

**UNIVERSITATEA “BABEȘ-BOLYAI” DIN CLUJ-NAPOCA**

**FACULTATEA DE BIOLOGIE ȘI GEOLOGIE**

**Școala doctorală de Geologie Teoretică și Aplicată**



**RADONUL GEOGENIC ÎN RELAȚIE CU  
CONCENTRAȚIA DE RADON DIN INTERIOR.  
STUDIU DE CAZ: CLUJ-NAPOCA**

**REZUMAT**

**Autor:**

**ȘTEFAN FLORICĂ**

**Conducător științific:**

**Prof. Univ. Dr. VLAD A. CODREA**

**Cluj-Napoca, 2022**

## Cuvinte cheie

Radon, radon geogenic, radon rezidențial, radon corelat cu pedologia, radon corelat cu geologia, potențialul de radon, detectarea radonului, indicele de radon, radonul din Cluj-Napoca, radonul din Romania.

## Cuprins

Introducere .....	1
Capitolul 1: Radonul.....	3
1.1.  Expunerea la radon.....	5
1.1.1.  Efectele asupra sănătății .....	5
1.2.  Reglementări legislative.....	6
Capitolul 2: Metode și aparatură de măsurare a radonului .....	7
2.1.  Metode și aparatura folosite în teză pentru măsurarea radonului din aer .....	7
2.1.1.  Metoda pasivă – tehnica detectării de urme .....	7
2.1.2.  Intercompararea rezultatelor obținute prin metoda pasivă.....	8
2.2.  Metode și tehnici folosite în teză pentru măsurătorile de radon în sol.....	9
2.2.1.  Tehnica camerei de scintilație.....	9
2.2.2.  Tehnica celulelor de ionizare .....	10
2.2.3.  Intercompararea rezultatelor obținute prin metoda activă.....	11
2.3.  Metode de evaluare a potențialului de radon din sol.....	11
2.3.1.  Metoda Neznal de determinare a potențialului de radon.....	12
2.3.2.  Metoda Kemski de determinare a potențialului de radon.....	12
2.3.3.  Diagnosticul de radon al clădirilor.....	13
Capitolul 3: Etapele cercetării.....	14
3.1.  Distribuția radonului în sol și apă la nivel național.....	15
3.2.  Contribuția radonului geogenic la concentrația de radon din interior.....	20
3.3.  Căile de pătrundere a radonului în interior .....	21
3.3.1.  Interpretarea rezultatelor .....	21
Capitolul 4: Studiu de caz – Cluj-Napoca.....	25
4.1.  Geologia și pedologia municipiului Cluj-Napoca și a ariei periurbane .....	25
4.1.1.  Stratigrafia .....	26
4.1.2.  Pedologia.....	28

4.2. Sumarul statisticii .....	29
Capitolul 5: Rezultate .....	30
5.1. Analiza măsurătorilor de radon rezidențial, în raport cu geologia și pedologia zonei..	30
5.2. Analiza măsurătorilor de radon din sol, în raport cu geologia și pedologia zonei .....	33
5.3. Analiza combinată a măsurătorilor de radon rezidențial și din sol, în raport cu geologia și pedologia zonei .....	40
5.4. Discuții .....	42
Capitolul 6: Concluzii.....	49

## Introducere

Radioactivitatea a suscitat interesul comunității științifice încă de la descoperirea fenomenului, de către Henri Becquerel, în anul 1896. Studiul radioactivității a condus la dezvoltarea unui domeniu de sine stătător, cel al radioprotecției, care studiază efectele pe care radiația ionizantă le induce asupra organismului uman.

Efectele nocive ale radiației ionizante asupra organismelor sunt binecunoscute și au fost subliniate prin evenimente de tristă amintire din istoria recentă a omenirii: accidentul nuclear de la Cernobîl, bombele nucleare lansate împotriva populației la Hiroshima și Nagasaki, testele nucleare din diferite părți ale lumii etc.

Deși radioactivitatea generată antropic poate avea un impact catastrofal și imediat asupra mediului înconjurător, un alt inamic, mult mai subtil, poate avea un impact la fel de nociv pe termen lung. Radioactivitatea naturală reprezintă principala sursă de radiație la care toată populația globului este expusă, în diferite grade, funcție de poziționarea geo-topografică și de caracteristicile geologice ale scoarței terestre. Alături de radiația terestră, generată de izotopii carbonului, potasiului și ai uraniului – regăsiți în diferite cantități în toate tipurile de roci, soluri sau ape – radiația cosmică joacă de asemenea un rol important în iradierea însumată a populației.

Radonul este considerat principala sursă de expunere la radiații ionizante a populației, iar în ultimii ani este unul dintre cei mai studiați agenți carcinogeni din mediu, fiind clasificat de organizațiile internaționale specializate în radioprotecție drept agent cancerigen de categoria I. Deși efectele nocive ale radonului și descendenților acestuia asupra plămânilor sunt binecunoscute – fiind demonstrate prin numeroase studii epidemiologice care au indicat corelația dintre nivelurile crescute de radon și cancerul pulmonar – impactul pe care îl are asupra întregului organism este încă necunoscut.

Fiind un gaz inert, radonul are capacitatea de a se infiltra și acumula în incinte, în concentrații însemnate, care pot cauza serioase probleme de sănătate. Recomandările organizațiilor internaționale specializate în sănătate publică și radioprotecție stipulează necesitatea efectuării de măsurători sistematice și stabilirea unor niveluri de referință cu privire la expunerea la radon, precum și depistarea zonelor de risc caracterizate printr-un potențial de radon crescut.

Recomandările internaționale au fost transpuse în legislația europeană prin Directiva 2013/59/EURATOM a Consiliului din 5 decembrie 2013, care stabilește normele de securitate de bază cu privire la protecția împotriva pericolelor expunerii la radiațiile ionizante. Devine obligatoriu astfel, pentru toate statele europene, să dezvolte planuri naționale de acțiune pentru abordarea riscurilor care rezultă din expunerea la radon și să stabilească niveluri de referință ale concentrațiilor de radon din interior care să nu depășească  $300 \text{ Bq/m}^3$  (unitatea internațională de măsură a radioactivității este becquerelul). Dacă pentru locuințele particulare directiva europeană prevede doar recomandări, pentru locurile de muncă și cele cu acces public aceasta devine obligatorie. Astfel, statele membre trebuie să asigure, prin legislații proprii specifice, limitele de doză, măsurarea cantității de radon și implementarea soluțiilor de remediere – dacă concentrația depășește nivelul de referință stabilit de fiecare stat în parte.

Directiva EURATOM a fost transpusă și în legislația românească, unde nivelul de referință a fost stabilit la  $300 \text{ Bq/m}^3$ .

Odată cu implementarea directivei europene, majoritatea statelor membre care s-au raliat la aceasta au întreprins studii științifice cu privire la stabilirea zonelor de risc la radon. Abordările au fost din cele mai diverse, însă, în momentul de față, harta europeană de risc la radon întocmită conform recomandărilor JRC (Joint Research Centre), a presupus doar măsurători rezidențiale. Harta este divizată în celule de caroiaj de  $10 \times 10 \text{ km}$  ( $100 \text{ km}^2$ ), iar valorile măsurate pentru fiecare celulă în parte sunt reprezentate sub forma mediei aritmetice. O astfel de abordare are unele limitări și de aceea trebuie privită cu oarecare rețineră. Abordările mai noi iau în considerare și alte variabile, precum permeabilitatea solului, pedologia, conținutul în metale radioactive al solului și geologia.

Este binecunoscut faptul că geologia reprezintă sursa principală a elementelor radioactive din care provine radonul. Cele mai multe abordări în cartografierea radonului geogenic și a potențialului de radon au la bază componenta geologică. Care este relația radonului geogenic cu radonul din interior, care sunt căile de pătrundere și care variabile influențează migrarea și acumularea radonului în incinte, reprezintă întrebări ale căror răspunsuri țin de specificitatea fiecărei țări în parte.

Lucrarea de față își propune să răspundă la o parte dintre aceste întrebări și să contribuie, alături de studiile existente la ora actuală în România, la o cunoaștere mai aprofundată a problematicii radonului.

## Capitolul 1: Radonul

Radonul este un gaz radioactiv omniprezent în mediul înconjurător. Este generat natural și prezența lui este interdependentă de seriile de dezintegrare ale uraniului - element ce se găsește în toate tipurile de roci și soluri, într-o cantitate mai mare sau mai mică, în funcție de geneza acestora. Radonul poate migra din roci în sol și mai apoi se poate infiltra și acumula în incintele clădirilor, la niveluri de concentrație care pot fi problematice din punct de vedere medical. Cercetările din ultimii ani au arătat că acesta reprezintă principala sursă de iradiere a populației, fiind totodată catalogat drept agent cancerigen de categoria I (IARC, 1988; ICRP, 2007; UNSCEAR, 2008; WHO, 2009).

Radonul ( ${}_{86}\text{Rn}$ ) are 37 de izotopi radioactivi cunoscuți, de la  ${}^{195}\text{Rn}$  la  ${}^{231}\text{Rn}$ . Datorită timpilor de înjumătățire scurți, majoritatea acestor izotopi nu prezintă o contribuție semnificativă la expunerea naturală, deoarece probabilitatea de a se dezintegra înainte de a ajunge în atmosferă este mult mai mare față de radon. Pe de altă parte, izotopul  ${}^{222}\text{Rn}$ , descendent al  ${}^{226}\text{Ra}$  și cu originea în seria  ${}^{238}\text{U}$ , are un timp de înjumătățire de 3,8 zile, timp suficient ca acesta să se acumuleze în concentrații semnificative. O consecință deosebită în iradierea populației nu o are radonul *per se*, cât mai ales descendenții care se formează prin descompunere și care contribuie activ la iradierea internă și externă. Este vorba despre izotopii radioactivi  ${}^{218}\text{Po}$ ,  ${}^{214}\text{Pb}$ ,  ${}^{214}\text{Bi}$  și  ${}^{214}\text{Po}$ , care provin din seria uraniului ( ${}^{238}\text{U}$ ) și care mai poartă denumirea de descendenți ai radonului (Figura 1).

Radonul se formează continuu în crusta terestră prin dezintegrarea uraniului aflat în diferite asociații minerale. Caracterizat printr-o activitate chimică ridicată, uraniul intră ușor în reacție cu alte elemente chimice, conducând la formarea atât de minerale propriu-zise de uraniu, dar și de minerale accesorii cu conținut de uraniu. Deși abundența crustală a uraniului este relativ scăzută (2,7 ppm), 5 % dintre mineralele cunoscute în prezent conțin uraniu drept constituent principal. Pe lângă acestea, mineralele accesorii, concentratoare de uraniu, sunt mult mai numeroase.

În rocile magmatice uraniul se prezintă sub formă de minerale de uraniu propriu zise, minerale cu conținut de uraniu, precum și ca element de substituție în rețelele cristaline ale unor minerale. De asemenea, uraniul mai poate fi adsorbit la suprafața cristalelor și granulelor sau se poate afla în spațiul intergranular. Nu în ultimul rând, poate fi încapsulat în incluziunile fluide ale mineralelor sau în defectele structurale ale rețelelor cristaline, inclusiv pe planele de clivaj. În magmatogeneză uraniul se acumulează în fazele finale ale diferențierii magmatice,

având o afinitate deosebită pentru rocile acide. Distribuția geochimică cantitativă a uraniului în rocile magmatice evidențiază o creștere a concentrațiilor de uraniu de la rocile bazice și ultrabazice spre cele intermediare și acide (e.g., Stoici și Tătaru, 1988; Cosma și Jurcuț, 1996; Murariu, 2005). Se observă, de asemenea, corelația pozitivă dintre conținutul de uraniu și cele de SiO<sub>2</sub> și K<sub>2</sub>O, și negativă față de conținutul de CaO (Stoici și Tătaru, 1988).

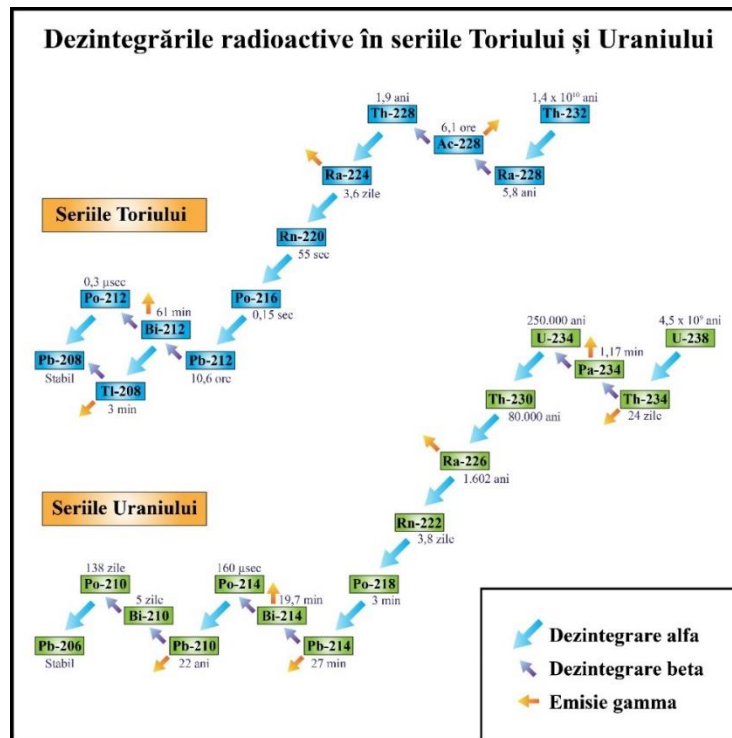


Figura 1. Seriile de dezintegrare ale uraniului și toriului și produșii acestora de filiație (redesenat după Ud-Din Khan și Nakhbov, 2020).

În România, cele mai mari valori medii ale radioactivității magmatitelor au fost determinate în riolite și granite, iar cele mai mici valori în dunite, gabbrouri și bazalte (Stoici și Tătaru, 1988), confirmând astfel tendința de creștere a concentrațiilor de elemente radioactive odată cu diferențierea magmatică.

Conținutul în uraniu al rocilor metamorfice depinde în principal de compoziția și natura rocilor parentale supuse proceselor de metamorfism și mai puțin de gradul de metamorfism sau vârsta metamorfitelor (Murariu, 2005). Prin îngropare, sub influența temperaturilor și presiunilor înalte, rocile parentale se metamorfozează (și uneori se topesc), ceea ce favorizează fracționarea și concentrarea uraniului (Klepper și Wyant, 1957)

Similar cazului rocilor magmatice, în rocile metamorfice uraniul se formează atât minerale principale, dar apare frecvent și în mineralele accesorii, de exemplu zirconul și



apatitul. Mai rar ocupă defecte structurale în rețeaua cristalină, este adsorbit la suprafața grăuntelui mineral sau se fixează pe planele de clivaj (Ahmad și Wilson, 1981).

Din cercetările efectuate în România cu privire la distribuția cantitativă a metalelor radioactive în metamorfite, reiese că rocile metamorfice cu cel mai mare conținut de uraniu sunt epimetamorfitele Grupului de Tulgheș, la polul opus aflându-se rocile amfibolice, cuarțitele, calcarele și dolomitele cristaline (Murariu, 2005). Gnaisesele cu microclin conțin mai mult uraniu decât gnaisesele cu plagioclazi, iar în Grupul de Someș (M-ții Apuseni), micașisturile conțin mai mult uraniu decât amfibolitele (Stoici și Tătaru, 1988; Murariu, 2005).

În procesele sedimentare, acumularea uraniului în roci depinde de capacitatea de migrare a acestuia în apele naturale și depunerea din soluții sub acțiunea agenților reducători și adsorbanților. Mobilitatea uraniului este condiționată în special de chimismul apelor și valorile  $pH$  și  $Eh$ . (Murariu, 2005; Cumberland et al., 2016). Materia organică, prin fenomenele de reducere enzimatică, bio-sorbție, bio-mineralizare și bio-acumulare asociate bacteriilor, influențează starea de oxidare și în consecință mobilitatea uraniului. Uraniul biogenic rezultat astfel poate fi ușor supus, în timp, proceselor de reoxidare și remobilizare (Cumberland et al., 2016; Rallakis et al., 2019).

Rocile sedimentare pot conține de la câțiva ppm U până la câteva zeci de mii ppm U, cum este cazul nisipurilor negre (38750 ppm U) și al argilelor negre (19400 ppm U) din regiunea Coutras din Franța (Murariu, 2005). În România, rocile sedimentare au fost studiate insuficient sub acest aspect. Stoici și Tătaru (1988) plasează majoritatea rocilor sedimentare aproape de media de 3 ppm U. Concentrațiile cele mai ridicate de elemente radioactive se găsesc în șisturi argiloase și argile, urmate de gresii, microconglomerate și conglomerate. Cele mai mici concentrații sunt măsurate în rocile carbonatice (Stoici și Tătaru, 1988).

## **1.1. Expunerea la radon**

### **1.1.1. Efectele asupra sănătății**

Conform raportului Comitetului Științific al Națiunilor Unite cu privire la efectele radiațiilor atomice (UNSCEAR, 2008), principala sursă de expunere la radiații ionizante a populației o reprezintă inhalarea radonului (1,26 mSv), cu o pondere de 42 % din totalul mediei de expunere. Efectele nocive ale radonului și ale descendenților acestuia, care emit particule alfa, sunt cunoscute de multă vreme și au fost dovedite prin numeroase studii epidemiologice efectuate pe animale și oameni. Organizațiile internaționale specializate în sănătate publică și

radioprotecție au clasificat radonul drept agent cancerigen de categoria I (IARC, 1988; ICRP, 2007; WHO, 2009). Deși radonul contribuie la iradierea întregului organism, organul țintă este plămânul. Numeroase studii au arătat că inhalarea radonului este o cauză directă a declanșării cancerului pulmonar (Cross, 1998; Darby et al., 2005, 2006). Fumatul rămâne principala cauză a declanșării patologiilor oncologice la nivelul plămânilor și tractului respirator, însă radonul se află pe locul doi după acesta, reprezentând principala cauză de cancer pulmonar la nefumători (WHO, 2009). Riscul de cancer este mult mai mare pentru fumători dacă aceștia sunt supuși unui mediu cu concentrații ridicate de radon. Un risc ridicat îl prezintă și copiii deoarece, din cauza mărimii plămânului, rata de respirație este mai mare, și implicit va crește rația de radon inspirat (Keith et al., 2012).

Efectele fiziopatologice ale radonului se leagă în primul rând de producția de dezintegrare ai acestuia care emit radiații alfa, beta, gama, precum și radiații X. Radiațiile alfa au un efect mult mai puternic din punct de vedere radiobiologic decât cele beta sau gama, modificările pe care le produc la nivelul ADN-ului putând favoriza aberațiile cromozomiale sau chiar ruperea acestuia, fenomene care pot da naștere proceselor carcinogene. Chiar dacă radonul poate fi ușor expirat, producția sa de dezintegrare precum  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  se pot atașa de particulele de aerosoli și forma clusteri care se pot atașa de particulele în suspensie. Acestea din urmă vor fi inspirate și depozitate pe tot tractul respirator și în special la nivelul plămânului, unde dezintegrarea radioactivă alfa va produce lezarea ADN-ului, ceea ce conduce în final la declanșarea cancerului (Cosma et al., 2009; Keith et al., 2012).

## **1.2. Reglementări legislative**

Datele individuale din 13 țări europene (Darby et al., 2005) au suportat ideea că generarea unei patologii oncologice pulmonare este proporțională cu creșterea expunerii la radon. În acest context, Consiliul Uniunii Europene a adoptat Directiva 2013/59/EURATOM unde se stipulează obligativitatea pentru fiecare stat membru de a institui un plan național de acțiune pentru reducerea cancerului pulmonar atribuit expunerii populației la radon, atât în locuințe și la locurile de muncă cât și clădirile cu acces public.

Directiva a fost transpusă și în legislația românească, unde nivelul de referință pentru media anuală a concentrației activității de radon în aerul din interiorul clădirilor (locuri de muncă, locuințe, clădiri cu acces public) este stabilit la  $300 \text{ Bq/m}^3$  (M.O. 752/3.978/136/2018). Trebuie menționat că nivelul de referință nu reprezintă o limită ci nivelul peste care trebuie evitată expunerea la radon pe o perioadă extinsă de timp. Se impune măsurarea, controlarea și

remediarea concentrațiilor de radon în toate clădirile publice și locurilor de muncă, cu recomandarea ca acest lucru să se realizeze și pentru clădirile rezidențiale.

În anul 2019 a fost emis Ordinul Președintelui CNCAN (Comisia Națională pentru Controlul Activităților Nucleare) nr. 185/22.07.2019 care reglementează Metodologia pentru determinarea concentrației de radon în aerul din interior, care stipulează următoarele:

## **Capitolul 2: Metode și aparatură de măsurare a radonului**

### **2.1. Metode și aparatura folosite în teză pentru măsurarea radonului din aer**

În campaniile de măsurare a radonului din aerul din interiorul locuințelor a fost utilizată metoda pasivă, cu detectori de urme de tip CR-39, iar pentru dezvoltarea și citirea acestora s-a folosit ansamblul RadoSys 2000 (Elektronika, Budapesta, Ungaria) care constă într-o baie de dezvoltare și un microscop optic cu citire automată.

#### **2.1.1. Metoda pasivă – tehnica detectării de urme**

Măsurarea radonului cu ajutorul detectorilor de urme este cea mai viabilă și mai des întâlnită tehnică de măsurare a radonului în aer din Europa (Cinelli et al., 2019). Polimerul din care este fabricat detectorul de urme CR-39, respectiv alidiglicolul, este sensibil la radiațiile din intervalul 0,2-20 MeV, care duc la ruperea lanțurilor de molecule și la apariția urmelor de traversare. Pentru ca aceste urme să poată fi citite și interpretate pentru a calcula conținutul (mediu) de radon, se procedează la dezvoltarea chimică a detectorilor CR-39.

