și în stabilirea timpului de rezidență exact al apelor.

Un studiu subsecvent, mai detaliat al sistemului hidric de la Roșia Montană ar putea include:

- **Prelevarea de probe din interiorul lucrărilor subterane pentru o mai bună reprezentativitate;**
- **Utilizarea trasorilor artificiali pentru a putea urmări calea de curgere și timpul de rezidență al apei;**
- **Prelevarea zilnică a probelor și analiza imediată. Reprezintă cu adevărat o provocare prin prisma mai multor factori (efort, costuri financiare etc.). Prelevarea zilnică a probelor ar diminua cu mult erorile, deoarece s-ar putea corela măsurătorile cu fiecare eveniment de precipitații și astfel am putea cuantifica un timp de rezidență mai precis al apelor.**

La nivel global au fost stabilite câteva metode ce au fost utilizate cu succes. Enumerăm infiltrometre, mini-piezometre, tehnici geofizice (rezistivitate electrică), izotopi radioactivi ( $S^{35}$  cosmogen), cele utilizate în prezentul studiu (izotopi stabili, concentrația unor metale și a ionilor principali, radonul), CFC (Clorofluorocarburi) și SF<sub>6</sub> (Hexafluorură de sulf),  $^3H$  (tritiu),  $^3H / ^3He$  (tritiu/heliu).

Cuplarea metodelor, instrumentelor și trasorilor este necesară pentru o mai bună înțelegere a proceselor ce au loc într-un areal fie natural, fie antropizat.



## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. Baciuc C., Costin D., 2008. Geologie ambientală. Editura: Casa Cărții de Știință, Cluj-Napoca, 26 – 29 , 70 – 78 p.
2. Baciuc C., Lazăr L., **Cozma A.**, Pop I.C., Costin D., Papp D.C., Cociuba I., Malinen M., Turunen K., Forsman P., Nieminen S., 2018. Geochemical and Isotope Methods for Assessing Contaminant Transport at Three Mine Sites: Kittilä mine in Finland and Roșia Montană and Zlatna mines in Romania. Report /ERA-MIN –SUSMIN-D5.4, 47 pages. Babes-Bolyai University.
3. Biblia, Vechiul Testament, Iov 5:10.
4. Bordea S., Avram E., Bordea J., 1979. Harta geologică a României, scara 1:50.000, foaia Abrud. Institutul de Geologie și Geofizică, București.
5. Caruso B.S., Mirtskhulava M., Wireman M., Schroeder W., Kornilovich B., Griffin S., 2011. Effects of Manganese Mining on Water Quality in the Caucasus Mountains, Republic of Georgia. *Mine Water Environ*, 1 – 13 pp.
6. Clark I.D., Fritz P., *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, 1998.
7. **Cozma A.**, Baciuc C., Papp D., Rosian G., Pop C., 2017. Isotopic composition of precipitation in Western Transylvania (Romania) reflected by two local meteoric water lines. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, vol.12 (2), p. 357 – 364.
8. **Cozma A.I.**, Baciuc C., Moldovan M., Pop I.C., 2016. Using natural tracers to track the groundwater flow in a mining area. *Procedia Environmental Sciences* 32, p. 211 – 220.
9. Deutsch W. J., 1997. *Groundwater Geochemistry: Fundamentals and Applications to Contamination*, CRC Press, N.Y., 221 p.
10. Ficklin W.H., Plumlee G.S., Smith K.S., McHugh J.B., 1992. Geochemical classification of mine drainage and natural drainages in mineralised areas. In: (Kharaka, Y.K., Maest, A.S.Eds), *Proceedings, 7<sup>th</sup> International Symposium. Water Rock-Interaction*, 381 – 384.
11. Gammons C.H., Brown A., Poulson S.R., Henderson T., 2013. Using stable isotopes (S,O) of sulfate to track contamination of the Madison karst aquifer, Montana, from coal mine drainage. *Applied Geochemistry* 31, 228 – 238.
12. Gammons C.H., Duaine T.E., Poulson S.R., Parker S.R., (2010). “Geochemistry and stable isotopes of acid mine drainage from abandoned underground coal mines, central Montana, USA”. *Chemical Geology*, 269, 100 – 112.
13. Garrels R.M., Thompson M.E., 1960. Oxidation of pyrite by iron sulfate solutions. *American Journal of Science. Bradley Volume*, vol.258-A, p. 57 – 67.
14. Ghomshei M.M., Allen D.D., 1999. Hydrochemical and stable isotopes assessment of tailings pond leakage, Nickel Plate Mine, British Columbia, 3 – 5 p.