Procesul de dezvoltare începe cu pregătirea detectorilor, care se așează pe un diapozitiv de plastic. Deoarece se manipulează substanțe chimice periculoase, toate etapele se desfășoară în nișe chimice cu exhaustare. Prepararea soluției are loc într-o unitate de dezvoltare de tipul RB4 (RB4 Etching Unit). Patru litri de apă distilată sunt încălziți până la temperatura de 90 °C, după care se adaugă treptat 1 kg de hidroxid de sodiu (NaOH, concentrație 99,98 %, Merk KgaA, Germania). Apoi diapozitivele cu detectori sunt inserate într-un carusel, în lungul unor fante și apoi introduși în soluția preparată, având grijă ca temperatura acesteia să nu fie mai mare de 92 °C. Diapozitivele sunt rotite automat în soluție, la o temperatură constantă de 90 ± 2 °C, timp de 4 ore și 30 de minute. Acest proces se numește gravare chimică și are scopul de a mări urmele de pe detectori până la dimensiuni ușor observabile la microscop. După finalizarea procesului de dezvoltare, soluția de hidroxid este evacuată în recipiente speciale de depozitare și se începe procesul de neutralizare. Se adaugă 5 litri de soluție de HCl cu

concentrația de 1 %, în care detectorii sunt spălați timp de 20 de minute. La finalul celor 20 de minute soluția de HCl va fi colectată într-un recipient, în vederea reutilizării și înlocuită cu 5 litri de apă distilată în care diapozitivele vor fi clătite timp de încă 20 de minute. După finalizarea procesului de neutralizare, caruselul cu diapozitivele pe care sunt așezați detectorii va fi extras din baia de dezvoltare și lăsat să se usuce câteva ore la temperatura camerei. Odată uscate diapozitivele, detectorii sunt șterși cu alcool izopropilic și introduși în microscopul optic cu citire automată. Microscopul Radometer 2000 produs de RadoSys Ltd. (Ungaria) este un microscop de tip scanner, autofocalizant, care are capacitatea de a contoriza numărul de urme produse de radiația alfa, respectiv densitatea de urme pe o suprafață de 50 de mm<sup>2</sup>.

Concentrația medie de radon se calculează pe baza densității urmelor, folosind formula (Dinu, 2009; Cucuș (Dinu) et al., 2012):

$$C_{Rn} = \frac{\rho \times Fc}{t}$$

Unde:

$C_{Rn}$  - concentrația de radon calculată (Bq/m<sup>3</sup>),  $\rho$  – densitatea de urme măsurată (urme/mm<sup>2</sup>),  
 $Fc$  - factorul de calibrare (kBq/h/m<sup>3</sup>)/(urme/mm<sup>2</sup>),  $t$  – timpul de expunere (h).

În scopul reducerii erorilor de măsurare și pentru a verifica precizia sistemului RadoSys 2000, laboratorul LiRaCC a participat periodic la exerciții internaționale de intercomparare cu laboratoare validate internațional.

### **2.1.2. Intercompararea rezultatelor obținute prin metoda pasivă**

În ultimii 7 ani, metoda de măsurare pasivă, cu detectori de tip CR-39, a fost testată și validată prin participarea la 6 exerciții internaționale de intercomparare a rezultatelor. Patru dintre acestea au fost efectuate de laboratorul BFS (Bundesamt für Strahlenschutz, Germania), care este acreditat de către organismul german de acreditare (Deutsche Akkreditierungsstelle) pentru calibrarea dispozitivelor care măsoară concentrația de activitate a radonului și ai produșilor de dezintegrare ai acestuia în aer. Toate detaliile cu privire la procedură și la rezultatele obținute în urma participării la intercompararea organizată de BFS au fost publicate în rapoarte de intercomparare de către Foerster et al. (2016, 2019), Friedrich et al. (2019) precum și în rapoarte de analiză..

Pentru anii 2015, 2019 și 2020 nu s-a înregistrat nicio abatere de la limitele propuse, nivelul de acuratețe al măsurătorilor fiind mai mult decât satisfăcător. În ceea ce privește

intercompararea din anul 2018, datele evidențiază 3 abateri, dintre care două sunt semnificative, fiind înregistrate pentru grupul 1 (203 kBqh/m<sup>3</sup>) și grupul 4 (1676 kBqh/m<sup>3</sup>). Una dintre aceste abateri se află imediat sub limita inferioară și a fost înregistrată în grupul 2 (221 kBqh/m<sup>3</sup>). În toate cazurile, valoarea măsurată a fost subestimată față de valoarea de referință. Cu excepția grupului 1 de la intercompararea din 2015, care a înregistrat o eroare relativă de 11,3 % și a grupului 1 de la intercompararea din 2019, unde eroarea relativă a fost calculată la 10,4 % – dar fără să existe abateri în cadrul acestora – toate celelalte grupuri de detectori, de la nivelul tuturor anilor, au prezentat erori relative mult sub 10 %, inclusiv grupurile 1, 2 și 4 unde au fost semnalate abaterile.

Având în vedere că aparatura folosită în studiu a fost calibrată periodic de către producător, respectând standardele internaționale de calitate, iar exercițiile internaționale de intercomparare ne arată că nu există abateri sistematice de la un an la altul, putem presupune că abaterile înregistrate la intercompararea din anul 2018 nu se datorează erorilor de măsurare ci mai degrabă erorilor aleatorii care țin de influența procesului de dezvoltare asupra detectorilor, date de diferențele în grosimea straturilor acestora (Leung et al., 2007) sau sunt rezultate din diferențele care țin de geometria de expunere a filmului în interiorul carcusei detectorului precum și a variabilității proprietății de difuzibilitate a detectorilor (Zhukovsky et al., 2010). Luând în calcul toate aceste aspecte, putem conchide că, în ceea ce privește metodologia de lucru a laboratorului LiRaCC, aceasta întrunește standardele internaționale pentru măsurătorile cu detectori de urme pasivi, iar măsurătorile efectuate pe toată durata studiului pot fi considerate a avea o acuratețe ridicată.

## **2.2. Metode și tehnici folosite în teză pentru măsurătorile de radon în sol**

Măsurarea concentrației activității radonului în aerul provenit din sol se efectuează, de obicei, prin detecția dezintegrărilor radioactive dintr-o probă de gaz din sol. Cea mai des folosită metodă în acest scop este metoda activă (Cinelli et al., 2019). Pentru acest studiu am folosit metoda activă cu două tehnici diferite de măsurare: detectorii cu scintilație și camerele de ionizare. Detalii cu privire la aparatură și protocolul folosit în detectarea radonului în gazul provenit din sol sunt descrise în cele ce urmează.

### **2.2.1. Tehnica camerei de scintilație**

Instrumentul de măsură LUK3P (Jiry Plch, Republica Cehă; vezi Plch, 2008) măsoară radonul din probe de aer, funcționând prin tehnica de scintilație cu celule Lucas. Partea principală a aparatului o reprezintă un tub fotomultiplicator care permite introducerea unei

capsule cilindrice căptușită la interior cu material scintilator (sulfat de zinc) și care împreună formează camera de detecție. Volumul celulei Lucas este de 145 ml, iar volumul total al camerei de detecție este de 150 ml. Camera de detecție este prevăzută cu un capac care permite o închidere ermetică a acesteia. Proba este introdusă în camera de detecție cu ajutorul unei seringi (Janet, 150 ml) prin crearea unei presiuni negative cu ajutorul unei pompe manuale de vid. Presiunea din camera de detecție poate fi modificată cu ajutorul unui robinet, nivelurile acesteia fiind monitorizate cu un barometru electronic conectat la un microprocesor, care controlează la rândul lui procesul de umplere al camerei. Pulsurile luminoase generate de particulele alfa la impactul cu stratul scintilator sunt captate de fotomultiplicator, amplificate și trecute printr-un diferențiator de amplitudine (care are rolul de a le diferenția de fondul de zgomot) și convertite mai apoi în impulsuri electrice ce sunt contorizate și transformate în concentrație de radon, tot cu ajutorul microprocesorului. La acest microprocesor sunt legate o memorie, un display și elemente de control care îl transformă într-un veritabil mini-computer.

Alimentarea componentelor electronice se face printr-o baterie Li-Ion reîncărcabilă, de 2,5 Ah iar conexiunea cu alte calculatoare, unde datele pot fi descărcate din memoria internă a aparatului, se realizează prin intermediul unui port RS232. Memoria internă a instrumentului permite înmagazinarea a 12573 de rezultate de măsurători, procesate din punct de vedere statistic (ex., calculul mediei și al deviației standard a rezultatelor) cu ajutorul unui program preinstalat (Plch, 2008). Fiecare măsurătoare folosește câte o celulă Lucas distinctă, care va fi lăsată să se decontamineze minim 3 ore înainte de a fi refolosită.

### **2.2.2. Tehnica celulelor de ionizare**

Sistemul RM-2 pentru măsurători de radon în sol a fost conceput special pentru măsurătorile în sol, de către compania Radon v.o.s. din Republica Cehă. Principiul de detecție îl reprezintă camera de ionizare operată de un curent electric. Sistemul este constituit dintr-un set de celule de ionizare (IK-250) cu volumul de 250 ml și un electrometru ERM-3 (cititor de voltaj).

Detectorul funcționează în modul nesaturat al unei caracteristici volt-amper, voltajul dintre electrozi și camera de ionizare fiind de 48V. Sensitivitatea curentului electric al detectorului la acest voltaj este de 85 % din curentul saturat. Curentul de ionizare direct este amplificat și mai apoi procesat electronic și statistic. Rezultatul este afișat pe display-ul aparatului și înregistrat automat în memoria acestuia. Timpul efectiv de măsurare este de 120 s care este împărțit în două tipuri de procesare. Primele 80 s sunt necesare pentru stabilizarea

sistemului, în următoarele 40 s efectuându-se calculul concentrației de radon pe baza analizei statistice a valorilor rezultate din măsurătorile curentului (conform manualului tehnic al sistemului RM-2).

### **2.2.3. Intercompararea rezultatelor obținute prin metoda activă**

Pentru a testa eficacitatea și acuratețea aparaturii folosite în acest studiu și nu în ultimul rând pentru a menține standardele de calitate cu privire la măsurătorile de radon în diferiți factori de mediu, s-a participat la un test metrologic de verificare a aparatelor active și pasive și două exerciții internaționale de intercomparare a măsurătorilor de radon în sol. Testul metrologic al detectorului de radon LUK3P au indicat o bună acuratețe de măsurare a aparatului.

#### **2.2.3.1. Exerciții de intercomparare ale măsurătorilor de radon în sol**

În septembrie 2018, respectiv septembrie 2021 am participat la măsurarea comparativă internațională a radonului din sol, pe siturile de referință ale radonului, Cetyne și Buk din Republica Cehă, administrate de Facultatea de Științe a Universității Charles din Praga. Scopul acestor exerciții a fost de a verifica atât acuratețea instrumentelor în vederea calibrării cât și procedura de măsurare a radonului în teren. Pentru ambele campanii s-a menținut același sistem de proiectare al măsurătorilor și s-a aplicat același protocol de măsurare, folosind același aparat

Măsurarea comparativă pentru anul 2018 arată că datele de radon sunt supraestimate (RIM, 2018), iar cea pentru anul 2021 arată că datele de radon corespund criteriului testului, acuratețea de măsurare fiind în concordanță cu standardele internaționale (RIM, 2021).

## **2.3. Metode de evaluare a potențialului de radon din sol**

Potențialul de radon al unui sit se bazează pe relația dintre concentrația de radon și permeabilitatea solului. Astfel, permeabilitatea solului devine al doilea cel mai important parametru, după concentrație, pentru stabilirea potențialului de radon.

Permeabilitatea poate fi determinată prin măsurători directe, *in situ*, sau prin evaluarea granulometriei unei probe de sol. Dezavantajul celei din urmă metode este că nu ia în considerare alte variabile precum umiditatea și densitatea solului sau porozitatea efectivă. Astfel, permeabilitatea reală a solului în timpul determinării concentrației de radon poate fi determinată doar de măsurători *in situ*.

În proiectul de față s-au folosit două căi de determinare a permeabilității, una cu permeametrul Radon-Jok (Radon v.o.s. din Republica Cehă) și a doua cu dispozitivul Bottle-conceput și dezvoltat de către cercetătorii laboratorului LiRaCC (Papp, 2011). Ambele metode au fost testate și etalonate.

### 2.3.1. Metoda Neznal de determinare a potențialului de radon

Neznal et al. (2004) au propus un model de evaluare a riscului de radon din sol bazat pe măsurarea concentrației de radon și a permeabilității solului. În funcție de potențialul de radon, se pot identifica trei categorii de risc sau de indice de radon (RI). După cum se poate observa în diagrama din Figura 2, categoriile de risc sunt delimitate de o linie punctată și împărțite în scăzut, mediu și ridicat.

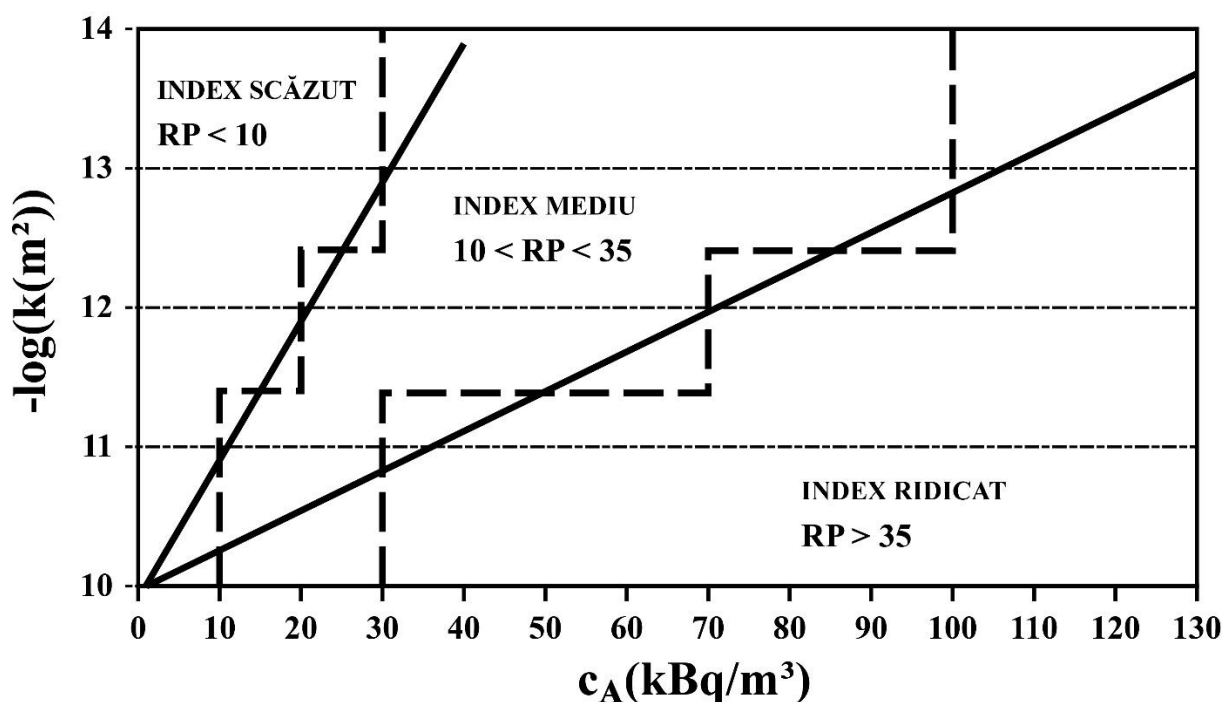


Figura 2. Potențialul și Indicele de radon Neznal (Neznal et al., 2004, redesenat).

Astfel, pe baza valorilor calculate pentru potențialul de radon, se stabilește indicele de risc al sit-ului ca fiind mic ( $RP < 10$ ), mediu ( $10 \leq RP < 35$ ) sau ridicat ( $RP \geq 35$ ) (Neznal et al., 2004).

### 2.3.2. Metoda Kemski de determinare a potențialului de radon

Kemski et al. (2004) au dezvoltat o metodă de evaluare a potențialului de radon geogenic și au propus o rețea de distribuție a valorilor împărțită în 7 clase de potențial (de la 0



la 6), în funcție de relația dintre concentrație și permeabilitate. Pe baza acestei metode s-a realizat ulterior harta de potențial de radon a Germaniei.

Pentru concentrația de radon din sol se folosesc 5 categorii ale nivelelor de concentrație: a) valori mai mici de 10 kBq/m<sup>3</sup>, b) valori între 10 și 30 kBq/m<sup>3</sup>, c) valori între 30 și 100 kBq/m<sup>3</sup>, d) valori între 100 și 500 kBq/m<sup>3</sup> și e) valori peste 500 kBq/m<sup>3</sup>. Permeabilitatea, de asemenea, este divizată în a) mică, b) medie și c) mare. În funcție de raportul dintre concentrația de radon și permeabilitate, va rezulta clasa de potențial de radon, unde 1 înseamnă cel mai scăzut potențial și 6 cel mai ridicat (Figura 3).

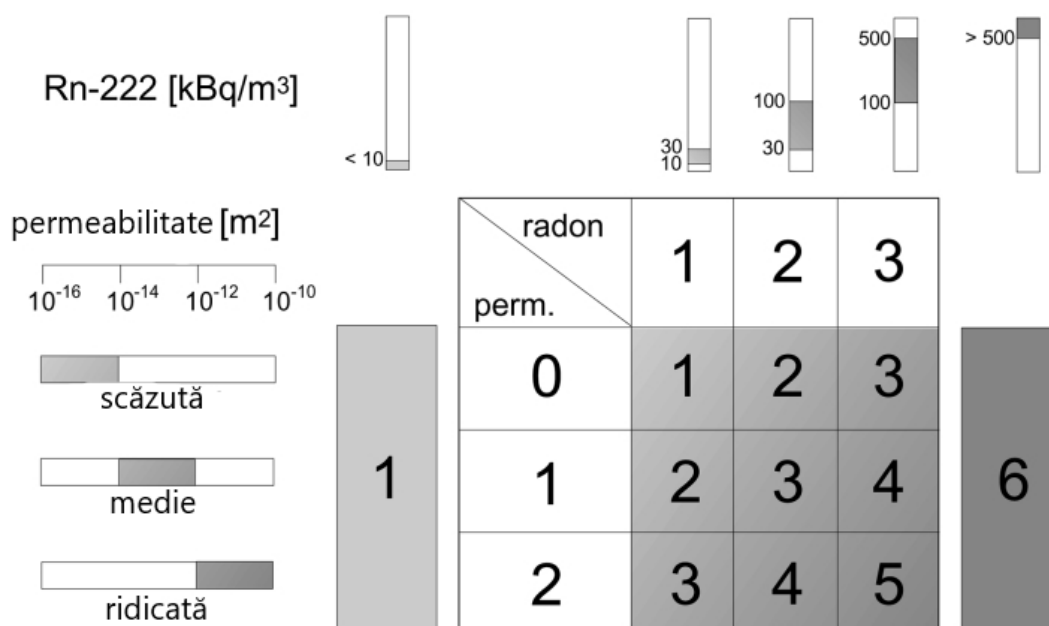


Figura 3. Categoriile de potențial de radon după Kemski et al. (2004).

### 2.3.3. Diagnosticul de radon al clădirilor

Diagnosticul a inclus un set de măsurători, standardizate conform ISO 11665-8:2019, pentru identificarea surselor de radon și a căilor de intrare în clădire, aspectele principale fiind descrise în continuare.

Măsurarea radiometrică a presupus cuantificarea radiației gama înconjurătoare precum și de la contactul cu solul și a materialelor de construcție. Astfel se pot identifica zone care prezintă doze mai mari, caracteristice prezenței <sup>226</sup>Ra și a produșilor acestuia de dezintegrare. Măsurarea debitului dozei gamma s-a efectuat cu aparatul Gamma Scout. Mai mult, probe de sol și de materiale de construcție au fost colectate și investigate prin spectrometrie gamma de

înalță rezoluție, pentru a se măsura activitatea  $^{226}\text{Ra}$ . Metoda este pe larg descrisă în lucrarea lui Cosma et al. (2013).

Pentru identificarea prezenței radonului în aerului din fisuri și conducte s-a folosit protocolul de măsurare „spot” (la fața locului), descris în Neznal et al. (2004). Probele de aer au fost colectate cu ajutorul unei seringi (Janet, 150 ml) cu ac, direct din fisurile vizibile sau conducte, înainte ca acestea să iasă și să se dilueze în aerul interior, și apoi au fost măsurate pentru stabilirea concentrației de activitate a radonului cu aparatele RTM-2 (Sarad GmbH, Germania) și Luk 3P (Jr Plch, Republica Cehă). Metoda de lucru este similară cu cea a măsurătorilor în sol.

Estimarea ratei de exalație a radonului de la suprafața podelelor a presupus măsurarea concentrației de activitate de radon prin acumularea acestuia într-o incintă cu volum și suprafață cunoscute. Pentru realizarea acestor măsurători s-au folosit aparatele Rad7 (DurrIDGE Company Inc., SUA), Alpha Guard (Saphymo GmbH, Germania) și RTM1688-2 (Sarad GmbH, Germania), metoda fiind pe larg descrisă în Neznal et al. (2004).

Pentru toate cele 100 de amplasamente s-a determinat potențialul de radon al solului din jurul clădirii prin metoda Neznal et al. (2004).

Alte date, cu privire la parametri precum umiditate, presiune, temperatură dar și a concentrației în substanțe organice volatile,  $\text{CO}_2$  și  $\text{CO}$  au fost colectate folosind sistemul ICA, dezvoltat de către laboratorul LiRaCC pentru proiectul SMART-RAD-EN (Tunyagi et al., 2020). De asemenea, cu ajutorul unor chestionare special concepute, au fost colectate date cu privire la detaliile arhitecturale și de construcție a clădirilor, precum tipul podelei și de tâmplărie ale ușilor și ferestrelor, existența șapei de beton, tipul de sistem de încălzire etc.

### **Capitolul 3: Etapele cercetării**

Cercetarea s-a desfășurat în mai multe etape, fiecare dintre acestea generând rezultate proprii, care reprezintă părți integrante în această teză. În acest capitol voi prezenta toate etapele cercetării, până la studiul de caz Cluj-Napoca, pe care îl voi descrie și analiza în capitolele ulterioare.

### 3.1. Distribuția radonului în sol și apă la nivel național

Prima etapă a studiului de față a fost inițiată în cadrul proiectului RAMARO (PN-II-PT-PCCA-2011-3.2-1064 – Harta de radon (rezidențial, geogenic, apă) pentru regiunile de Centru, Vest și Nord-Vest ale României) – în cadrul căruia au fost colectate date pentru a realiza prima hartă de radon din apă și sol din România. Scopul acestui demers a fost acela de a identifica zonele de prioritate la radon pe baza măsurătorilor din sol și ape. În acest studiu au fost incluse parțial și datele din proiectul SMART-RAD-EN. Studiul a fost publicat în Burghele et al. (2019), iar în cele ce urmează vor fi prezentate cele mai importante rezultate din această analiză.

Aria investigată a reprezentat aproximativ 42% din teritoriul României și acoperă Transilvania, Maramureșul, Crișana și Banatul, însumând 16 județe cu un total de 99.837 km<sup>2</sup>. Măsurătorile în sol s-au efectuat după protocolul Neznal et al. (2004) cu aparatul Luk3C (o versiune mai veche a aparatului Luk3P deja prezentat în capitolul 2, având aceleași specificații tehnice și protocoale de măsurare). Probele de apă au fost măsurate tot cu aparatul Luk3C, folosind sistemul Luk-VR după metoda prezentată în Cosma et al. (2008). Protocolul de măsurare a vizat divizarea teritoriului în celule de 10×10 km<sup>2</sup>, urmărind recomandările JRC (European Commission - Joint Research Centre) prezentate în Tollefsen et al. (2014). Numărul minim de măsurători per celulă a fost 1 iar maximum 17, cu mediana 3, aspect valabil atât pentru probele de sol cât și pentru cele de apă, deși cele din urmă au fost colectate în funcție de disponibilitate, din diferite puțuri, izvoare și alte surse de apă potabilă. Sumarul statisticii măsurătorilor de radon din probe de sol și apă este prezentat în Tabelul 1.

Tabelul 1. Sumarul statisticii pentru măsurătorile de radon în sol și apă.

Tipul măsurătorii	Nr.	Min.	Max.	A.M.	S.D.	G.M.	G.S.D.
Rn în sol (kBq/m <sup>3</sup> )	2564	0,2	179	29,3	17,4	24,5	1,9
Rn în apă (Bq/l)	2452	0,3	352	9,8	16,9	6,2	2,7

AM - media aritmetică; SD - deviația standard; GM - media geometrică; GSD - deviația standard geometrică

Din punct de vedere geologic, aria studiată cuprinde o varietate de depozite magmatice, metamorfice și sedimentare, diferite ca vârstă și care sunt constituite ale unor ansamble structurale majore (Figura 4). Cel mai important ansamblu structural este reprezentat de regiunile cutate care formează ramurile Carpaților ce delimitează Depresiunea Pannonică de cea a Transilvaniei, circumscriind-o pe cea din urmă (Săndulescu, 1984; Mutihac, 1990).

Unitățile carpatice reprezentative pentru zona studiată sunt reprezentate parțial de Carpații Orientali și cei Meridionali, Munții Apuseni fiind acoperiți în tot ansamblul lor. De asemenea, depresiunile interne și zonele adiacente au fost acoperite în totalitate.

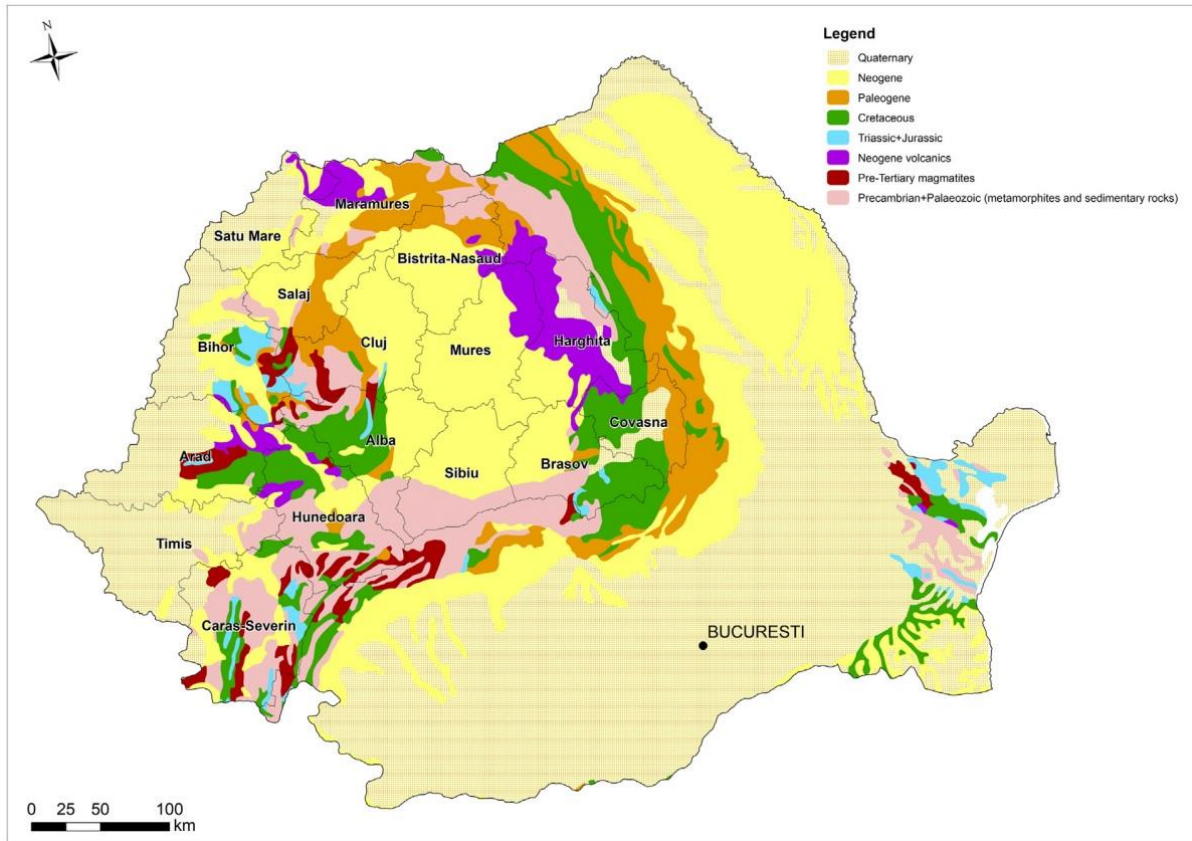


Figura 4. Harta geologică simplificată a județelor studiate (după Săndulescu et al., 1978; din Burghel et al., 2019).

Analiza statistică a datelor a fost efectuată folosind programul GraphPad Prism 5.0., iar distribuția statistică a datelor a fost evaluată cu testul Shapiro-Wilk. De asemenea, cu testul neparametric Kruskal-Wallis au fost comparate medianele aferente eșantioanelor măsurate, la care s-a adăugat analiza post-hoc Dunn. Coeficientul de corelație Pearson a fost calculat pentru datele log-transformate, în vederea stabilirii intensității legăturii dintre variabilele măsurate (Tabelul 2). Nivelul de semnificație alfa a fost stabilit la 0.05 iar hărțile de distribuție a radonului în sol și apă au fost realizate în programul ArcGis 9 (Figurile 5 și 6).

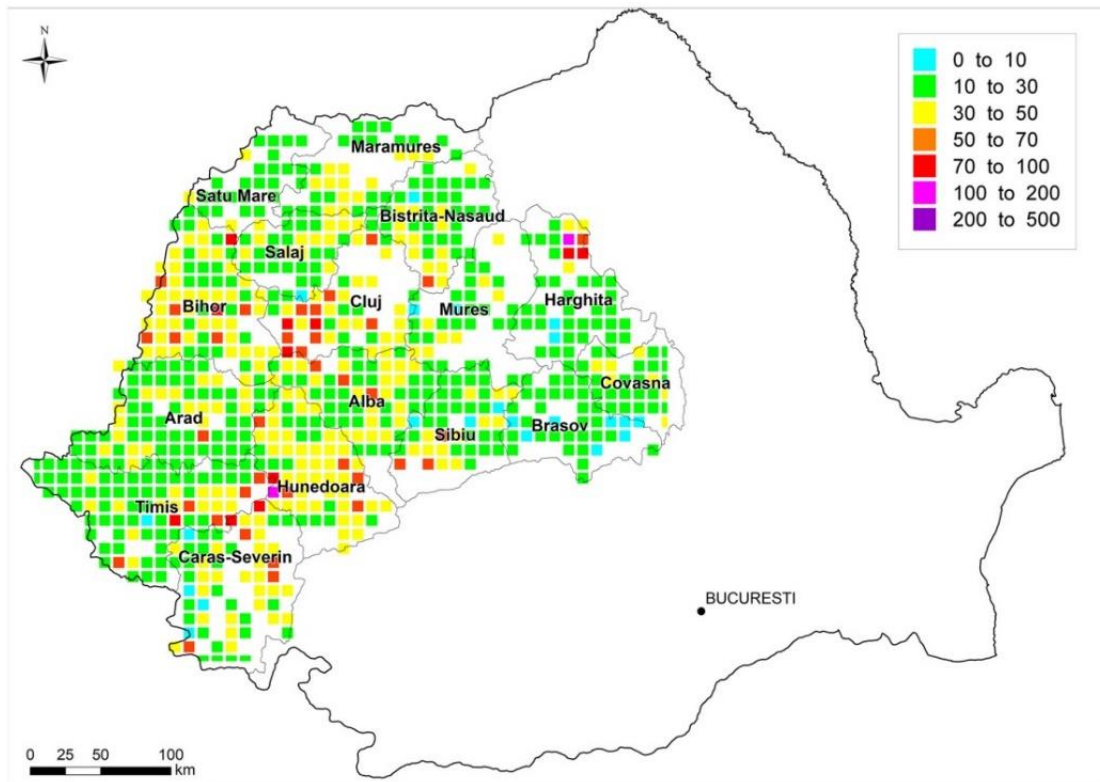


Figura 5. Media aritmetică a valorilor concentrațiilor de radon în probele de aer din sol pentru celule de 10×10 km (din Burghele et al., 2019).

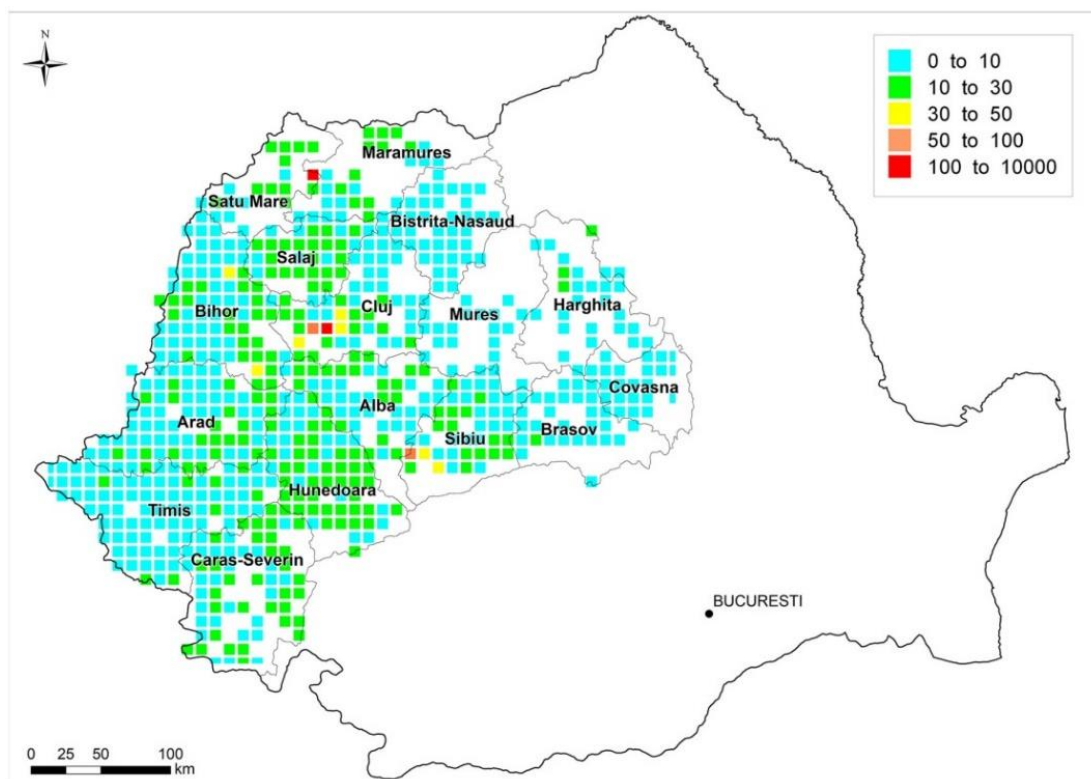


Figura 6. Media aritmetică a valorilor concentrațiilor de radon în probele de apă pentru celule de 10×10 km (din Burghele et al., 2019).

Tabelul 2. Coeficientul de corelație Pearson a datelor log-transformate ale măsurătorilor de radon în sol și apă (din Burghel et al., 2019).

Tipul analizei	Toate datele	Toate celulele	≥ 2 măsurători/celulă	≥ 2 măsurători/celulă	≥ 2 măsurători/celulă	≥ 2 măsurători/celulă
$r_{sd-ap\acute{a}}$	0,16	0,36	0,33	0,28	0,47	0,46
Nr. datelor	1702	648	495	351	85	45
p	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

În urma împărțirii în poligoane de câte  $10 \times 10 \text{ km}^2$ , s-a observat că 12% din 1111 celule rezultate corespund zonelor muntoase, cu o populație sporadică, motiv pentru care acestea nu au fost luate în studiu. Prin urmare, cele 2564 de măsurători în sol și 2452 de măsurători în apă au fost comasate în 761, respectiv 649 de celule. Media aritmetică a concentrației de radon măsurată în sol a fost de  $29,3 \text{ kBq/m}^3$ , cu limite cuprinse între 0,2 și  $179 \text{ kBq/m}^3$ , aceste valori fiind comparabile cu cele raportate pentru solurile europene (Beaubien et al., 2003; Al-Khateeb et al., 2017). Media geometrică a fost de  $24,5 \text{ kBq/m}^3$  și corespunde cu valorile raportate anterior în România de Cucuș et al. (2017) și Papp et al. (2017). Prin aplicarea testului Shapiro-Wilk, nu a fost confirmată distribuția normală a datelor log-transformate, aspect care poate fi datorat parametrilor atmosferici care pot influența activitatea radonului în sol. S-a obținut, în schimb, o corelație negativă bună între concentrația radonului în sol și presiunea atmosferică. Prin aplicarea testului neparametric Kuskral-Wallis și a analizei post-hoc Dunn, a fost obținută o diferență semnificativă statistic între mediana valorilor măsurătorilor în sol efectuate în luna august și restul lunilor, precum și iunie vs. ianuarie și iunie vs. octombrie. De asemenea, o diferență semnificativă statistic a fost observată între sezonul cald și cel rece, activitatea radonului în sol fiind semnificativ mai mică în lunile de vară, față de lunile de iarnă. Acest lucru se poate datora umidității scăzute a solului din timpul verii, care va conduce la o difuzibilitate redusă a radonului.

Urmărind anumite modele geologice, se poate observa că valorile relativ scăzute ale radonului din sol sunt caracteristice pentru Depresiunea Transilvaniei și o bună parte din cea Pannonică, valori intermediare fiind măsurate în Câmpia de Vest, în județul Bihor. Valorile ridicate sunt caracteristice zonelor de metamorfic ale Unităților Carpatice, în special în aria Central-Carpatică și marginea ariei Pannonice dar și din Carpații Occidentali, explicându-se astfel prin compoziția chimică a rocilor care le compun.

Majoritatea probelor de apă au fost colectate din fântâni, cu o pondere de 69%, urmate de apă de robinet cu o pondere de 27%, doar 4% din probe fiind prelevate din ape de izvor. Media aritmetică a activității concentrației de radon în toate probele de apă a fost de doar 9,8 Bq/l, de 10 ori mai puțin decât valoarea limită de 100 Bq/l recomandată [EU, 2001; WHO, 2011; Law nr. 301/2015 establishing the requirements for protection of human health as regards radioactive substances in drinking water (published: 2015-12-07)]. Valorile mici ale concentrației activității de radon în apă, de până la 10 Bq/l, sunt caracteristice pentru zonele cu depozite predominant detritice sedimentare, de vârstă neogenă, ale Bazinului Transilvaniei și marginii vestice a Munților Apuseni. Valori foarte mici au fost înregistrate de asemenea și pentru Câmpia Banatului. Valori medii ale concentrațiilor de radon, de 10-30 Bq/l au fost măsurate cu preponderență în partea vestică a Carpaților Meridionali, dar și în partea centrală a acestora. Valorile mari au fost măsurate în depozite cuaternare din Câmpia de Vest, aspect care poate fi pus pe seama ariei sursă pentru aceste depozite, mai precis partea vestică a Munților Apuseni. Mai mult, cele mai mari concentrații de radon în apă au fost caracteristice zonelor mezometamorfice și granitice ale Munților Apuseni, unde s-au înregistrat valori preponderent între 30 Bq/l și 100 Bq/l, însă depășind de multe ori valoarea de 100 Bq/l.

Coeficientul de corelație Pearson calculat pentru punctele de probare sol și apă apropiate una de cealaltă a indicat o corelație slabă ( $r = 0,16$ ), însă după ce toate datele au fost centralizate la nivel de celulă și au fost identificate 648 de celule cu cel puțin un punct de colectare comun pentru probe de aer din sol și apă, acesta a sugerat o corelație moderată între aceste două tipuri de măsurători ( $r = 0,36$ ). După cum se poate observa în Tabelul 2, coeficientul de corelație prezintă o creștere a gradului de asociere dintre cele două variabile, odată cu creșterea numărului de valori măsurate per celulă, însă acesta rămâne moderat chiar și atunci când se depășesc 6 măsurători per celulă ( $r = 0,47$ ).

În concluzie, în ceea ce privește apa de băut din România, cel puțin la nivelul studiului de față, aceasta nu prezintă o contribuție semnificativă la concentrația de radon din interior, sau o problemă semnificativă din punct de vedere radiobiologic. În ceea ce privește măsurătorile în sol însă, acestea pot constitui o explicație pentru radonul măsurat în interiorul locuințelor, îndeosebi sub aspect geologic, chiar dacă s-a demonstrat ulterior, în studiile prezentate în continuare, că variația concentrației de radon din interior este dependentă și de alți factori.

### 3.2. Contribuția radonului geogenic la concentrația de radon din interior

După dezvoltarea și citirea primului set de detectori (campania ianuarie-iulie 2017) datele rezultate pentru Cluj-Napoca au fost analizate și interpretate, în vederea stabilirii următoarelor etape de cercetare. Aceste rezultate au fost publicate în Florică et al. (2017), iar în cele ce urmează vor fi prezentate aspectele cele mai relevante. În ceea ce privește distribuția datelor pentru Cluj-Napoca, după prima campanie de măsurare a radonului în interiorul locuințelor selectate, acestea prezentau o distribuție log-normală, aspect care a fost confirmat prin aplicarea testului statistic D'Agostino-Pearson ( $p > 0,05$ ). Din totalul de 256 de case selectate, 43 au prezentat valori ale concentrației de radon mai mari de  $300 \text{ Bq/m}^3$ . După aplicarea unui factor de corecție sezonier, pentru a putea estima o medie anuală, numărul locuințelor cu valori de radon peste  $300 \text{ Bq/m}^3$  a crescut la 52. Astfel, după prima campanie de măsurători, rezultatele au indicat că 17% din casele investigate în zona metropolitană a municipiului Cluj-Napoca prezentau valori peste nivelul de referință european de  $300 \text{ Bq/m}^3$  (Directiva 2013/59/EURATOM). Totodată, 20% din casele investigate au prezentat valori mai mari de  $250 \text{ Bq/m}^3$ . Concentrația minimă și maximă măsurată a fost de  $21 \text{ Bq/m}^3$ , respectiv  $720 \text{ Bq/m}^3$ . Media aritmetică pentru toate cele 256 de case a fost de  $139 \text{ Bq/m}^3$ , iar media geometrică a fost calculată la  $95 \text{ Bq/m}^3$ . Astfel, valoarea medie a concentrației de radon măsurată în această primă campanie a fost mai mare decât valoarea medie a concentrației în interior, de  $98 \text{ Bq/m}^3$ , raportată pentru Europa, fiind comparabilă cu valorile de  $140\text{-}160 \text{ Bq/m}^3$  măsurate de Republica Cehă și Estonia. Cu ajutorul acestor date s-a realizat o hartă preliminară pentru Cluj-Napoca, unde rezultatele măsurătorilor au fost comasate în celule de  $1 \times 1 \text{ km}$ , după modelul folosit la realizarea Atlasului European de Radon (Cinelli et al., 2019). Minimul măsurătorilor per celulă este de 1 iar maximul de 13, media acestora fiind de 2 per celulă. Astfel, numărul total de celule investigate a fost de 85, iar procentajul celulelor unde media aritmetică a depășit  $300 \text{ Bq/m}^3$  a fost de 8 % (Figura 7).

Această primă campanie a proiectat o viziune destul de clară asupra concentrațiilor de radon din interior de la nivelul ariei metropolitane a municipiului Cluj-Napoca, indicând totodată faptul că geologia poate fi factorul de control determinant în legătură cu sursa acestora, întrucât a fost observată o tendință de distribuție a valorilor mari pentru depozitele cuaternare. În continuare s-au realizat o serie de investigații suplimentare pentru a confirma aceste rezultate.



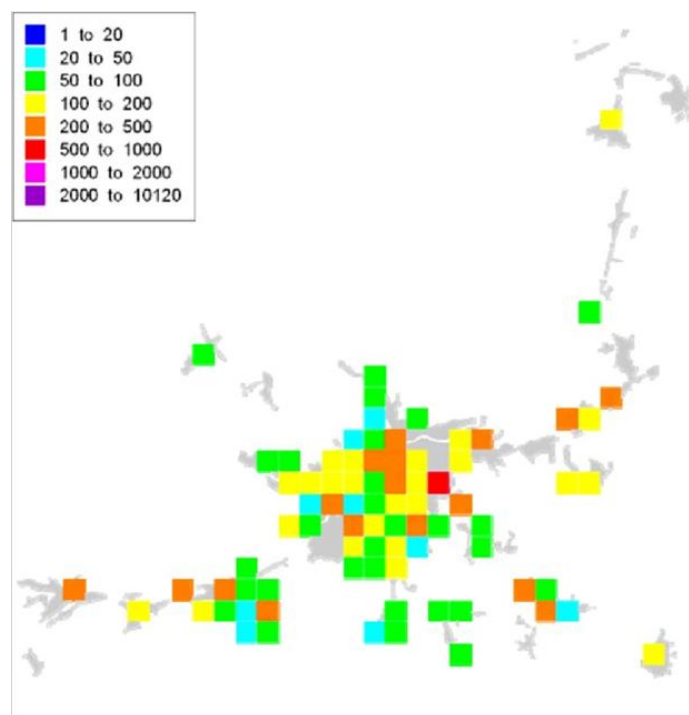


Figura 7. Harta radonului în interior pentru municipiul Cluj-Napoca după prima campanie de măsurători din proiectul SMART-RAD-EN (din Florică et al., 2017).