15. Ghomshei M.M., Allen D.D., 1999. Potential application of oxygen-18 and deuterium in mining effluent and acid rock drainage studies, 1– 4 p.
16. Hart W.M., Batarseh K., Swaney G.P., Stiller A.H., 1991. "A Rigorous Model to Predict the AMD Production Rate of Mine Waste Rock," in Proceedings Second International Conference On The Abatement Of Acidic Drainage, September 16 – 18, 1991, Montreal, Canada, Volume 2, 257 – 270 p.
17. Hazen M.J., Williams M., Stover B., Wireman M., 2001. Characterisation of acid mine drainage using a combination of hydrometric, chemical and isotopic analyses, Mary Murphy Mine, Colorado. *Environmental Geochemistry and Health* 24: 1 – 22.
18. Hem J.D. 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, USGS Water Supply paper 2254.
19. Hofmann H., Knöller K., Lessmann D., 2008. Mining lakes as groundwater-dominated hydrological systems: assessment of the water balance of Mining Lake Plessa 117 (Lusatia, Germany) using stable isotopes. *Hydrological Processes* 22, 4620 – 4627 (2008).
20. Hotărâre nr. 352 din 21 aprilie 2005 privind modificarea și completarea Hotărârii Guvernului nr. 188/2002 pentru aprobarea unor norme privind condițiile de descărcare în mediul acvatic a apelor uzate.
21. Lege nr. 458 (rI) din 08/07/2002 Republicat în Monitorul Oficial, Partea I, nr. 875 din 12/12/2011, privind calitatea apei potabile.
22. Leybourne M.I., Cameron E.M., 2007. Groundwaters in Geochemical Exploration: Methods, Applications, and Future Directions. *Advances in Regional-Scale Geochemical Methods*, p. 201 – 221.
23. Leybourne M.I., Clark I.D., Goodfellow W.D., 2006. Stable isotopes geochemistry of ground and surface waters associated with undisturbed massive sulfide deposits constraints on origin of waters and water-rock reactions, 1 – 3 p.
24. Manske S.L., Hendequist J.W., O'Connor G., Tamas C., Cauuet B., Leary S., Minut A., 2006. Rosia Montana, Romania-Europe`s largest gold deposit, in SEG newsletter: Littleton, Colorado, Society of Economic Geologists, no. 64, p. 11 – 14.
25. Melchiorre E., Dale D., Mills J.Jr., Chapman B., 2005. Geochemical and Stable Isotope Evidence for Precipitation and Groundwater Sourcing of Recharge at the Green Valley Site, Vigo County, Indiana. *Mine Water and the Environment*.
26. Mutihac V., Structura geologică a teritoriului României. Editura tehnică, 1990. pagini 424.
27. Nordstrom D.K., 1979. "Aqueous Pyrite Oxidation and the Consequent Formation of Secondary Iron Minerals," in "Acid Sulfate Weathering," Soil Science Society of America Special Publication No. 10, 37 – 56 pp.
28. Oiro S., Comte J.C., Soulsby C., Walraevens K., (2018). Using stable water isotopes to identify spatio-temporal controls on groundwater recharge two contrasting East African aquifer systems, *Hydrological Sciences Journal*, 63:6, 862 – 877.

29. Ordin nr. 161 din 16 februarie 2006 pentru aprobarea Normativului privind clasificarea calitatii apelor de suprafata in vederea stabilirii starii ecologice a corpurilor de apa.
30. Raport la studiul de impact, 2014. Inchidere si ecologizare iaz v. Seliștei, județul Alba. Beneficiar: Ministerul Economiei – S.C. CONVERSMIN S.A. Elaborator proiect: S.C. SANTEDIL PROIECT SRL, PLOIEȘTI.
31. RMGC, 2006. Rosia Montana Gold Corporation S.A.- Report on Environmental Impact Assessment Study.
32. Schoeller H., 1955. Geochimie des eaux souterraines. Rev. Inst. Franc. Pétrole. Paris, 10 (3), p. 181-213 y 10 (4) p. 219 – 246.
33. Seal II R.R., Hammarstrom M.J., Johnson N.A., Piatak M.N., Wandless A.G., 2008. Environmental geochemistry of a Kuroko-type massive sulfide deposit at the abandoned Valzinco mine, Virginia, USA.
34. Singer P.C., Stumm W., 1970. "Acid Mine Drainage: The Rate Determining Step," Science 167; pp 1121 – 1123.
35. Sracek O., Choquette M., Gélinas P., Lefebvre R., Nicholson RV, 2004. Geochemical characterization of acid mine drainage from a waste rock pile, Mine Doyon, Québec, Canada. J Contam Hydrology 2004, 69 (1-2), p.45 – 71.
36. Tamas C.G., 2007. Endogenous breccias structures (breccia pipe–breccia dyke) and the petrometallogeny of Rosia Montana ore deposit (Metaliferi Mountains, Romania). Casa Cartii de Stiinta, Cluj-Napoca.
37. Vasilatos C., Koukouzas N., Alexopoulos D., 2015. Geochemical Control of Acid Mine Drainage in Abandoned Mines: The Case of Ermioni Mine, Greece, Procedia Earth and Planetary Science, 15, 945 – 950.
38. Ward J.H., (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function, Journal of the American Statistical Association, 58, 236 – 244.
39. World Commission on Environment and Development. Our Common Future. Document A/42/427-Development and International Co-operation:Environment, 1994.
40. [www.minind.ro](http://www.minind.ro). Data accesării 02.11.2016.
41. Ziemkiewicz P., Renton J., Rymer T., 1991. "Prediction and Control of Acid Mine Drainage: Effect of Rock Type and Amendment," in Proceedings Twelfth Annual West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium, April 3 – 4, 1991, Morgantown, West Virginia.