### 3.3. Căile de pătrundere a radonului în interior

În continuarea screening-ului cu detectori pasivi (cele două campanii a câte 6 luni fiecare), au fost realizate măsurători de diagnostic pentru 100 de case (din toate cele 5 aşezări urbane: Iași, București, Timișoara, Sibiu și Cluj-Napoca) ale căror valori ale concentrației de radon au depășit 250 Bq/m<sup>3</sup>. S-a urmărit identificarea căilor prin care radonul pătrunde în interior și nu în ultimul rând, care variabile cântăresc mai mult în acumularea și variația radonului în interior. Rezultatele acestei cercetări au fost publicate în Florică et al. (2020), iar în cele ce urmează vor fi redate detaliile semnificative.

#### 3.3.1. Interpretarea rezultatelor

Analiza statistică a datelor s-a realizat cu programul SPSS, versiunea 24 (SPSS Inc., SUA). Distribuția datelor a fost evaluată cu testul D'Agostino-Pearson iar pentru compararea variabilelor a fost folosit testul neparametric Mann-Whitney. Testul  $\chi^2$  (Chi-pătrat) a fost folosit pentru evaluarea gradului de asociere între variabilele calitative, iar pentru evaluarea relațiilor de asociere între parametrii investigați a fost calculat coeficientul de corelație Pearson. Pentru analiza multivariată, datele log-transformate ale concentrației de radon rezidențial au fost utilizate ca variabilă dependentă. S-a folosit, de asemenea, procedura de regresie în trepte unde doar factorii care au avut influență semnificativă statistic asupra variabilei dependente au fost

luați în considerare. Nivelul de semnificație statistic a fost stabilit la 0,05. În Tabelul 3 este prezentată statistica descriptivă pentru toți parametrii monitorizați în cele 100 de case.

Tabelul 3. Statistica descriptivă a parametrilor investigați în cele 100 de case (după Florică et al., 2020, cu modificări).

Parametru	Min.	Max.	Median	A.M.	S.D.	G.M.
Conc. Rn rezidențial (Bq/m <sup>3</sup> )	150	1221	309	356	176	325
Φ max (Bq/m <sup>2</sup> /h)	3	99	8	13	16	9
Q3 Rn_sol (kBq/m <sup>3</sup> )	6	97	34	39	20	34
RP	5	133	29	33	21	28
CO <sub>2</sub> (ppm)	432	3375	1083	1213	638	1078
RH (%)	16	70	42	42	10	41
T (C°)	13	31	21	22	3	22
Consum energie (kWh/m <sup>2</sup> )	102	500	210	216	63	208
<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	8	283	32	48	57	33

Φ<sub>max</sub> este valoarea maximă măsurată în exalație; Q<sub>3Rn</sub> este cvartila a treia a concentrației de radon măsurată; RP este potențialul de radon; RH reprezintă umiditatea; T este temperatura în grade Celsius.

Distribuția normală a datelor log-transformate aferente concentrației de radon rezidențial a fost confirmată prin aplicarea testului D'Agostino-Pearson ( $p > 0,05$ ). Media aritmetică și media geometrică a concentrațiilor de radon rezidențial este de 356 Bq/m<sup>3</sup>, respectiv 325 Bq/m<sup>3</sup>. Aceste valori ridicate sunt explicabile prin faptul că selecția celor 100 de case din studiul de față a avut ca principal criteriu o concentrație de radon superioară pragului de 250 Bq/m<sup>3</sup>.

Pentru 33 de case rata de exalație a fost sub limita de detecție, iar în restul caselor aceasta a prezentat variații ridicate, cu limite cuprinse între 10 Bq/m<sup>2</sup>/h și 358 Bq/m<sup>2</sup>/h și o medie aritmetică de 47 Bq/m<sup>2</sup>/h. În 4 din cele 6 case în care rata de exalație a fost superioară valorii de 100 Bq/m<sup>2</sup>/h, podeaua este amplasată direct pe pământ sau zgură, fără a exista șapă de beton.

Fisuri au fost identificate în 88 de case, cu o medie aritmetică de 6 fisuri per casă. Valoarea maximă de radon măsurată la nivelul fisurilor este de 27 kBq/m<sup>3</sup>, iar valoarea minimă este de 1 kBq/m<sup>3</sup>, coeficientul de variație fiind de 85%.

În ceea ce privește măsurătorile în sol, doar în cazul unei singure case acestea nu s-au putut realiza datorită prezenței apei în sol, la o adâncime de aproximativ 50 de cm. Pentru calculul potențialului de radon s-a luat în considerare percentila de 75% (Q3) a concentrației de radon din sol, valoarea calculată pentru Q3 fiind cuprinsă între 6 kBq/m<sup>3</sup> și 97 kBq/m<sup>3</sup>, cu o medie aritmetică de 39 kBq/m<sup>3</sup>. Potențialul de radon (RP) a indicat valori cuprinse între 5 și 133, cu o medie aritmetică de 33. Astfel, din totalul de 100 de case, 4 dintre acestea au prezentat

un indice de radon scăzut, 62 au avut un indice de radon mediu iar 33 au avut indice de radon ridicat.

Alți indicatori ai calității aerului de interior, monitorizați în acest studiu, au fost CO<sub>2</sub> și CO. Pentru concentrația de CO<sub>2</sub> au fost măsurate valori cuprinse între 432 ppm și 3375 ppm cu o medie geometrică de 1078 ppm. În schimb, monoxidul de carbon a fost identificat prin măsurători doar în 10 case, cel mai probabil datorită tipului de încălzire utilizat în timpul sezonului rece. Limitele au fost cuprinse între 0,1 ppm și 6 ppm iar concentrația medie fiind de 1,1 ppm.

Pentru analiza bivariată, sumarul corelațiilor statistice între parametrii luați în considerare este prezentat în Tabelul 4.

Tabelul 4. Corelații statistice determinate pentru parametrii relevanți; unde corelația este semnificativă la un nivel de 0.05\* și 0.01\*\* (din Florică et al., 2020, cu modificări).

Corelația Spearman pentru <sup>226</sup> Ra	Sol	0,35	-0,07	0,5	0,65**	n/a	n/a	n/a	n/a
	Materialul de construcție	0,008	0,55**	-0,17	-0,3	n/a	n/a	n/a	n/a
Variabila	Rn rezidențial	Rn rezidențial	Φ max	Q3 Rn sol	RP	CO <sub>2</sub>	Temp.	RH	Energie
Corelația Pearson	Rn rezidențial		0,05	-0,12	0,1	0,26	-0,11	0,30**	0,13
	Φ max			-0,1	0,14	-0,04	0,21	-0,1	-0,07
	Q3 Rn sol				0,33**	0,13	-0,15	0,13	0,02
	RP					0,06	0,19	0,1	0,04
	CO <sub>2</sub>						0,01	0,51**	0,29**
	Temp.							-0,51	-0,02
	RH								0,27**
	Energie								

Prin calcularea coeficientului de corelație Pearson s-a obținut o corelație acceptabilă între concentrația de radon rezidențial și concentrația de CO<sub>2</sub> ( $r = 0,26$ ,  $n = 97$ ,  $p = 0,01$ ), fapt care indică o slabă aerisire care conduce la acumularea CO<sub>2</sub> cât și a radonului. Nicio corelație semnificativă statistic nu a fost observată între concentrația de radon rezidențial și parametrii precum exalația, concentrația de radon din fisuri, concentrația de radon din sol, indicele și potențialul de radon. De asemenea, testul  $\chi^2$  a confirmat că nu există o dependență semnificativă statistic între concentrația de radon rezidențial și indicele de radon ( $p > 0,05$ ). Acest lucru semnifică că indicele de radon nu poate oferi indicii suficiente cu privire la nivelul de radon rezidențial și nu poate fi folosit ca surogat al măsurătorilor de radon din interior. S-a obținut o corelație acceptabilă între concentrația de radon rezidențial și umiditate ( $r = 0,3$ ,  $n = 97$ ,  $p < 0,01$ ) și o corelație inversă între temperatură și umiditate ( $r = -0,5$ ,  $n = 97$ ,  $p < 0,01$ ). De asemenea, o corelație acceptabilă a fost obținută între concentrația CO<sub>2</sub> și consumul

energetic ( $r = 0,3$ ,  $n = 92$ ,  $p < 0,01$ ). O corelație bună a fost obținută între potențialul de radon și conținutul în  $^{226}\text{Ra}$  al probelor de sol ( $r = 0,72$ ,  $n = 10$ ,  $p < 0,05$ ).

Prin aplicarea testului neparametric Mann-Whitney a fost obținută o diferență semnificativă statistic între medianele ratei de exalație a radonului în funcție de prezența șapei de beton, absența acesteia fiind responsabilă pentru o mediană semnificativ mai mare, de  $63 \text{ Bq/m}^2/\text{h}$  față de  $25 \text{ Bq/m}^2/\text{h}$ . De asemenea, o diferență semnificativă statistic a fost observată și pentru tipul de tavan, cel din lemn conducând la o rată de exalație de radon din podea semnificativ mai mare în comparație cu tavanul din beton, aspect ce poate fi pus pe seama efectului de horn rezultat din diferența de presiune dintre interior și exterior, care este amplificată de lipsa unui tavan etanș. Determinând coeficientul de corelație parțială dintre rata de exalație de radon și tipul tavanului, cu variabila de control reprezentată de prezența șapei de beton, s-a constatat o reducere a coeficientului de corelație de la  $r = 0,26$  ( $p = 0,03$ ) la  $r = 0,14$  ( $p > 0,05$ ), ceea ce semnifică că șapa de beton poate avea efect mediator față de impactul tipului de tavan asupra ratei de exalație. Pe de altă parte, o corelație ne semnificativă statistic s-a observat în ceea ce privește impactul tipului de tavan asupra concentrației de radon din interior ( $p > 0,05$ ). Pentru a investiga impactul tuturor parametrilor mășurați asupra valorii medii ale radonului din interior, s-a aplicat metoda regresiei liniare multivariate, de unde a rezultat că procentul de variabilitate a concentrațiilor de radon rezidențiale este explicat doar pentru 15%, unde principalii contributivi sunt prezența șapei de beton și umiditatea.

În concluzie, din datele analizate reiese că, pentru majoritatea amplasamentelor din studiu, subasamentul geologic poate oferi o explicație rezonabilă atât pentru valorile medii și mari înregistrate în măsurătorile din sol (indicele și potențialul de radon) cât și pentru valorile înregistrate în interior prin măsurători pasive (care depășesc în toate cazurile limita de  $250 \text{ Bq/m}^3$  pe an). Cu toate acestea, variația radonului rezidențial nu a putut fi corelată direct cu variația radonului din sol, acest aspect fiind influențat în special de factori care țin de caracteristicile de construcție ale caselor. Având în vedere că toate casele din studiu au prezentat valori ale concentrației de radon în interior care depășesc limita de  $250 \text{ Bq/m}^3$ , și că variația radonului în sol a fost destul de însemnată (datorită diferențelor geologice de la o zonă la alta și a neomogenității litologice), neputându-se face totuși o corelație directă cu variația radonului din interior, putem conchide că, alături de geologie, factorii care țin de caracteristicile de construcție și modul de folosință al caselor joacă un rol determinant în acumularea radonului în interior.

## **Capitolul 4: Studiu de caz – Cluj-Napoca**

Pentru a defini cu mai mare acuratețe care este rolul geologiei în problematica radonului, am restrâns aria de studiu la municipiul Cluj-Napoca și aria sa periurbană. În acest punct al cercetării s-a putut stabili că sursa radonului în interior, pentru toate casele participante la studiu, o reprezintă solul de sub construcție sau dimprejurul acesteia. Este binecunoscut faptul că solurile reflectă îndeaproape caracteristicile mineralogice ale rocilor parentale, peste care acestea se dezvoltă.

Datele cu privire la concentrația de radon din interior pentru 272 de case participante în proiectul SMART-RAD-EN, aferente municipiului Cluj-Napoca, au fost analizate sub aspectul influenței geologice și pedologice. De asemenea, am trasat trei traiecte longitudinale, de la vest la est, care au traversat majoritatea formațiunilor geologice și tipurilor de sol ale împrejurimilor municipiului, care au însumat 142 de măsurători de radon în sol. Datele de la 39 de măsurători în sol provin din etapa de diagnostic ale proiectului SMART-RAD-EN, când s-a stabilit potențialul de radon pentru fiecare casă participantă la studiu. Acestea din urmă au fost măsurate cu aparatul RM-2, cu metoda Neznal în 15 puncte, iar permeabilitatea a fost stabilită cu permeametrul Radon-Jok. Din totalul celor 15 puncte de măsurare, s-au ales aleatoriu 3 puncte ale căror date au fost folosite la trasarea traiectelor geo-pedologice. Fiecare din celelalte 103 de măsurători în sol au fost executate în 3 puncte (în capetele unei rețele triunghiulare echidistante cu laturile de 1 m), cu aparatul LUK 3P, iar permeabilitatea a fost stabilită cu permeametrul Bottle.

Cu ajutorul programului Q-Gis și a hărților geologică și pedologică (1:200.000), au fost atribuite caracteristicile geologice și pedologice pentru fiecare măsurătoare în parte. Baza de date a fost construită în Excel iar analiza statistică a fost realizată cu ajutorul programului IBM SPSS Statistics 20. Detaliile cu privire la geologia și pedologia ariei de studiu au fost sintetizate din bibliografia existentă.

### **4.1. Geologia și pedologia municipiului Cluj-Napoca și a ariei periurbane**

Din punct de vedere geologic, municipiul Cluj-Napoca se găsește în partea de NV a Bazinului Transilvaniei, la est de metamorfitele Munților Gilăului, în regiunea care, în literatura de specialitate, poartă denumirea de “aria Gilăului”, la nivelul distribuției faciesurilor sedimentare ale Paleogenului (Rusu, 1970). Regiunea este caracterizată printr-o diversitate a

formațiunilor geologice și a structurilor, întâlnindu-se roci metamorfice, magmatice și sedimentare, diferite ca vârstă și ca tip petrografic (Krézsek, 2006, și referințele aferente).

Se întâlnesc formațiuni de vârstă cretacic superioară dispuse deasupra rocilor metamorfice și eruptive, peste care sunt dispuse transgresiv discordant formațiuni paleogene și neogene, preponderent cu caracter detritic, carbonatic sau vulcanogen-sedimentar (Figura 8). Ele revin unor bazine sedimentare distincte ca roluri și evoluții, suprapuse.

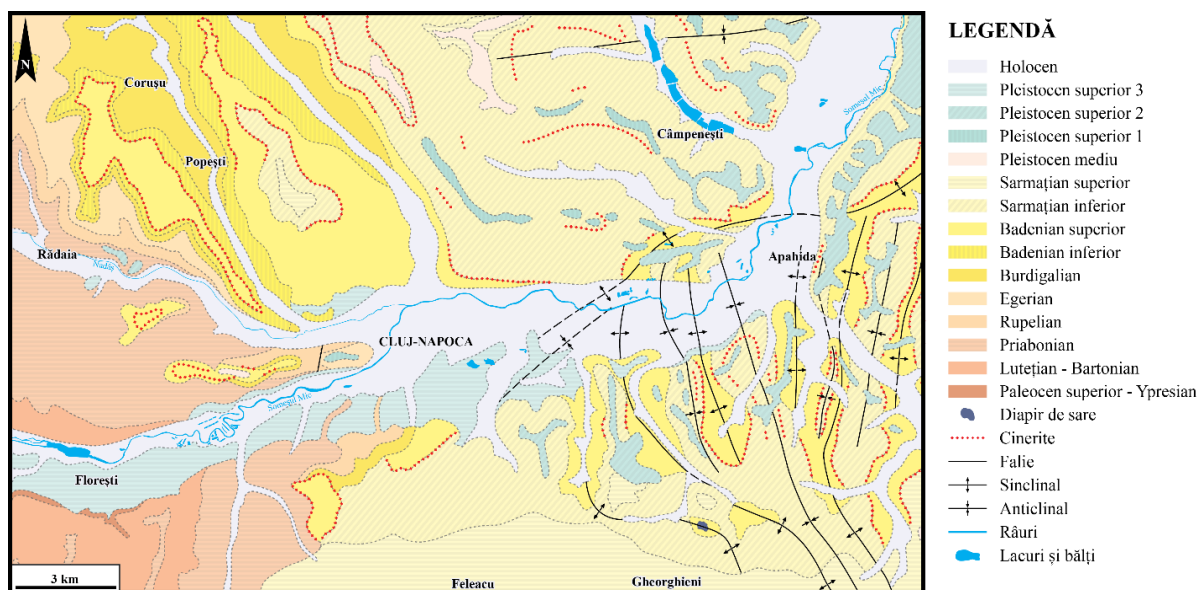


Figura 8. Harta geologică a regiunii Cluj-Napoca [modificată după Răileanu și Saulea (1967); hidrografia după maps.google.com].

#### 4.1.1. Stratigrafia

##### I. Subasamentul metamorfic și formațiunile sedimentare acoperitoare

Cele mai vechi roci sunt reprezentate de șisturi cristaline care s-au format în timpul Precambrianului, în regiunea în care s-a edificat subsecvent masivul Gilău. Este vorba în principal despre roci metamorfice de vârstă Paleozoic (Seria de Someș și Seria de Arada) (Săndulescu și Visarion, 1978; Săndulescu, 1988; = Litogrupul de Someș în Balintoni, 1997) peste care se dispune o cuvertură sedimentară de vârstă Triasic – Cretacic Superior (e.g., Burchfiel, 1976; Paraschiv, 1979; Krézsek și Bally, 2006). Întreg acest ansamblu revine Unității de Bihor (Săndulescu, 1984), cunoscută și drept "Autohtonul de Bihor" (Mutihac și Ionesi, 1974).

##### II. Cretacic Superior

Cele mai apropiate depozite care revin Cretacului terminal din relativa proximitate a municipiului Cluj-Napoca se află în Dacidele interne, fiind expuse la zi între Gilău și Someșul Rece, sau în alte arii (Stolnei, Sărății, Someșului Mic și Agârbiciu) (Mészáros și Clichici, 1976; Baci și Filipescu, 2002; Săsăran și Săsăran, 2003; Săsăran, 2011). Ele ilustrează procesele de tafrogenză petrecute în Apusenii de Nord, la finele Cretacului (Săndulescu, 1984). Sunt în discuție depozite cu aspect flișoid, de bazin tectonic îngust și adânc, dar care în primele etape de evoluție, sau subsecvent strict pe marginile de bazin, au permis dezvoltarea faciesului de tip Gosau, cu toată fauna exuberantă de moluște caracteristică acestui facies. Ele nu trebuie în niciun caz confundate cu depozitele flișoide ce se află mai la sud (zona Hășdate) și care revin Transilvanidelor, cu faciesurile semnalate de Săsăran și Săsăran (2003).

Activitatea magmatică de la finele Cretacului, asociată cu mișcările "laramice", determină punerea în loc a unor roci eruptive aparținătoare banatitelor (dacite, andezite și riolite) pe văile Căpușului, Someșului Rece, în zona Mănăstireni sau Băișoara-Săcel (Vlaicu-Tătărâm, 1963; Ștefan et al., 1985). Cele mai importante contribuții referitoare la geneza rocilor magmatice din zonă sunt cele ale lui Hanomolo și Hanomolo (1962), Vlaicu-Tătărâm (1963), Mureșan (1974; 1980), Lazăr și Întorsureanu (1982), Ștefan et al. (1985; 1988; 1992).

### *III. Paleogen*

Depozitele paleogene din zona de NV a Bazinului Transilvaniei formează umplutura unui bazin de foreland definit după tectogeneza "laramică" (Hosu, 1999; Fărcaș, 2011). Grosimea depozitelor variază între 500 m în partea de NV a Bazinului Transilvaniei și ajunge să depășească 1800 m spre nord, în arealul Jibou-Preluca, caracterizate fiind de alternanța pe verticală a depozitelor de facies continental cu cele de facies marin (e.g., Popescu, 1984; Hosu, 1999; Filipescu, 2011).

### *IV. Neogenul*

Seria depozitelor neogene începe cu punerea în loc a Formațiunii de Corușu (Acvitanian-Burdigalian inferior) în timpul unei transgresiuni. Aceasta este precedată de formațiunile de Chechiș și Hida, ambele reprezentând o regresiune, ultima dintre acestea fiind definită de un facies fluviatil-deltaic, cu care se și încheie sedimentarea din Miocenul Inferior din Bazinul Transilvaniei (Mészáros și Clichici, 1976; Filipescu, 2011). Miocenul Mediu începe cu o secvență de tufuri dacitice și marne, în Formațiunea de Dej, care este precedată de o secvență evaporitică ce include gipsuri și sare, reprezentate de Formațiunea de Ocna Dejului. O altă serie de tufuri (Volhian) poate fi observată în Formațiunea de Iris, care încheie trendul

depozițional salin. Formațiunea de Feleac este ultima din Sarmațianul Mediu și reprezintă o regresivitate (Mészáros and Clichici, 1976).

## V. Cuaternarul

Procesele de eroziune și acumulare specifice acestei epoci au dat naștere depozitelor fluviale de terasă și luncă, de vârstă Pleistocen și Holocen, alcătuite în principal de pietrișuri și nisipuri. Acestea sunt specifice văilor actuale și afluenților acestora.

### 4.1.2. Pedologia

Solul din zona periurbană a municipiului Cluj-Napoca, caracteristic zonelor agricole și forestiere, este diversificat și se află în strânsă legătură cu factori geomorfologici, geologici și de mediu, fiind influențat direct de relief, roca din care provine, climă și vegetație. Cu totul altfel stă situația în zona urbană, unde solurile au fost puternic antropizate, nemaiputând fi vorba de un sol propriu-zis (Figura 9).



Figura 9. Harta pedologică restrânsă pentru clasele de sol specifice arealului studiat [modificată după Florea și Asvadurov (1994); hidrografia după maps.google.com].

Studii efectuate în împrejurimile municipiului Cluj-Napoca au evidențiat prezența solurilor din Clasa Cernisoluri (reprezentată prin cernoziomuri cambice, cernoziomuri argiloiluviale, pseudorendzine, rendzine și faeoziom), Clasa Luvisoluri (prelivosoluri și luvosoluri), Clasa Hidrisoluri (reprezentată de stagnosoluri și gleisoluri), Clasa Salsodisoluri (reprezentată de solonceacuri și solonețuri), Clasa Protisoluri (reprezentată de aluviosoluri),



Clasa Antrisoluri (reprezentată de erodisoluri), Clasa Pelisoluri (reprezentată de vertosoluri) și Clasa Cambisoluri (reprezentată de eutricambosoluri) (Piciu et al., 2002) (Figura 9).

## 4.2. Sumarul statisticii

Cele 272 de măsurători ale concentrației radonului din interior sunt reprezentate prin media anuală, provenită din valorile rezultate din cele două campanii de măsurători din proiectul SMART-RAD-EN. În ceea ce privește măsurătorile de radon în sol, pe traiecte geologice, acestea sunt reprezentate prin media aritmetică a valorilor concentrațiilor de radon măsurate în cele 3 puncte, pentru fiecare locație în parte. De asemenea, având în vedere că permeabilitatea a fost stabilită pentru fiecare punct, aceasta este reprezentată în continuare fie ca medie aritmetică (Permeabilitate), geometrică (M.G. permeabilitate) sau mediană (Mediana permeabilitate) a celor 3 măsurători pentru fiecare locație. Mai mult, în ceea ce privește măsurătorile în sol, datele au fost analizate și sub aspectul potențialului și indicelui de radon Neznal (P.R. și R.I Neznal) și Kemski (R.I. Kemski), dar și a concentrației de radon exprimată prin media aritmetică (CRn în sol), geometrică (M.Geom. CRn) și mediană (Mediana CRn) acesteia, pentru fiecare locație. În plus, un potențial de radon (Potențial din M. Geom.) a fost calculat prin logaritizarea concentrației de radon exprimată prin media geometrică. Statistica descriptivă a măsurătorilor de radon din interior și din probe de sol este prezentată în Tabelul 5, unde AM este media aritmetică, SD este deviația standard, GM este media geometrică și Med. este mediana.

După cum se observă din Tabelul 5, în ceea ce privește media anuală a concentrației de radon din interior (CRn în interior), au fost măsurate minime de 10 Bq/m<sup>3</sup> și maxime de 1221 Bq/m<sup>3</sup>. Media aritmetică și media geometrică sunt 148, respectiv 102 Bq/m<sup>3</sup>, iar mediana este 91 Bq/m<sup>3</sup>.

Tabelul 5. Sumarul statisticii pentru măsurătorile de radon în interior și în sol pentru Cluj-Napoca.

Tipul măsurătorii	Nr. total	Min.	Max.	A.M.	S.D.	G.M	Med.
CRn în interior (kBq/m <sup>3</sup> )	272	10	1221	148	152	102	91
CRn în sol (kBq/m <sup>3</sup> )		5,2	77,7	25,8	13,3	22,7	24,2
M.Geom.CRn		4,3	77,6	25,2	13,1	22	23,4
Mediana CRn		5,5	78,6	25,5	13,6	22,3	23,4
Potențial din M.Geom.		2,2	108,8	18,8	14,4	15	16,6
Permeabilitate		1,58·10 <sup>-13</sup>	5,02·10 <sup>-11</sup>	9,21·10 <sup>-12</sup>	1,04·10 <sup>-11</sup>	4,75·10 <sup>-12</sup>	5,68·10 <sup>-12</sup>
M.G. permeabilitate		1,58·10 <sup>-13</sup>	4,83·10 <sup>-11</sup>	6,14·10 <sup>-12</sup>	7,64·10 <sup>-12</sup>	3,08·10 <sup>-12</sup>	3,93·10 <sup>-12</sup>
Mediană permeabilitate		1,57·10 <sup>-13</sup>	4,9·10 <sup>-11</sup>	7,43·10 <sup>-12</sup>	9,79·10 <sup>-12</sup>	3,03·10 <sup>-12</sup>	4,03·10 <sup>-12</sup>
R.P. Neznal		2	146				22
R.I. Neznal		Scăzut	Mediu	Ridicat			
		23	93	23			
P.R. Kemski		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4		
		10	18	64	59		

Din punct de vedere al concentrației de radon din sol, reprezentată prin media aritmetică a valorilor măsurate în 3 puncte de probare, s-au înregistrat valori minime de 4,3 kBq/m<sup>3</sup> și valori maxime de 77,7 kBq/m<sup>3</sup>, cu mediile aritmetică și geometrică de 25,8, respectiv 22,7 kBq/m<sup>3</sup>, mediana fiind trasată la valoarea de 24,2 kBq/m<sup>3</sup>. Concentrația de radon reprezentată prin media geometrică (M. Geom. CRn) a prezentat valori similare, având minime și maxime de 4,3 respectiv 77,6 kBq/m<sup>3</sup>, o medie aritmetică și geometrică de 25,2, respectiv 22 kBq/m<sup>3</sup> și mediana trasată la valoarea de 23,4 kBq/m<sup>3</sup>. Valori similare a prezentat și concentrația de radon din sol exprimată prin mediana valorilor măsurate în cele trei puncte, având minime și maxime de 5,5, respectiv 78,6 kBq/m<sup>3</sup>, cu medii aritmetică și geometrică de 25,5 respectiv 22,3 kBq/m<sup>3</sup> și mediana trasată în jurul valorii de 23,4 kBq/m<sup>3</sup>. În schimb, cum era de așteptat, concentrația de radon exprimată prin potențial din media geometrică a concentrației de radon, a prezentat minime și maxime de 2, respectiv 108,8 kBq/m<sup>3</sup>, cu media aritmetică și geometrică de 18,8, respectiv 15 kBq/m<sup>3</sup> și o mediană trasată la 16,6 kBq/m<sup>3</sup>.

Media permeabilității celor 3 puncte de probare pentru fiecare locație a prezentat valori minime de  $1,58 \cdot 10^{-13}$  și maxime de  $5,02 \cdot 10^{-11}$ , cu medie aritmetică și geometrică de  $9,21 \cdot 10^{-12}$ , respectiv  $4,75 \cdot 10^{-12}$  și o mediană de  $5,68 \cdot 10^{-12}$ .

Din punct de vedere al potențialului de radon Neznal, s-a înregistrat un potențial minim de 2 și unul maxim de 146, mediana fiind reprezentată de un potențial de 22. De asemenea, în ceea ce privește indicele de radon Neznal, s-au înregistrat 23 de valori cu indice scăzut, 93 cu indice mediu și 23 cu indice ridicat.

Din punct de vedere al potențialului de radon Kemski, 10 măsurători sunt clasate în nivelul 1 de risc, 18 în nivelul doi, 64 în nivelul 3 și 59 în nivelul 4.

## **Capitolul 5: Rezultate**

### **5.1. Analiza măsurătorilor de radon rezidențial, în raport cu geologia și pedologia zonei**

Cele 272 de măsurători de radon din interior reprezintă tot atâtea locații care se suprapun peste 12 tipuri de soluri care, pentru o mai bună evaluare din punct de vedere statistic, au fost împărțite în 9 clase: Clasa Protisoluri (Proti.), Clasa Cambisoluri (Camb.), Clasa Cernisoluri (Cern.), Clasa Hidrisoluri (Hidr.), Clasa Luvisoluri (Luv.), Clasa Pelisoluri (Peli.), Clasa Salsodisoluri (Sals.). Din punct de vedere geologic, cele 272 de locații se suprapun peste

12 depozite geologice identificate prin vârste, care au fost comasate la randul lor în epoci geologice din același considerent statistic. În Eocen (Eoc.) am cuprins Lutețian și Priabonian, în Oligocen (Olg.) a fost cuprins Kiscelian, Oligocen-Miocen (OlgMc.) cuprinde Egerian, Miocenul (Mc.) cuprinde Eggerian – Ottnangian, Badenian și Sarmățian, Pleistocen (Pl.) cuprinde etajele inferior, mediu și superior, iar Holocen (Hol.) etajul inferior și cel mediu. În Tabelul 6 și Figura 11 se se poate observa frecvența măsurătorilor pentru fiecare epocă geologică, respectiv clasă de sol.

Tabelul 6. Frecvența măsurătorilor de radon în interior specifică fiecărei perioade geologice și clasă de sol.

GEOLOGIE	Frecvență	Pondere (%)	PEDOLOGIE	Frecvență	Pondere (%)
Hol.	89	32,7	Camb.	9	3,3
Pl.	85	31,5	Cern.	125	46
Mc.	64	23,5	Hidr.	23	8,5
OlgMc.	10	3,7	Luv.	19	7
Olg.	17	6,3	Peli.	8	2,9
Eoc.	7	2,6	Proti.	85	31,3
			Sals.	3	1,1
Total	272				

Testul neparametric pentru eşantioane independente Kruskal-Wallis a fost aplicat pentru concentrația de radon rezidențial, în funcție de geologie, respectiv pedologie. Nivelul de semnificație a fost ales la 0,05. Pentru clasele de sol nu apare nicio diferență semnificativă statistic ( $p=0,054$ ). În schimb, pentru epocile geologice apare o diferență semnificativă statistic ( $p < 0,05$ ), mai precis între Oligocen și Holocen (Olg-Hol.) ( $p=0,025$ ), Oligocen și Pleistocen (Olg.-Pl.) ( $p=0,008$ ), Miocen și Holocen (Mc-Hol) ( $p=0,026$ ), Miocen și Pleistocen (Mc.-Pl.) ( $p=0,004$ ), după cum reiese din analiza post-hoc Dunn. În Figura 10 se poate analiza diagrama de comparație dintre perechile implicate.

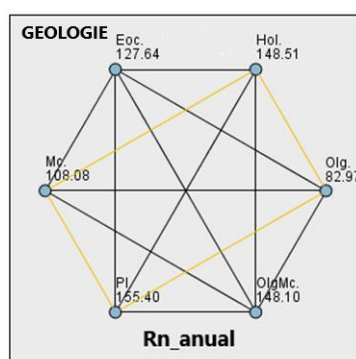


Figura 10. Diagrama de comparație între perechi pentru variabila geologie, în funcție de concentrația de radon anuală.

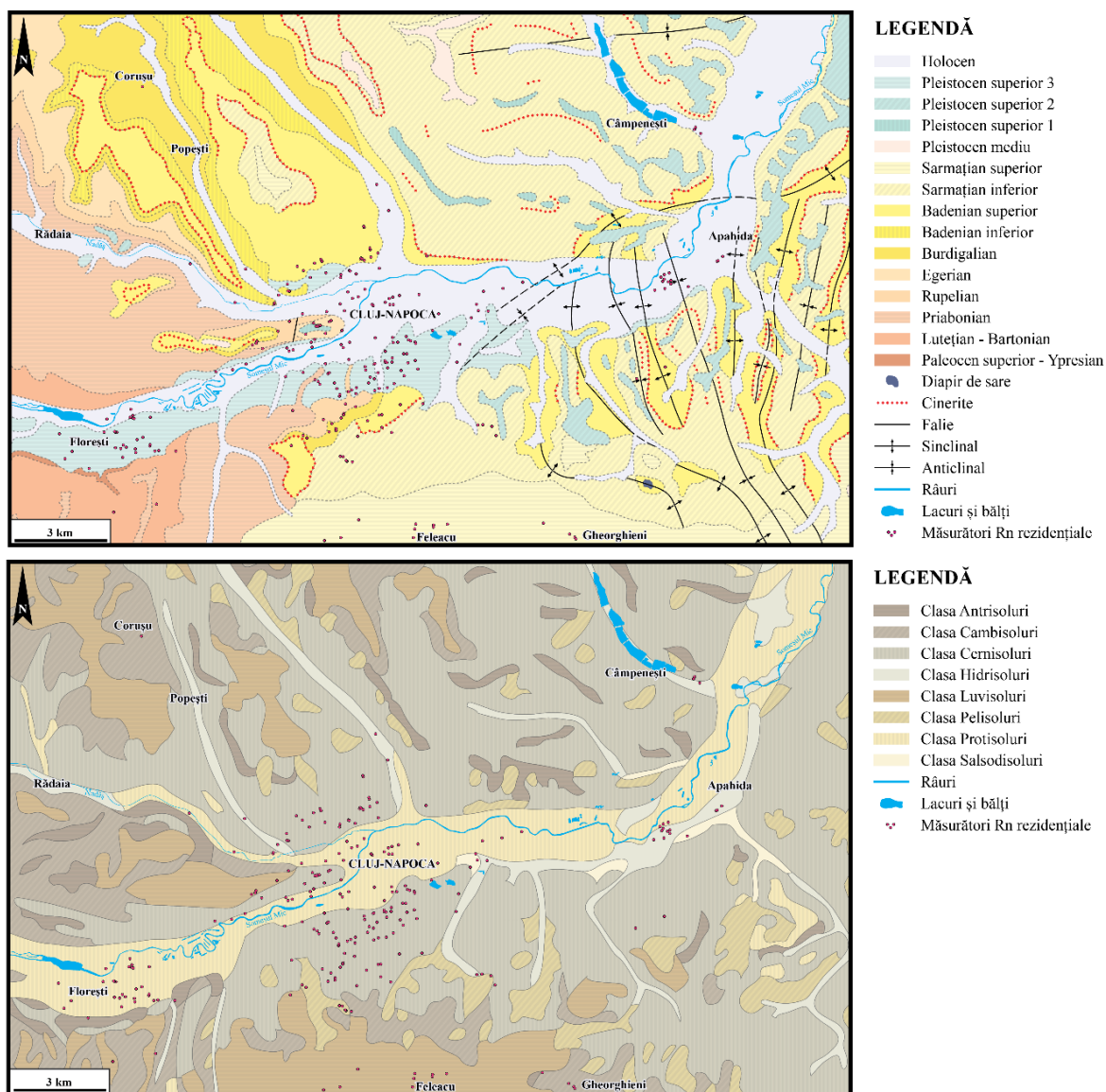


Figura 11. Distribuția punctelor de măsurători rezidențiale în funcție de geologie și pedologie [modificată după Răileanu și Saulea (1967), Florea și Asvadurov (1994); hidrografia după maps.google.com]

Pentru normalizarea distribuției datelor, valorile de radon rezidențial au fost logaritmizate. Prin aplicarea testului one-way Anova s-a urmărit interacțiunea dintre variabilele GEOLOGIE și PEDOLOGIE asupra radonului rezidențial exprimat prin logaritm din media anuală, care a indicat un impact semnificativ statistic pentru interacțiunea dintre epocile geologice și clasele de sol ( $p = 0,013$ ).

Prin calcularea coeficientului de corelație Pearson, s-a obținut o corelație acceptabilă între GEOLOGIE și PEDOLOGIE ( $r = -0,141$ ,  $p < 0,05$ ). În schimb nu s-a obținut nicio corelație semnificativă statistic între variabilele GEOLOGIE și PEDOLOGIE și concentrația de radon rezidențial ( $p > 0,05$ ).

## 5.2. Analiza măsurătorilor de radon din sol, în raport cu geologia și pedologia zonei

Și în cazul măsurătorilor în sol, împărțirea formațiunilor geologice și pedologice traversate s-a restrâns tot în epoci geologice și clase de sol. Prin cele trei traiecte geologice au fost interceptate, prin măsurători, toate epocile geologice și clasele de sol de la măsurătorile rezidențiale, în plus față de acestea a fost interceptată o clasă suplimentară reprezentată de Clasa Antrisoluri (Antr.). În Figura 12 se poate observa frecvența măsurătorilor pentru fiecare epocă geologică, respectiv clasă de sol.

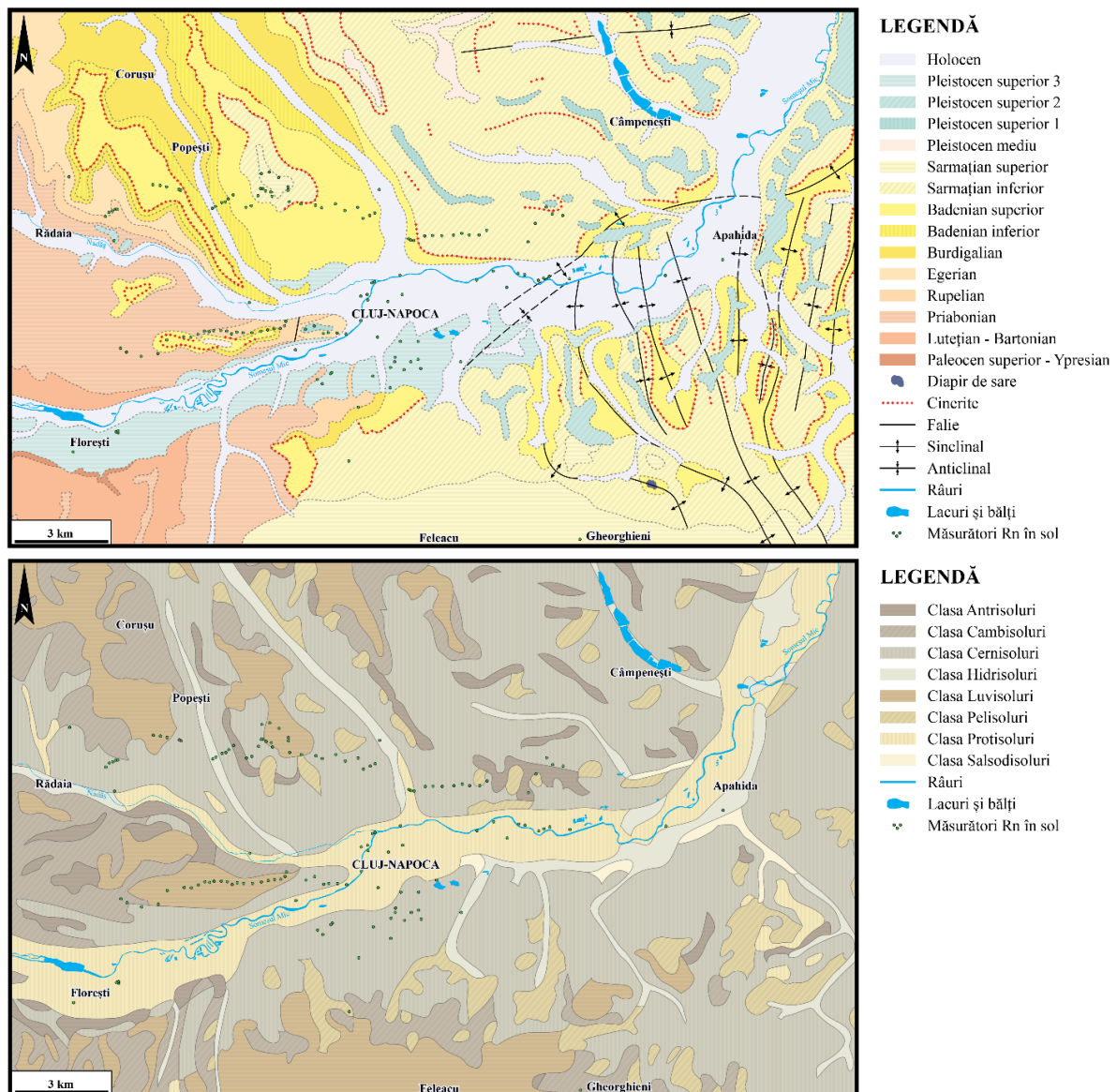


Figura 12. Distribuția punctelor de măsurători ale radonului în sol în funcție de geologie și pedologie [modificată după Răileanu și Saulea (1967), Florea și Asvadurov (1994); hidrografia după maps.google.com].

Majoritatea măsurătorilor în sol au fost efectuate acolo unde, subiacent, se află depozite miocene, cu o pondere de 39,4 %. Holocenul și Pleistocenul au o pondere de 19, respectiv 18.3 %, fiind urmate în ordinea frecvențelor de Oligocen (9,2 %), Eocen (8,5%) și Oligocen-Miocen (5,6%).

Din punct de vedere pedologic, Cernisolurile au cea mai mare frecvență în ce ce privește clasele de sol în care s-au efectuat măsurători de radon, având o pondere de 41,5 % urmate fiind, în ordinea frecvențelor, de Protisoluri și Luvisoluri cu o pondere de 23,2, respectiv 21,1 %. Mult mai puțin au fost interceptate prin măsurători de radon în sol Cambisolurile (6,3 %), Antrisolurile (2,8 %) și Hidrisolurile (2,8 %).

În ceea ce privește valorile brute ale concentrației de radon măsurate în gazul din sol, pe traiectele geologice, exprimate prin media aritmetică (M.A.), media geometrică (M.G.) și mediană (Med.) și în acest caz, precum în situația măsurătorilor rezidențiale, valorile maxime au fost înregistrate, în cadrul epocilor geologice, în Pleistocen, iar în cazul claselor de sol, de Cernisoluri, cu 77 kBq/m<sup>3</sup>. Din punct de vedere al valorilor minime și maxime, proporțiile se păstrează, în cea mai mare parte, pentru toate cele trei reprezentări, în ordinea descrescătoare a valorilor maxime urmând Oligocen-Miocenul. Holocenul prezintă maxime mai mari pentru reprezentările datelor sub forma mediei aritmetice și mediei geometrice decât Eocenul însă din punct de vedere al medianei, maxima pentru Eocen este mai mare decât a Holocenului.

Testul neparametric Kruskal-Wallis aplicat pentru a determina impactul variabilelor GEOLOGIE și PEDOLOGIE asupra concentrației de radon, exprimată prin media geometrică și mediană, a indicat diferențe semnificative statistic atât pentru epocile geologice cât și pentru clasele de sol ( $p < 0,05$ ).

Pentru radon în sol exprimat prin media geometrică s-au observat diferențe semnificative statistic pentru GEOLOGIE, pentru perechile de date Holocen și Pleistocen ( $p = 0,000$ ), Holocen și Oligocen-Miocen ( $p = 0,006$ ), Eocen și Pleistocen ( $p = 0,039$ ), respectiv Miocen și Pleistocen, iar pentru PEDOLOGIE doar o singură diferență semnificativă statistic, pentru perechea Protisoluri și Cernisoluri ( $p = 0,027$ ), după cum reiese din analiza post hoc Dunn.

Pentru radon în sol exprimat prin mediană s-au observat diferențe semnificative statistic pentru GEOLOGIE, iar analiza post hoc Dunn a evidențiat diferențe pentru perechile de date Holocen și Oligocen-Miocen ( $p = 0,009$ ). Holocen și Pleistocen ( $p = 0,000$ ), Miocen și Pleistocen ( $p = 0,006$ ), iar pentru GEOLOGIE doar o diferență semnificativă statistic pentru

Protisoluri și Cernisoluri ( $p = 0,028$ ). În Figura 13 se pot analiza diagramele de comparație dintre perechi.

Pentru normalizarea distribuției datelor, valorile concentrației de radon din sol, exprimate prin media geometrică, au fost logaritmate. Testele de normalitate Kolmogorov-Smirnov ( $p = 0,200$ ) și Shapiro-Wilk ( $p = 0,118$ ) au evidențiat că prin logaritmarele datelor s-a obținut o distribuție log-normală.

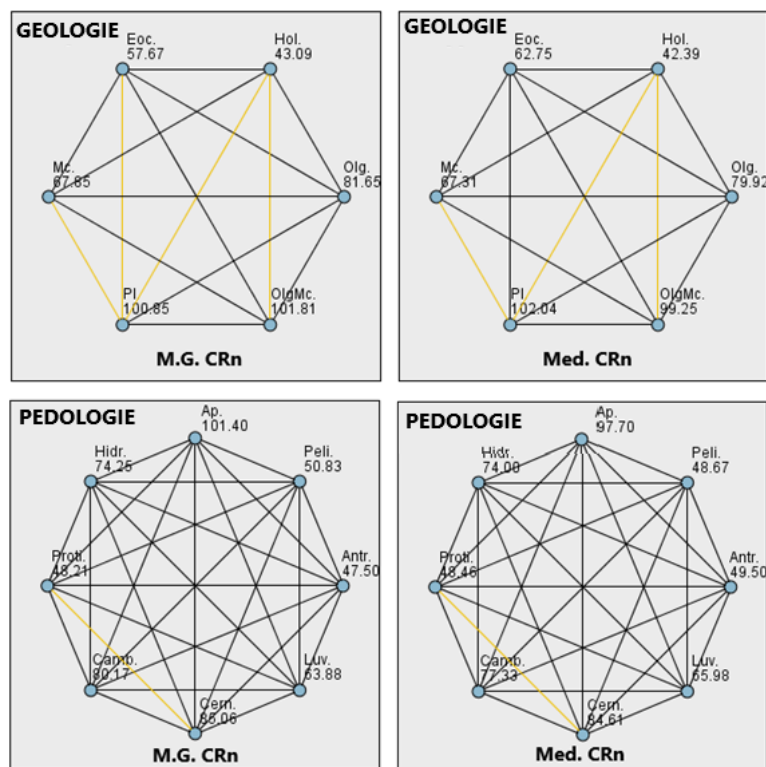


Figura 13. Diagramele de comparație dintre perechile de date ale fiecărei variabile (geologie și pedologie) în funcție de media geometrică a concentrației de radon (M.G.CRn) și mediana acesteia (Med.CRn).

Prin aplicarea testului parametric one-way ANOVA s-a urmărit impactul variabilelor GEOLOGIE și PEDOLOGIE asupra radonului din sol, exprimat prin logaritm din media geometrică, alături de interacțiunea dintre cele două variabile. Pentru variabilele GEOLOGIE și PEDOLOGIE s-a observat o diferență semnificativă statistic între epocile geologice ( $p < 0,05$ ) pe de o parte și între clasele de sol ( $p < 0,05$ ) pe de altă parte. Testul post-hoc Tukey a evidențiat o diferență semnificativă statistic pentru perechile de date Holocen și Pleistocen ( $p = 0,021$ ), Holocen și Oligocen-Miocen ( $p = 0,003$ ), Eocen și Pleistocen ( $p = 0,018$ ), Miocen și Pleistocen ( $p = 0,018$ ), respectiv Protisoluri și Cernisoluri ( $p = 0,050$ ).

Interacțiunea dintre GEOLOGIE și PEDOLOGIE are un impact semnificativ statistic pentru setul de date analizat ( $p = 0,043$ ), respectiv GEOLOGIE ( $p = 0,009$ ).

Dacă se introduc într-un model de regresie liniară, atunci media geometrică a concentrației de radon logaritmată va depinde de ambele variabile (GEOLOGIE și PEDOLOGIE). Coeficientul de determinare ajustat pentru acest model este de 0,16 (scăzut).

Permeabilitatea a fost calculată ca medie geometrică a valorilor măsurate în cele trei puncte din sol, dar pentru o mai bună evaluare descriptivă s-a optat pentru împărțirea valorilor acesteia în trei categorii de permeabilitate, după modelul Neznal et al. (2004). Astfel, cele trei categorii sunt reprezentate de permeabilitate scăzută ( $k < 4,0 \cdot 10^{-13} / \text{m}^2$ ), permeabilitate medie ( $4,0 \cdot 10^{-13} < k < 4,0 \cdot 10^{-12} / \text{m}^2$ ) și permeabilitate mare ( $k > 4,0 \cdot 10^{-12} / \text{m}^2$ ) (Tabelul 7).

Tabelul 7. tabelul de contingență pentru categoriile de permeabilitate și clasele de sol.

Categoriile permeabilitate	PEDOLOGIE							Total
	Antr.	Camb.	Cern.	Hidr.	Luv.	Peli.	Proti.	
Scăzută	1	2	3	0	5	1	1	13
Medie	0	4	32	3	13	1	7	60
Ridicată	3	3	24	1	12	1	25	69
Total	4	9	59	4	30	3	33	142

După cum se poate observa în tabelul de contingență 7, din totalul de 142 de măsurători în sol, un număr de 69 de măsurători au prezentat o valoare a permeabilității ridicate, însemnând o pondere de 48,59 %. Alte 60 de măsurători au prezentat o valoare medie a permeabilității, cu o pondere de 42,25 % din total. Doar 13 măsurători au prezentat valori scăzute ale permeabilității, ceea ce reprezintă doar 9,15 % din total.

Testul neparametric Kruskal-Wallis aplicat pentru a determina impactul variabilelor GEOLOGIE și PEDOLOGIE asupra permeabilității, exprimată prin media geometrică a permeabilității, a indicat o diferență semnificativă statistic pentru ambele variabile ( $p < 0,05$ ), pentru perechile Eocen și Holocen ( $p = 0,037$ ), respectiv Luvisoluri și Protisoluri ( $p = 0,003$ ) precum și Cernisoluri și Protisoluri ( $p = 0,013$ ), după cum a reieșit din analiza post hoc Dunn (Figura 14). Pentru clasele de permeabilitate nu s-a observat o diferență semnificativă statistic pentru niciuna din variabilele GEOLOGIE sau PEDOLOGIE ( $p > 0,05$ ). Pragul de semnificație  $\alpha$  a fost setat la 0,05, intervalul de încredere fiind de 95 %.

Alături de concentrația de radon și permeabilitate, relația dintre cele două a fost luată în considerare sub forma potențialului de radon. A fost calculat un potențial de radon după



metoda Neznal et al. (2004) adaptată pentru 3 puncte – la care am adăugat indicele de radon Neznal, altul după metoda lui Kemski et al. (2004) și un al treilea potențial calculat în funcție de media geometrică a concentrației de radon în raport cu media geometrică a permeabilității (Potențial din M.G.)

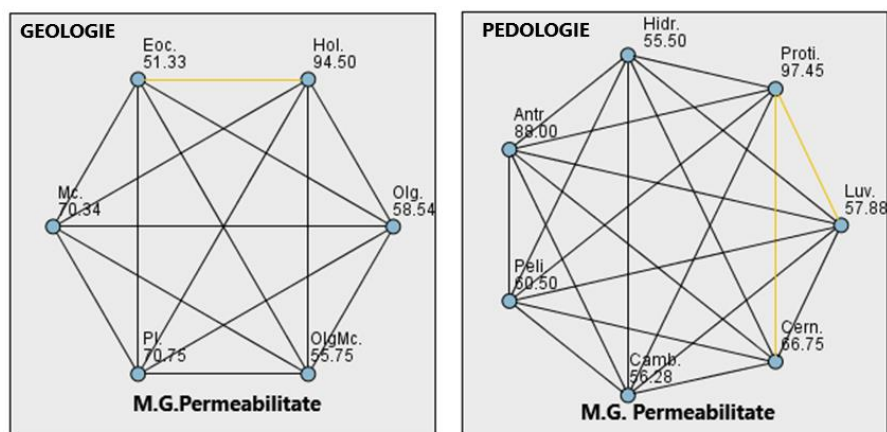


Figura 14. Diagramele de comparație între perechile de date ale fiecărei variabile (geologie și pedologie) în funcție de permeabilitate (M.G. Permeabilitate).

Testul neparametric Kruskal-Wallis aplicat pentru a determina impactul variabilelor GEOLOGIE și PEDOLOGIE asupra potențialului de radon Neznal, a indicat o diferență semnificativă statistic doar pentru variabila GEOLOGIE ( $p < 0,05$ ) – pentru perechile Holocen și Pleistocen ( $p = 0,001$ ), Eocen și Pleistocen ( $p = 0,027$ ) și Miocen și Pleistocen ( $p = 0,033$ ). La fel, pentru potențialul de radon din media geometrică se observă o diferență semnificativă statistic doar pentru variabila GEOLOGIE ( $p < 0,05$ ) – pentru perechile Eocen și Pleistocen ( $p = 0,007$ ), Holocen și Pleistocen ( $p = 0,041$ ), după cum reiese din analiza post-hoc Dunn (Figura 15). Pragul de semnificație  $\alpha$  a fost setat la 0,05, intervalul de confidență fiind de 95%.

Pentru normalizarea distribuției datelor, valorile potențialului din media geometrică precum și cele ale potențialului Neznal au fost logaritmizate. Testele de normalitate Kolmogorov-Smirnov și Shapiro-Wilk au evidențiat că prin logaritizarea datelor s-a obținut o distribuție log-normală pentru ambele seturi de date ( $p > 0.05$ ).

Prin aplicarea testului parametric one-way ANOVA s-a urmărit impactul variabilelor, separat pentru GEOLOGIE și PEDOLOGIE, asupra potențialului de radon Neznal logaritmat și a potențialului exprimat prin logaritm din media geometrică, pentru fiecare set de valori. Pentru variabilele GEOLOGIE și PEDOLOGIE s-a observat o diferență semnificativă statistic doar între epocile geologice ( $p < 0.05$ ). Testul post-hoc Tukey a evidențiat o diferență semnificativă statistic pentru perechile de date Holocen și Pleistocen ( $p = 0,000$ ), Holocen și

Oligocen-Miocen ( $p = 0,003$ ), Eocen și Pleistocen ( $p = 0,018$ ), pentru Eocen- Oligocen Miocen ( $p = 0,036$ ), Eocen și Pleistocen ( $p = 0,011$ ) în ceea ce privește potențialul de radon exprimat prin media geometrică, respectiv între perechile de date Pleistocen și Eocen ( $p = 0,023$ ), Pleistocen și Holocen ( $p = 0,001$ ), Pleistocen și Miocen ( $p = 0,031$ ), Holocen și Oligocen-Miocen ( $p = 0,026$ ) în ceea ce privește potențialul de radon Neznal.

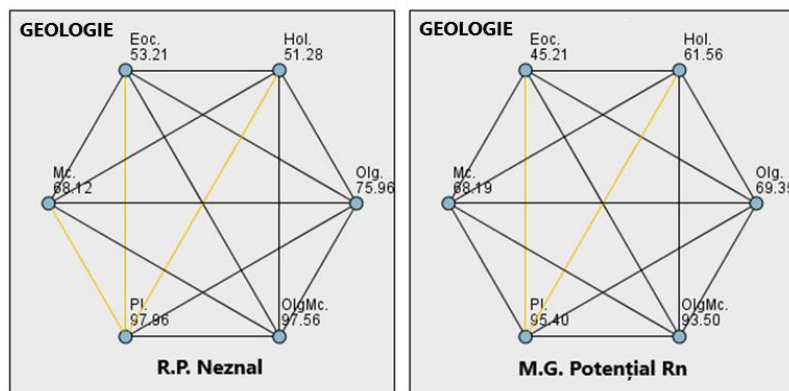


Figura 15. Diagramele de comparație dintre perechile de date ale variabilei geologie în funcție de potențialul de radon Neznal (R.P. Neznal) și potențialul din media geometrică a concentrației de radon din sol (M.G. Potențial Rn).

Dacă se introduc într-un model de regresie liniară, atunci valorile logaritmice ale mediei geometrice a concentrației de radon și a potențialului de radon Neznal vor depinde doar de GEOLOGIE.

După metodele prezentate în capitolul 2, au fost calculate potențialul de radon Kemski (P.R. Kemski) și indicele de radon Neznal (R.I. Neznal) pentru fiecare locație în parte unde s-au efectuat măsurători în sol. Indicele de radon Neznal este împărțit în 3 categorii (scăzut, mediu, ridicat), care reprezintă riscul la radon pentru un sit de construit sau deja construit. Potențialul de radon Kemski este împărțit în 6 clase care reprezintă potențialul de generare al radonului geogenic. Valoarea de 1 înseamnă cel mai redus potențial, iar valoarea de 6 indică cel mai ridicat potențial. În cazul indicelui de radon Neznal toate cele trei categorii au fost acoperite prin măsurători. În schimb, în cazul potențialului de radon geogenic Kemski s-au acoperit doar primele patru categorii.

Din punct de vedere al indicelui de radon Neznal, din totalul de 142 de măsurători în sol, s-au înregistrat 23 de valori scăzute (16,2 %), 93 valori medii (65,49 %) și 26 valori ridicate (18,31 %).

Testul neparametric Kruskal-Wallis aplicat pentru a determina impactul variabilelor GEOLOGIE și PEDOLOGIE asupra indicelui de radon Neznal a indicat o diferență semnificativă statistic doar pentru variabila GEOLOGIE ( $p < 0,05$ ), pentru perechea Holocen și Pleistocen ( $p = 0,015$ ) (Figura 16).

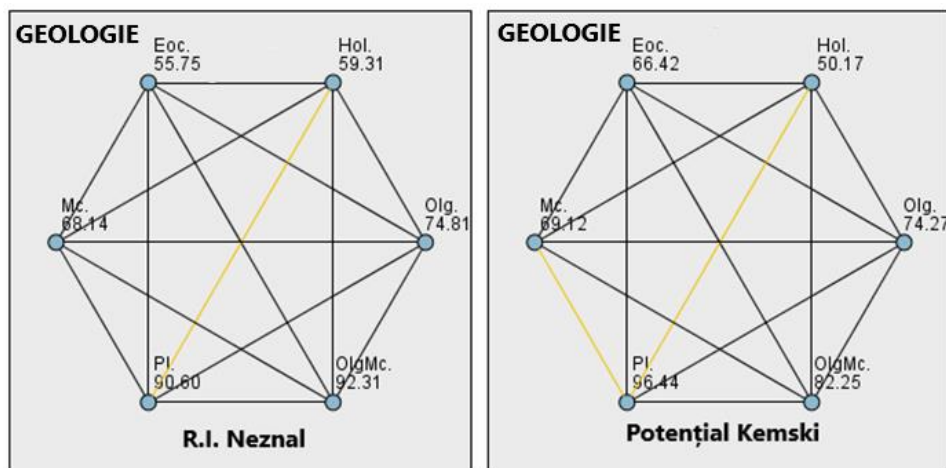


Figura 16. Diagramele de comparație între perechile de date ale variabilei geologie în funcție de (R.P. Neznal) și potențialul din media geometrică a concentrației de radon din sol (M.G. Potențial Rn).

Testul neparametric Kruskal-Wallis aplicat pentru a determina impactul variabilelor GEOLOGIE și PEDOLOGIE asupra potențialului de radon geogenic Kemski a indicat o diferență semnificativă statistic doar pentru variabila GEOLOGIE ( $p < 0,05$ ), pentru perechile Holocen și Pleistocen ( $p < 0.001$ ), precum și pentru Miocen și Pleistocen ( $p = 0,033$ ) (vezi Figura 16).

Prin calcularea coeficientului de corelație Pearson, s-a obținut o corelație acceptabilă între GEOLOGIE și concentrația de radon din sol exprimată prin M.G. CRn ( $r = 0,409$ ,  $p < 0,01$ ) și Med. CRn ( $r = 0,415$ ,  $p < 0,01$ ), de asemenea între GEOLOGIE și M.G. Potențial Rn ( $r = 0,330$ ,  $p < 0,01$ ) Potențialul de radon geogenic Kemski ( $r = 0,344$ ,  $p < 0,01$ ), Potențialul Neznal ( $r = 0,381$ ,  $p < 0,01$ ) și Indicele de radon Neznal ( $r = 0,344$ ,  $p < 0,01$ ). O corelație inversă a fost obținută pentru interacțiunea dintre GEOLOGIE și PEDOLOGIE ( $r = -0,206$ ,  $p < 0,05$ ). Nicio corelație semnificativă statistic nu s-a observat între GEOLOGIE și permeabilitate precum și clasa de permeabilitate. Pentru PEDOLOGIE s-a obținut o corelație semnificativă statistic în ceea ce privește permeabilitatea exprimată prin media geometrică ( $r = 0,193$ ,  $p < 0,05$ ) precum și clasa de permeabilitate ( $r = 0,184$ ,  $p < 0,05$ ). O corelație inversă a fost obținută între PEDOLOGIE și concentrația de radon măsurată în sol, exprimată prin media geometrică ( $r = -0,197$ ,  $p < 0,05$ ), inclusiv mediana ( $r = -0,206$ ,  $p < 0,05$ ) (Tabelul 8).

Tabelul 8. Corelații statistice determinate pentru parametrii măsurăți; \*\*corelația este semnificativă la un nivel de 0.01; \*corelația este semnificativă la un nivel de 0,05.

Corelația Pearson	M.G. CRn	Med. CRn	M.G.Potențial Rn	R.P. Kemski	R.P. Neznal	R.I. Neznal	Clasă perm.	M.G. perm.	GEO.	PEDO.
M.G. CRn	X	0,980**	0,789**	0,650**	0,707**	0,585**	-0,104	-0,114	0,409**	-0,197*
Med. CRn	0,980**	X	0,778**	0,636**	0,708**	0,604**	-0,095	-0,103	0,415**	-0,206*
M.G. Potențial Rn	0,789**	0,778**	X	0,587	0,858**	0,761**	0,414**	0,496**	0,330**	-0,61
R.P. Kemski	0,650**	0,636**	0,587**	X	0,746**	0,672**	0,053	0,077	0,344**	-0,094
R.P. Neznal	0,707**	0,708**	0,858**	0,746**	X	0,890**	0,304**	0,392**	0,381**	-0,084
R.I. Neznal	0,585**	0,604**	0,761**	0,672**	0,890**	X	0,329**	0,423** 0	0,344**	-0,051
Clasă perm.	-0,104	-0,095	0,414**	0,053	0,304**	0,329**	X	0,892**	-0,057	0,184*
M.G. perm.	-0,114	-0,103	0,496**	0,077	0,392**	0,423**	0,892**	X	-0,034	0,193*
GEOLOGIE	0,409**	0,415**	0,330**	0,344**	0,381**	0,344**	-0,057	-0,034	X	-0,206*
PEDOLOGIE	-0,197*	-0,206*	-0,061	-0,094	-0,084	-0,051	0,184*	0,193*	-0,206*	X

### 5.3. Analiza combinată a măsurătorilor de radon rezidențial și din sol, în raport cu geologia și pedologia zonei

La nivelul municipiului Cluj-Napoca, din totalul de 272 de măsurători rezidențiale de radon, s-au înregistrat 34 de măsurători care au depășit nivelul de referință de 300 Bq/m<sup>3</sup>. Din cele 34 de locații, doar la 24 s-a efectuat diagnostic (Tabelul 9), în conformitate cu disponibilitatea proprietarilor. Pentru fiecare locație în parte, din totalul de 15 puncte de măsurare în sol, s-au ales câte trei puncte apropiate unele de altele și s-a recalculat potențialul pe baza valorilor de concentrație de radon și permeabilitate.

Măsurătorile au acoperit formațiuni care au corespuns doar pentru 3 epoci geologice. Pleistocenul a avut cele mai multe măsurători (17) cu o pondere de 70 % din total, fiind urmat de Holocen (6), cu o pondere de 25 % din măsurători. Miocenul a avut doar o singură măsurătoare care a însemnat 4,2 % din total. Din punct de vedere pedologic, măsurătorile au suprapus peste 3 clase de sol. Cernisolurile, cu 12 măsurători, au cea mai mare pondere din total (50 %), fiind urmate de Protisoluri cu 11 măsurători (45,9 %) și Hidrisoluri cu o singură măsurătoare (4,2 %).

Prin calcularea coeficientului de corelație Pearson, pentru toate variabilele, nu s-a obținut o corelație semnificativă statistic între concentrația de radon rezidențial și oricare dintre acestea, singura excepție fiind permeabilitatea ( $r = 0,420$ ,  $p < 0,05$ ). În schimb, corelații semnificative statistic s-au observat din toate încrucișările variabilelor care rezultă din concentrația de radon

din sol (media geometrică, Potențialul Kemski, Potențialul și Indicele de radon Neznal) ( $p < 0.01$ ), lucru care este firesc, având în vedere ca au la bază același set de valori. De asemenea, a fost obținută o corelație semnificativă statistic între variabila GEOLOGIE și media geometrică a concentrației de radon ( $r = 0,697$ ,  $p < 0,01$ ), Potențialul de radon Neznal ( $r = 0,567$ ,  $p < 0,01$ ), Indicele de radon Neznal ( $r = 0,653$ ,  $p < 0,01$ ) și Potențialul Kemski ( $r = 0,749$ ,  $p < 0,01$ ), precum și pentru potențialul de radon din media geometrică ( $r = 0,464$ ,  $p < 0,05$ ). Nicio corelație semnificativă statistic nu a fost obținută pentru variabila PEDOLOGIE ( $p > 0,05$ ). În Tabelul 10 este prezentat sumarul corelațiilor statistice pentru parametrii măsurați.

Tabelul 9. Sumarul statisticii pentru reședințele care au depășit  $300 \text{ Bq/m}^3$  și la care s-a efectuat diagnostic.

Nr.	CRn_anual ( $\text{Bq/m}^3$ )	M.G. CRn_sol ( $\text{kBq/m}^3$ )	Potențial din M.G. ( $\text{kBq/m}^3$ )	M.G. Perm. ( $\text{k/m}^2$ )	Clasă perm.	R.P. Neznal	R.I. Neznal	R.P. Kemski	GEO.	PEDO.
1	373	32	21	$3,13 \cdot 10^{-12}$	mediu	35	mediu	4	Pl.	Proti.
2	367	32	18	$1,69 \cdot 10^{-12}$	mediu	26	mediu	4	Pl.	Proti.
3	309	39	35	$8,16 \cdot 10^{-12}$	ridicat	44	ridicat	4	Pl.	Proti.
4	396	18	14	$6,07 \cdot 10^{-12}$	ridicat	27	mediu	3	Pl.	Proti.
5	336	37	40	$1,30 \cdot 10^{-11}$	ridicat	45	ridicat	4	Pl.	Proti.
6	326	71	50	$4,02 \cdot 10^{-12}$	ridicat	81	ridicat	4	Pl.	Proti.
7	584	16	12	$6,36 \cdot 10^{-12}$	ridicat	4	scăzut	1	Hol.	Hidr.
8	394	10	9	$1,71 \cdot 10^{-11}$	ridicat	10	scăzut	1	Hol.	Proti.
9	366	9	7	$6,36 \cdot 10^{-12}$	ridicat	2	scăzut	1	Mc.	Cern.
10	423	38	17	$6,94 \cdot 10^{-13}$	mediu	18	mediu	3	Pl.	Cern.
11	333	78	32	$4,30 \cdot 10^{-13}$	mediu	34	mediu	3	Pl.	Cern.
12	347	34	17	$1,05 \cdot 10^{-12}$	mediu	23	mediu	4	Pl.	Cern.
13	432	8	7	$1 \cdot 10^{-12}$	ridicat	5	scăzut	1	Hol.	Proti.
14	376	22	17	$5,52 \cdot 10^{-12}$	ridicat	20	mediu	3	Pl.	Cern.
15	330	15	8	$1,98 \cdot 10^{-12}$	mediu	12	mediu	3	Pl.	Cern.
16	656	19	20	$1,28 \cdot 10^{-11}$	ridicat	29	mediu	3	Hol.	Proti.
17	768	42	26	$2,78 \cdot 10^{-12}$	mediu	50	ridicat	4	Pl.	Cern.
18	531	17	17	$1,08 \cdot 10^{-12}$	ridicat	27	mediu	3	Hol.	Proti.
19	309	17	10	$2,33 \cdot 10^{-12}$	mediu	15	mediu	3	Pl.	Cern.
20	805	24	22	$9,31 \cdot 10^{-12}$	ridicat	47	ridicat	4	Pl.	Cern.
21	383	16	16	$1,91 \cdot 10^{-11}$	ridicat	23	mediu	3	Hol.	Proti.
22	353	40	41	$1,17 \cdot 10^{-11}$	ridicat	104	ridicat	4	Pl.	Cern.
23	675	29	18	$2,83 \cdot 10^{-12}$	mediu	22	mediu	4	Pl.	Cern.
24	1221	36	109	$4,80 \cdot 10^{-11}$	ridicat	146	ridicat	4	Pl.	Cern.

Testul  $\chi^2$  a confirmat că nu există o dependență semnificativă statistic între concentrația de radon rezidențial și concentrația de radon din sol, potențialul de radon și indicele de radon ( $p > 0.05$ ).

Tabelul 10. Corelații statistice determinate pentru parametrii măsurați; \*\*corelația este semnificativă la un nivel de 0.01; \*corelația este semnificativă la un nivel de 0,05.

Corelația Pearson	CRn_anual	M.G. CRn	M.G.Potențial Rn	R.P. Kemski	R.P. Neznal	R.I. Neznal	M.G. perm.	Clasa perm.	GEO.	PEDO.
CRn_anual	X	-0,018	0,317	0,105	0,269	0,187	0,420*	0,143	-0,118	-0,245
M.G. CRn	-0,018	X	0,796**	0,765**	0,758**	0,727**	-0,374	-0,332	0,697**	-0,154
M.G. Potențial Rn	0,317	0,796**	X	0,698**	0,881**	0,818**	0,238	0,137	0,464*	-0,011
R.P. Kemski	0,105	0,765**	0,698**	X	0,862**	0,870**	-0,123	-0,317	0,749**	-0,073
R.P. Neznal	0,269	0,758**	0,881**	0,862**	X	0,891**	0,137	-0,027	0,567**	0,075
R.I. Neznal	0,187	0,727**	0,818**	0,870**	0,891**	X	0,143	0,016	0,653**	-0,084
M.G. perm.	0,420*	-0,374	0,238	-0,123	0,137	0,143	X	0,829**	-0,420*	0,375
Clasa perm.	0,143	-0,332	0,137	-0,317	-0,027	0,016	0,829**	X	-0,494*	0,389
GEOLOGIE	-0,118	0,697**	0,464*	0,749**	0,567**	0,653**	-0,420*	-0,494*	X	-0,401
PEDOLOGIE	-0,245	-0,154	-0,011	-0,073	0,075	-0,084	0,345	0,389	-0,401	X

## 5.4. Discuții

Din testele statistice a rezultat că, atât pentru măsurătorile rezidențiale cât și pentru cele din sol, cel mai mare impact asupra valorilor măsurate îl are variabila GEOLOGIE. Mai mult, pentru potențialul și indicele de radon Neznal, precum și pentru potențialul de radon geogenic Kemski, doar variabila GEOLOGIE are un impact semnificativ statistic. În ceea ce privește permeabilitatea, un impact superior asupra valorilor îl deține variabila PEDOLOGIE, dar acest lucru este firesc în contextul în care solul este cel care influențează valorile permeabilității. Impactul semnificativ statistic pentru interacțiunea dintre GEOLOGIE și PEDOLOGIE, atât pentru concentrațiile de radon rezidențial cât și pentru cele măsurate în gazul de sol, poate avea legătură cu faptul că solul reflectă caracteristicile mineralogice și petrografice ale rocilor parentale, implicit nivelele de radioactivitate ale acestora.

Se observă, de altfel, un model de distribuție a valorilor în ceea ce privește epocile geologice și clasele de sol, dar acest lucru este normal sub aspectul că solurile vor reflecta caracteristicile mineralogice și petrografice ale rocilor parentale, implicit nivelul de radioactivitate.

Astfel, putem afirma că, cel puțin pentru municipiul Cluj-Napoca, factorul geologic pare să controleze mai mult concentrațiile de radon geogenic, implicit potențialul de radon. Cu toate că același lucru se observă la prima vedere și pentru măsurătorile rezidențiale – în sensul în care au fost observate diferențe semnificative statistic pentru variabilele GEOLOGIE și PEDOLOGIE în ceea ce privește concentrația de radon – observăm că nu există nicio

corelație între concentrația de radon rezidențial și concentrația de radon din sol, din faza de diagnostic. Prin acest test s-au verificat și la nivel local rezultatele deja cunoscute pentru cele 5 așezări urbane din proiectul SMART-RAD-EN, și anume că variația radonului în interior nu depinde doar de variația radonului din sol. Discrepanța mare între valorile rezidențiale și cele măsurate în sol poate fi pusă în primă instanță și pe seama potențialului de radon, fiind cunoscut faptul că permeabilitatea joacă un rol extrem de important pentru clasificarea riscului pentru solurile de fundare (Neznal și Neznal, 2005). Însă, nici din acest punct de vedere nu s-au observat corelații între valorile măsurate în interior și potențialul de radon, fie el exprimat prin metoda Kemski sau Neznal. Mai mult, dacă analizăm Tabelul 9, observăm că, în cazurile reședințelor 7, 8, 9 și 13, deși potențialul de radon Neznal a înregistrat un indice scăzut (inclusiv potențialul de radon geogenic Kemski a fost clasat în clasa 1), în interior s-au înregistrat valori ale concentrației de radon peste nivelul de referință, de 300 Bq/m<sup>3</sup>. Ce e drept, majoritatea celorlalte valori ale indicelui au fost medii (14- 58,3%) și ridicate (8- 33,3 %).

Demn de menționat este faptul că, în ceea ce privește pedologia, în cazul măsurătorilor rezidențiale unde s-au înregistrat valori peste 300 Bq/m<sup>3</sup>, incintele s-au suprapus peste solurile cu cea mai bună permeabilitate măsurată (Cernisoluri și Protisoluri). De altfel, în cazul măsurătorilor pe traiecte geologice, toate formațiunile și tipurile de sol traversate prin măsurători de radon au prezentat indice de radon Neznal, în special mediu și ridicat. Același lucru se observă și în cazul potențialului de radon Kemski, unde majoritatea claselor sunt 3 și 4 (ceea ce semnifică un potențial de radon peste mediu-spre ridicat), atât pentru epocile geologice cât și pentru clasele de sol. În teorie, acest lucru înseamnă că toate aceste formațiuni și tipuri de soluri sunt susceptibile să ofere valori ale concentrației de radon din interior peste nivelul de 300 Bq/m<sup>3</sup>. Ori, din totalul de măsurători rezidențiale, deși s-au acoperit aceleași epoci geologice și clase de sol ca în cazul măsurătorilor din sol, valorile care au depășit 300 Bq/m<sup>3</sup> sunt atribuite în cea mai mare proporție Pleistocenului (22,4 % din totalul măsurătorilor rezidențiale atribuite acestei perioade) și Holocenului (12,4 % din totalul măsurătorilor rezidențiale atribuite acestei perioade) urmate fiind, de Oligocen-Miocen (20 % din totalul măsurătorilor rezidențiale atribuite acestei perioade) și Miocen (1,5 % din totalul măsurătorilor rezidențiale atribuite acestei perioade). Din punct de vedere pedologic, Protisolurile dețin cele mai multe depășiri (16,5 % din totalul măsurătorilor rezidențiale atribuite acestei clase de sol) urmate de Cernisoluri (13,6 % din totalul măsurătorilor rezidențiale atribuite acestei clase de sol) și Hidrisoluri (13 % din totalul măsurătorilor rezidențiale atribuite acestei clase de sol). Cu alte cuvinte, proporțiile dintre indicele de radon, respectiv potențialul de radon (Neznal și

Kemski) și depășirile din rezidențial au fost păstrate doar pentru Pleistocen și Holocen, respectiv Cernisoluri și Protisoluri. În ceea ce privește Miocenul, care a avut a treia cea mai mare frecvență în măsurătorile rezidențiale, cu o pondere de 23,5 % din totalul măsurătorilor, și care a deținut 14,3 % din totalul indicilor de radon ridicat și 40,9 % din totalul indicilor de radon mediu, a prezentat doar o singură depășire peste 300 Bq/m<sup>3</sup>, ceea ce înseamnă 1,5 % din totalul măsurătorilor rezidențiale atribuite acestei perioade. Având în vedere toate aceste aspecte semnalate până acum, putem afirma că atât indicele cât și potențialul de radon Neznal, dar și potențialul de radon Kemski, precum și concentrația de radon din gazul de sol nu explică întru totul concentrațiile de radon rezidențial și nici variația acestuia din interior, nici măcar la nivel local, unde măsurătorile s-au suplimentat, pe traiecte geologice. Astfel, acestea nu pot oferi decât o imagine aproximativă asupra riscului geogenic pentru radonul din interior.

Cu toate acestea, un model de distribuție a valorilor pentru radonul din gazul de sol și cel rezidențial îl reprezintă Pleistocenul, care a păstrat proporțiile în ceea ce privește maximele, mediile și medianele concentrațiilor înregistrate. Pentru radonul rezidențial, Pleistocenul a prezentat cele mai mari maxime (1221 Bq/m<sup>3</sup>), medii aritmetice (192,9 Bq/m<sup>3</sup>) și mediane (132 Bq/m<sup>3</sup>), la distanță mare de valorile atribuite celorlalte epoci geologice. Pentru radonul din sol Pleistocenul a prezentat, de asemenea, cea mai mare maximă (77.7 kBq/m<sup>3</sup>) și mediană (35,8 kBq/m<sup>3</sup>) și a doua cea mai mare medie aritmetică (35,2 kBq/m<sup>3</sup>) după media aritmetică a Oligocen-Miocenului (38,9 kBq/m<sup>3</sup>) - care a prezentat a doua cea mai mare maximă (73,8 kBq/m<sup>3</sup>) și mediană (35,2 kBq/m<sup>3</sup>). Trebuie ținut cont, totuși, că Oligocen-Miocenul a reprezentat doar 5,6 % din totalul măsurătorilor din sol și 3,7 % din totalul măsurătorilor rezidențiale, oferind 5,9 % din totalul de depășiri peste limita de 300 Bq/m<sup>3</sup>.

Un alt model de distribuție este legat de interacțiunea dintre erele geologice și clasele de sol - Pleistocen vs Cernisoluri, respectiv Holocen vs Protisoluri. Cu toate acestea, deși solurile pot explica potențialul de radon prin prisma permeabilității care influențează aceste valori, nu pot explica direct concentrațiile de radon măsurate în sol. Pentru a găsi o explicație pentru valorile măsurate, trebuie privit strict din punct de vedere geologic.

Cele mai mari maxime ale valorilor concentrației de radon măsurate în gazul de sol sunt atribuite Pleistocenului, urmat fiind, în ordine descrescătoare, de Oligocen-Miocen, Miocen, Oligocen, Holocen și Eocen. Această ordine poate reprezenta, într-o oarecare măsură, potențialul radioactiv pe care formațiunile atribuite fiecărei epoci geologice îl deține.



Pentru Pleistocen, valorile măsurate în gazul din sol pot fi corelate cu aria sursă a sedimentelor din care sunt constituite depozitele teraselor medii și superioare ale Someșului Mic. În aceasta se înscriu roci magmatice, cunoscute cu un potențial radioactiv însemnat, ce aparțin de masivul granitic Muntele Mare.

Primul autor care a pus în evidență potențialul radioactiv relativ ridicat al unor ape din Cluj-Napoca, în relație cu aria sursă a depozitelor cuaternare, este Atanasiu (1927, 1931) care, după măsurători sistematice în rețeaua de apă potabilă a municipiului și alte cercetări extinse în zona montană, concluzionează că valorile măsurate sunt o reflectare a conținutului de elemente radioactive din matricea minerală a acviferelor (fragmente mari de roci eruptive, în special granit pe care le-a observat în probe provenite de la săparea unor puțuri în Florești). Acesta pune în legătură radioactivitatea măsurată în ape cu masivul granitic de la Măguri-Răcătau și arată că aceste valori ridicate nu au doar caracter local ci sunt comune tuturor teraselor inferioare și luncii Someșului din lungul văii. Ba mai mult, observă o creștere a valorii radioactivității în ape odată cu apropierea de masivul granitic.

Aceeași tendință de creștere a radioactivității în apele subterane din bazinul hidrografic al Someșului Mic este pusă în evidență și de cercetările lui Cosma și Baci (2002) care arată, de asemenea, că valorile concentrației de radon măsurate sunt în relație cu prezența fragmentelor de roci endogene cu conținut ridicat de substanțe radioactive din aluviuni, a cărei arie sursă se leagă de masivul granitic de la Măguri-Răcătau. Pentru radonul din sol, aceeași autori raportează concentrații mari, care variază de la 18 la 122,2 kBq/m<sup>3</sup>, însă aceste valori sunt mult mai neuniform distribuite, odată cu urcarea în amonte.

Moldovan et al. (2013) identifică pentru apele subterane de la Măguri-Răcătau o valoare medie a concentrației de radon de 68,4 Bq/l, de patru ori mai mare decât valoarea medie obținută pentru Transilvania, și pune acest fapt pe seama prezenței granitului la suprafață, care poate favoriza acumularea radonului în sol și în ape.

Un lucru inedit îl reprezintă faptul că aceeași arie sursă este reprezentativă și pentru depozitele Holocene ale luncii Someșului Mic, dar acestea au prezentat valori mai mici față de Pleistocen în ceea ce privește concentrația de radon din sol. De asemenea, în măsurătorile din gazul de sol efectuate nu s-a observat o creștere a concentrației de radon spre amonte, valorile fiind neuniform distribuite pe întreg arealul.

Acest lucru poate fi datorat evoluției diferite a râului în cele două epoci geologice, ca o consecință a variațiilor climatice de mare amploare care au influențat oscilații de activitate

fluvială. Tranziția de la perioadele glaciare (predominant grosiere) la interglaciare (predominant fine) și invers poate declanșa o intensificare a proceselor de eroziune și agradare, care modifică major topografia cursului de apă. O manifestare indirectă este atribuită timpului necesar pentru ca vegetația să reacționeze la schimbările climatice, care poate avea ca efect schimbarea dramatică a raportului dintre scurgere și debitul solid disponibil. La aceasta se adaugă prezența permafrostului sau a înghețului sezonier al solului care pot afecta la rândul lor distribuția scurgerii în cadrul sistemului fluvial (Feier, 2010 și referințele din text).

Mai multe studii au evidențiat că râurile dezvoltă, în principal, modele împletite în timpul glaciațiunii, datorită cantităților mari de sedimente cu granulație grosieră și unei scurgeri amplificate, în timp ce în perioadele mai blânde acestea prezintă un model șerpuit, datorat vegetației bine dezvoltate, a unei scurgeri mult mai echilibrate, implicit a unei încărcări limitate de sedimente (Nador et al., 2007 și referințele din text).

Observațiile morfologice și de natură sedimentară asupra depozitelor fluviale din Europa centrală și de nord-vest au scos în evidență faptul că terasele s-au format ca răspuns la fluctuațiile climatice generate de ciclurile Milankovitch (Nador et al., 2003; Bridgland și Westway, 2008). La finele Pliocenului - care a înregistrat un optim climatic - are loc o degradare bruscă și instalarea unor ciclicități glaciare-interglaciare ce păstrează aceeași frecvență până în Pleistocenul mediu, când se face trecerea de la ciclurile climatice Milankovich de 41.000 ani la cele de 100.000 de ani (Head și Gibbard, 2015). În tot acest interval au fost înregistrate 100 de oscilații climatice globale cu amplitudini mult mai mari decât cele înregistrate pentru Holocen (Feier, 2010, sensu Kukla și Cilek, 1996). După acest interval, ciclurile glaciare-interglaciare au avut un impact mai puternic asupra scurgerii, ceea ce favorizat trecerea de la rețele hidrografice extinse (în care lățimea luncilor era mult mai mare decât în prezent și predomina procesul de agradare) la rețele hidrografice fixate (caracterizate printr-o incizie pronunțată pe verticală și detașarea de vechile terase) (Feier, 2010).

Bridgland și Westaway (2008) arată că, pentru majoritatea râurilor din Europa, deși există câteva excepții, formarea teraselor a avut loc la o rată de 1:1 per ciclu climatic Milankovitch de 100.000 de ani, în special în Pleistocenul Mediu și Superior.

Ultimul eveniment de mare amploare climatică s-a petrecut în Holocen și este caracterizat de o creștere bruscă a temperaturii, care a condus la topirea ghețarilor din domeniul montan și la schimbarea vegetației. Această asociere de evenimente a condus, de asemenea, la descreșterea

cantităților de debit lichid și solid de pe suprafața bazinelor hidrografice, implicit la reducerea dimensiunii albiilor aluviale (Feier, 2010).

Pendea et al. (2009), analizând o secvență depozitională de vârstă Pleistocen Superior, de la Florești, identifică pentru aceasta patru stadii morfoclimatice, dintre care ultimul este asociat unor condiții de mediu extreme datorate, cel mai probabil, manifestărilor de maxim ale ultimului Glacial. Studiile de polen au indicat că, în ultimul stadiu morfoclimatic, vegetația arboricolă a fost îndepărtată complet din întreaga regiune și înlocuită de vegetație ierboasă. În aceste condiții climatice sedimentarea s-a produs într-un sistem de energie înaltă, inclusiv cea eoliană.

Mai mult, Feier (2010) determină compoziția petrografică a pietrișurilor fluviale din patul albiei Someșului Mic, de vârstă holocenă și indică că principala pondere în alcătuirea acestor depozite o are materialul metamorfic, provenit din formațiunile cristalofiliene ale "Seriei de Arada" și Seriei de Someș (șisturi cristaline și cuarțite) chestiune explicabilă prin faptul că zona de proveniență a acestor materiale reprezintă cea mai mare parte din suprafața de drenaj a bazinului superior. Rocile magmatice (granit, pegmatite, andezite) au o participare mult mai redusă în structura materialului aluvionar, dar acest lucru poate fi o consecință directă a faptului că aria sursă a acestora ocupă o suprafață mult mai redusă. Cu toate acestea, după cum era firesc, rocile magmatice au un aport mai mare în zona de trecere a râului din zona montană în cea depresionară, însă din punct de vedere granulometric, clastele de dimensiuni mari, din clasa granulometrică de 64-32 mm lipsesc în secțiunea dintre Gilău și Dej unde s-au efectuat probările. Acest lucru intră în contradicție cu observațiile făcute de către Atanasiu (1927), care semnalează prezența granitului, în depozitele aluvionare ale terasei inferioare de la Florești, sub forma unor claste de mari dimensiuni.

Astfel, în perioada atribuită ultimului Glacial, atât eroziunea, cât și aportul sedimentar au fost cu câteva ordine de mărime mai mari față de perioada Holocenului, aspect care se poate traduce printr-un aport mult mai ridicat al rocilor magmatice în sedimentele teraselor inferioare și superioare ale Someșului Mic, de vârstă pleistocenă, ceea ce poate fi o explicație a diferențelor înregistrate pentru Pleistocen și Holocen.

În general este acceptat că valoarea concentrației gazului de radon din sol reflectă geochimia rocilor parentale și că geologia poate explica aceste valori (Gundersen et al., 1988; Gundersen și Schumann, 1996; Kemski et al., 1996; Etiope și Martinelli, 2002; Kemski et al., 2004, 2005; Adepelumi et al., 2005), aspect pe care l-am evidențiat și în studiul de față.

Necesitatea de a preveni efectele nocive ale radonului a făcut ca multe țări, printre care și România, să abordeze această problemă din perspectiva definirii zonelor cu potențial de risc la radon. Cea mai utilizată metodă la nivel european a fost aceea de a defini zonele de risc în funcție de concentrațiile de radon din interior, ceea ce a condus la dezvoltarea atlasului European de radon (Tollefsen et al., 2014). Această abordare a avut de la început un caracter pur estimativ, recomandările fiind ca harta de radon (indoor) să nu fie folosită ca înlocuitor pentru măsurătorile de interior. Mai mult, Bossew (2015) arată că datele de radon provenite din măsurătorile rezidențiale nu sunt suficiente pentru trasarea cu acuratețe a riscului de radon și consideră că o abordare din punct de vedere al potențialului de radon în sol ar fi mult mai potrivită.

O altă încercare a fost aceea de a pune în relație geologia cu radonul rezidențial, fiind cunoscut faptul că geologia este factorul de control cel mai important asupra distribuției de elemente radioactive în substrat, dar și acest demers s-a dovedit insuficient (Appleton și Miles, 2010; Tondeur et al., 2014; De Novellis et al., 2014). Appleton și Miles (2010) arată că doar 25 % din variația totală a concentrației de radon de interior din Anglia și Țara Galilor poate fi explicată de geologie, iar Tondeur et al. (2014) indică că doar 15,4 până la 17,7 % din variația radonului din interior, din regiunea Valonia din Belgia, poate fi atribuită factorului geologic.

În fine, cea mai apreciată metodă la momentul actual, la nivel internațional, este de a aborda nivelul de risc la radon sub forma potențialului de radon de sine stătător sau în relație cu alți factori precum geologia, arhitectura caselor, factorii de mediu sau antropici etc. (Nezhal et al., 2004; Kemski et al., 2005; Ielsch et al., 2010; Pasztor et al., 2016; Yarmoshenko et al., 2016; Ciotoli et al., 2017; Giustini et al., 2019). Deși această metodă oferă o rezoluție îmbunătățită a potențialului de risc pentru interior față de metodele precedent prezentate, eficacitatea acesteia este intens dezbătută în cercurile de profil, mai ales sub aspectul unei hărți de predicție a riscului la radon.

Friedmann et al. (2017) arată într-un studiu complex, care ia în considerare corelațiile dintre radonul rezidențial și concentrația de radon din sol, permeabilitate, conținutul de radium al solurilor precum și rata dozei ambientale echivalente, că toate aceste variabile, nici măcar când sunt considerate laolaltă, nu pot oferi o clasificare de risc la radon viabilă pentru o anumită regiune geologică.

Toate datele și rezultatele studiului de față sublinează că nicio variabilă luată în considerare în acest demers științific (concentrație de radon din sol, permeabilitate, potențial și

indice de radon, geologie, pedologie) tratată separat sau combinată cu altă variabilă, nu pot oferi decât o viziune aproximativă asupra riscului de radon dintr-o anumită zonă și nu ar trebui folosite ca surrogat pentru măsurătorile de interior.

## Capitolul 6: Concluzii

Studiul premergător, de unde a rezultat prima hartă de radon în sol și apă pentru România, a indicat că, din totalul celor 2564 de măsurători în sol a căror valori au fost cuprinse între 0,2 și 179 de kBq/m<sup>3</sup>, media aritmetică a concentrației de radon din sol este de 29,3 kBq/m<sup>3</sup> iar media geometrică este de 24,5 kBq/m<sup>3</sup>. În schimb, din totalul celor 2452 de măsurători în apă, media aritmetică a concentrației de radon în apă a fost de doar 9,8 Bq/l, ceea ce înseamnă că aceasta nu prezintă o contribuție semnificativă la concentrația radonului din interior, spre deosebire de valorile din sol care pot fi o explicație pentru radonul măsurat în locuințe.

Mai mult, la nivelul acestui studiu au fost observate anumite modele geologice cu privire la distribuția valorilor măsurate. S-a observat pentru radonul din sol că valorile mari sunt caracteristice zonelor de metamorfic ale Unităților Carpatice, fiind astfel explicate prin compoziția chimică a rocilor care le compun. Valori mari în apă au fost măsurate în depozite cuaternare din Câmpia de Vest, aspect care a fost pus pe seama ariei sursă, reprezentată de fațada vestică a Munților Apuseni. Cele mai mari concentrații de radon în apă de până la 100 Bq/l, au fost măsurate în zonele mezometamorfice și granitice ale Munților Apuseni.

Din primele măsurători ale radonului rezidențial din Cluj-Napoca, din prima parte a proiectului de cercetare SMART-RAD-EN, a reieșit că 17,5 % dintre reședințele investigate prezintă valori peste nivelul de referință. S-a observat încă din acest stadiu al cercetării un model geologic care plasează cele mai mari concentrații la nivelul Cuaternarului (Holocen și Pleistocen), existând posibilitatea ca acestea să se lege de aria sursă a depozitelor (masivul granitic din Apuseni).

În ceea ce privește studiul care s-a axat pe identificarea căilor de pătrundere a radonului în interior, acesta a indicat, pentru toate casele participante (din toate cele 5 orașe), solul de sub fundație și dimprejurul acesteia ca sursă principală a radonului din interior. Cu toate acestea nu s-a observat nicio corelație semnificativă statistic între concentrația de radon rezidențial și exalație, concentrația de radon din fisuri, concentrația de radon din sol, indicele și potențialul de radon. Acest lucru semnifică că variația radonului în sol nu a influențat direct variația

radonului din interior, iar indicele de radon nu a oferit indicii suficiente cu privire la nivelul de radon rezidențial și, astfel, nu este recomandat a fi folosit ca surogat al măsurătorilor din interior. De altfel, s-au identificat corelații ale nivelului de radon din interior și elemente constructive care au condus la concluzia că, alături de geologie, factorii care țin de astfel de caracteristici de construcție și modul de folosință al caselor, joacă un rol important în acumularea și variația radonului în interior.

A fost observată o tendință pentru casele izolate termic de a prezenta valori mai ridicate ale concentrației de radon în interior față de casele lipsite de izolație, aspect cauzat de aerisirea naturală deficitară. De asemenea s-a observat că lipsa șapei de beton poate conduce la o creștere a ratei de exalație a radonului.

În România, valorile concentrației de radon în interiorul clădirilor (locuințe și clădiri publice) variază de la câțiva zeci de Bq/m<sup>3</sup> până la câteva mii, media pe țară fiind situată (la nivelul măsurătorilor efectuate până în anul 2017) la 133 Bq/m<sup>3</sup>. Dar această valoare este posibil să nu fie reprezentativă, în contextul în care măsurătorile de concentrație de radon în interior au acoperit doar o treime din suprafața țării.

În ceea ce privește studiul de caz Cluj-Napoca, a fost observat un model de distribuție a valorilor în funcție de vârstele geologice și tipurile de sol, aspect pus pe seama faptului că solurile reflectă caracteristicile mineralogice și petrografice ale rocilor parentale.

Toate datele analizate în această etapă au indicat că geologia are un impact mai mare decât pedologia atât asupra valorilor concentrației de radon măsurate în interior sau în sol precum și asupra potențialelor de radon Kemski și Neznal, inclusiv asupra Indicelui de radon Neznal. Un impact superior îl are pedologia doar asupra valorilor permeabilității. În cazul măsurătorilor rezidențiale unde s-au înregistrat valori peste 300 Bq/m<sup>3</sup>, reședințele s-au suprapus peste solurile cu cea mai bună permeabilitate măsurată (Cernisoluri și Protisoluri). Astfel, pedologia, prin prisma influenței directe asupra permeabilității, poate influența secundar valorile concentrațiilor de radon măsurate în gazul de sol și, prin relație de corespondență, pe cele din interior. Deși pedologia poate explica potențialul de radon prin prisma permeabilității, nu a putut explica direct concentrațiile de radon măsurate în sol.

Din punct de vedere geologic, valorile concentrației de radon măsurate în gazul de sol atribuite Cuaternarului (Pleistocen și Holocen) pot fi corelate cu aria sursă a sedimentelor din care sunt constituite aceste depozite, deși s-au raportat diferențe semnificative între valorile concentrației de radon din sol măsurate pentru Pleistocen și Holocen. Aceste diferențe pot fi

explicabile prin evoluția diferită a Someșului Mic în cele două epoci geologice, ca o consecință a variațiilor climatice de mare amploare care au influențat oscilații de activitate fluvială.

La nivelul municipiului Cluj-Napoca, măsurătorile realizate prin proiectul SMART-RAD-EN, indică că valorile mediei anuale ale concentrației de radon din interior sunt situate între minime de  $10 \text{ Bq/m}^3$  și maxime de  $1221 \text{ Bq/m}^3$  cu o medie aritmetică și geometrică de 148, respectiv  $102 \text{ Bq/m}^3$ , și mediana de  $91 \text{ Bq/m}^3$ . Astfel, valoarea medie a concentrației de radon din interior, rezultată după ambele campanii de măsurători, este mai mare decât media aritmetică calculată după prima campanie ( $139 \text{ Bq/m}^3$ ), fiind totodată mult mai mare decât valoarea medie a concentrației în interior, de  $98 \text{ Bq/m}^3$ , raportată pentru Europa, și mult mai apropiată de valorile măsurate de Republica Cehă și Estonia ( $140 - 160 \text{ Bq/m}^3$ ).

Cele mai mari maxime ale valorilor concentrației de radon măsurate în interior sunt atribuite Pleistocenului și Holocenului, urmate în ordine descrescătoare de Oligocen-Miocen, Miocen, Eocen și Oligocen.

Pe de altă parte, în ceea ce privește măsurătorile în sol pe traiecte geologice, media aritmetică a valorilor concentrației de radon a fost de  $25,8 \text{ kBq/m}^3$  iar media geometrică de  $22,7 \text{ kBq/m}^3$ . Au fost înregistrate valori minime de  $4,3 \text{ kBq/m}^3$  și maxime de  $77,7 \text{ kBq/m}^3$ .

Cele mai mari maxime ale valorilor concentrației de radon măsurate în gazul de sol sunt atribuite Pleistocenului, urmat fiind, în ordine descrescătoare, de Oligocen-Miocen, Miocen, Oligocen, Holocen și Eocen. Această ordine poate reprezenta o ierarhie a potențialului radioactiv pe care formațiunile atribuite fiecărei epoci geologice îl deține, cel puțin raportat la nivelul municipiului Cluj-Napoca.

Geologia explică valorile de radon măsurate în gazul de sol, dar nu poate explica decât parțial valorile de radon rezidențial.

Niciuna dintre variabilele luate în considerare în acest demers științific nu poate oferi o predictibilitate satisfăcătoare din punct de vedere al riscului de radon din interior. Totuși, demn de menționat este faptul că toate formațiunile geologice au prezentat valori ale potențialului de radon care pot pune, teoretic, probleme din punct de vedere al riscului de radon din interior. Mai mult decât atât, situația Pleistocenului ar trebui tratată cu maxim interes la nivelul municipiului Cluj-Napoca.

În momentul de față, măsurătoarea individuală cu detectori pasivi rămâne cea mai exactă metodă de a identifica și a stabili nivelul și riscul de radon din interior.

Pe de altă parte, măsurătorile de radon, fie ele în interior, sol sau apă, au scopul de a încuraja realizarea unor politici de bune practici. Studiul radonului aduce laolaltă aspecte ce țin de domenii dintre cele mai diverse, cum ar fi: sănătate publică, medicina muncii, protecția mediului, energie verde, construcții, inginerie etc.

Hărțile de risc a radonului pot ridica diverse probleme de interpretare când sunt folosite de publicul larg. Adevăratul public țintă, însă, sunt autoritățile, care au astfel la dispoziție un indicator al necesității accelerării politicilor publice ce vizează campaniile de conștientizare a riscului asupra sănătății, ghidurile de prevenție și remediere în construcții, alocări de fonduri țintite și nu în ultimul rând alinierea la politicile internaționale. Mai mult, la fel ca în cazul riscului de cancer cauzat de fumat, efectul radonului asupra sănătății are nevoie de studii sistematice, consecvente și complexe.

Studiul de față reprezintă primul demers științific de acest fel din România și poate fi privit ca o verigă care va putea fi utilă în lanțul complex de investigații centrate pe radon. Această teză abordează în premieră, la nivel național, studiul complex al radonului de interior și al radonului geogenic în relație cu geologia și pedologia, și trasează primele concluzii în ceea ce privește predicția riscului la radon. Totodată, au fost aduse noi date în domeniul cercetărilor de radon, sub aspectul surselor și căilor de pătrundere a radonului în interior. De asemenea, datele rezultate din măsurătorile efectuate oferă o viziune mai amplă în ceea ce privește riscul de radon în anumite zone ale țării dar și la nivel local, în cazul studiului axat pe municipiul Cluj-Napoca.

Predicția riscului de radon din interior, precum și a celui geogenic, rămâne în continuare o problematică deschisă pentru studii viitoare. Deși metodele statistice pe care le-am folosit în acest studiu sunt utilizate pe scară largă, ele pot avea unele limitări. Concentrația de radon din interior este influențată de o serie de variabile care sunt dificil de cuantificat și mult mai greu de analizat, laolaltă, prin metodele statisticii clasice. În viitor dorim să abordăm această chestiune cu ajutorul programelor de inteligență artificială (AI) și învățare automată (machine learning) care pot permite analiza simultană a datelor cantitative și calitative ce poate conduce, în teorie, la predicția riscului de radon din interior cu o precizie ridicată.

O serie de alte variabile vor fi luate în considerare în studiile viitoare, precum conținutul în alte elemente radioactive al solurilor și formațiunilor geologice (Uranium, Thorium, Radium, Potasiu etc.), dar și detaliile arhitecturale și de construcție ale caselor. Acestea din urmă ar trebui grupate și clasate în funcție de variabile comune, și incluse într-o bază de date cu acces



public. Urmărim, de asemenea, să identificăm alte noi variabile care să contribuie la o mai bună înțelegere a fenomenelor de generare, transport, emanație și acumulare a radonului.

## **Bibliografie**

- Adepelumi, A.A., Ajayi, T.R., Ojo, O., 2005. Radon soil-gas as a geological mapping tool: case study from basement complex Nigeria. *Environmental Geology*, 48: 762-770.
- Ahmad, R., Wilson, C.J.L., 1981. Uranium and boron distributions related to metamorphic microstructure-evidence for metamorphic fluid activity. *Contributions in Mineralogy and Petrology*, 76: 24-32.
- Al-Khateeb, H.M., Aljarrah, K.M., Alzoubi, F.Y., Alqadi, M.K., Ahmad, A.A., 2017. The correlation between indoor and in soil radon concentrations in a desert climate. *Radiation Physics and Chemistry*, 130: 142-147.
- Appleton, D.J., Miles, J.C.H., 2010. A statistical evaluation of the geogenic controls on indoor radon concentrations and radon risk. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(10): 799-803.
- Atanasiu, G., 1927. Radioactivitatea apei potabile din Cluj și valoarea ei medicală. *Clujul Medical*, 5: 3-30.
- Atanasiu, G., 1931. Radioactivitate des sources d'eau de Roumanie. III. *Anuarul Institutului Geologic al României*, 16: 935-943.
- Baciu, C., Filipescu, S., 2002. Structura geologică. In: Cristea, V., Baciu, C., Gafta, D. (eds.). *Municipiul Cluj-Napoca și zona periurbană. Studii Ambientale*, 25-36 pp.
- Balintoni, I., 1997. *Geotectonica terenurilor metamorfice din România*. Editura Carpatica, Cluj Napoca, 176 pp.
- Basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. Council Directive 2013/59/Euratom Jan 17, 2014. 73 pp.
- Beaubien, S.E., Ciotoli, G., Lombardi, S., 2003. Carbon dioxide and radon gas hazard in the Alban Hills area (Central Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123(1-2): 63-80.
- Bossey, P., 2015. Mapping the Geogenic Radon Potential and Estimation of Radon Prone Areas in Germany. *Radiation Emergency Medicine*, 4: 13-20.
- Bridgland, D. R., Westaway, R., 2008. Preservation patterns of Late Cenozoic fluvial deposits and their implications: results from IGCP 449. *Quaternary International*, 189: 5-38.
- Burchfiel, B.C., 1976. *Geology of Romania*. Geological Society of America, Special Paper, 158: 82 pp.

- Burghel, B., Țenter, A., Cucuș, A., Dicu, T., Moldovan, M., Papp, B., Szacsvai, K., Neda, T., Suci, L., Lupulescu, A., Maloș, C., Florică, Ș., Baci, C., Sainz, C., 2019. The FIRST large-scale mapping of radon concentration in soil gas and water in Romania. *Science of the Total Environment*, 669: 887-892.
- Cinelli, G., De Cort, M., Tollefsen, T., 2019. *European Atlas of Natural Radiation*, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 190 pp.
- Ciotoli, G., Voltaggio, M., Tuccimei, P., Soligo, M., Pasculi, A., Beaubien, S.E., 2017. Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: A methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 166: 355-375.
- Cosma, C., Jurcuț, T., 1996. *Radonul și mediul înconjurător*. Editura Dacia, Cluj-Napoca, 208 pp.
- Cosma, C., Baci, C., 2002. Dinamica radonului. In: Cristea, V., Baci, C., Gafta, D. (eds). *Municipiul Cluj-Napoca și zona periurbană*. *Studii Ambientale*: 79-88.
- Cosma, C., Moldovan, M., Dicu, Kovacs, T., 2008. Radon in water from Transylvania (Romania). *Radiation Measurements*, 4(8): 1423-1428.
- Cosma, C., Dicu T., Dinu, A., Begy, R., 2009. *Radonul și cancerul pulmonar, seria Radioactivitatea mediului II*. Ed. Quantum-EFES, 169 pp.
- Cosma, C., Cucuș-Dinu, A., Papp, B., Begy, R., Sainz, C., 2013. Soil and building material as main sources of indoor radon in Băița-Ștei radon prone area (Romania). *Journal of Environmental Radioactivity*, 116: 174-179.
- Cross, F.B., 1998. Facts and values in risk assessment. *Reliability Engineering and System Safety*, 59(1): 27-40.
- Cucuș, A., Papp, B., Dicu, T., Moldovan, M., Burghel, B.D., Moraru, I.T., Țenter, A., Cosma, C., 2017. Residential, soil and water radon surveys in north-western part of Romania. *Journal of Environmental Radioactivity*, 166: 412-416.
- Cucuș (Dinu), A., Cosma, C., Dicu, T., Begy, R., Moldovan, M., Papp, B., Niță, D., Burghel, B., Sainz, C., 2012. Thorough investigations on indoor radon in Băița radon-prone area (Romania). *Science of the Total Environment* (1); 431:78-83.
- Cumberland, S.A., Douglas, G., Grice, K., Moreau, J.W., 2016. Uranium mobility in organic matter-rich sediments: A review of geological and geochemical processes. *Earth-Science Reviews*, 159: 160-185.

- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., Ruosteenoja, E., SchaffrathRosario, A., Tirmarche, M., Tomásek, L., Whitley, E., Wichmann, H.-E., Doll, R., 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*, 330(7485): 223.
- Darby, S., Hill, D., Deo, H., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M., Baysson, H., Bochicchio, F., Falk, R., Farachi, S., Figueiras, A., Hakama, M., Heid, I., Hunter, N., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruosteenoja, E., Schaffrath Rosario, A., Tirmarche, M., Tomásek, L., Whitley, E., Wichmann, H.-E., Doll, R., 2006. Residential radon and lung cancer - detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 32: 1-84.
- De Novellis, S., Pasculli, A., Palermi, S., 2014. Innovative modeling methodology for mapping of radon potential based on local relationships between indoor radon measurements and environmental geology factors. *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, 47(9): 109-119.
- Dinu, A.L., 2009. Corelații între radonul din locuințe și incidența cancerului pulmonar în zona minieră Ștei-Băița. Teză de doctorat, Universitatea Babeș-Bolyai, Cluj-Napoca, 166 pp.
- Euratom, 2014. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom a. *Official Journal of the European Union* L13(1).
- Etiopie, G., Martinelli, G., 2002. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 129(3-4): 185-204.
- Fărcaș, C., 2011. Studiul formațiunilor continentale Eocen terminale și Oligocen timpurii din NV-ul Depresiunii Transilvaniei - biostratigrafie și reconstituirii paleoambientale, pe baza asociațiilor de vertebrate continentale. Rezumatul Tezei de doctorat, Universitatea Babeș-Bolyai din Cluj Napoca, 50 pp.
- Feier, I., 2010. Reconstituirea evoluției geomorfologice a văii Someșului Mic în Eocen. Teză de doctorat, Facultatea de Geografie-Geologie, Universitatea Al. I. Cuza, Iași, 276 pp.

- Filipescu, S., 2011. Cenozoic lithostratigraphic units in Transylvania. In: Bucur, I., Săsăran, E. (eds.). Calcareous algae from Romanian Carpathians. Field trip Guidebook. Presa Universitară Clujeană, 37-48.
- Florea, N., Asvadurov, H., 1994. Harta solurilor Republicii Socialiste România. Foaia 10 Cluj, L-34-XII, 1:200.000. Institutul de Cercetări pentru Pedologie și Agrochimie, București
- Florică, Ș., Dicu, T., Burghel, B.D., Moldovan, M., Szacsvai, K., Țenter, A., Papp, B., Beldean, S., Istrate, A., Catalina, T., Tunyagi, A., Horju-Deac, C., Răchișan, A., Sferle, T., Dobrei, G., Sainz, C., Cucuș, A., 2017. Indoor radon related with the geology in Romanian urban agglomerations (Cluj-Napoca). *Studia UBB Ambientum*, 62(2): 29-36.
- Florică, Ș., Burghel, B.D., Bican-Brișan, N., Begy, R., Codrea, V., Cucuș, A., Catalina, T., Dicu, T., Dobrei, G., Istrate, A., Lupulescu, A., Moldovan, M., Niță D., Papp, B., Pap, I., Szacsvai, K., Țenter, A., Sferle, T., Sainz, C., 2020. The path from geology to indoor radon, *Environmental Geochemistry and Health*, 42: 2655–2665.
- Foerster, E., Beck, T., Buchroder, H., Doring, J., Schmidt, V., 2016. Instruments to measure radon-222 activity concentration or exposure to radon-222-Intercomparison 2015, *Salzgitter*, 48 pp.
- Foerster, E., Friedrich, F., Dubslaff, M., Schneider, F., Doring, J., 2019. Messgeräte zur Bestimmung der Radon-222-Aktivitätskonzentration oder der Radon-222-Exposition Vergleichsprüfung 2018/ Instruments to Measure Radon-222 Activity Concentration or Exposure to Radon-222 – Interlaboratory comparison 2018, *Salzgitter*, 50 pp.
- Friedmann, H., Baumgartner, A., Bernreiter, M., Graser, J., Gruber, V., Kabrt, F., Kaineder, H., Maringer, F.J., Ringer, W., Seidel, C., Wurm, G., 2017. Indoor radon, Geogenic radon surrogates and geology – Investigations on their correlation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 166: 382-389.
- Friedrich, F., Foerster, E., Dubslaff, M., Schneider, F., Feige, S., 2019. Messgeräte zur Bestimmung der Radon-222-Aktivitätskonzentration oder der Radon-222-Exposition Instruments to measure radon-222 activity concentration or exposure to radon-222-Interlaboratory comparison and proficiency testing 2019, *Salzgitter*, 48 pp.
- Giustini, F., Ciotoli, G., Rinaldini, A., Ruggiero, L., Voltaggio, M., 2019. Mapping the geogenic radon potential and radon risk by using Empirical Baesian Kriging regression: A case study from a volcanic area of central Italy. *Science of the Total Environment*, 661: 449-464.
- Gundersen, L.C.S., Reimer, G.M., Wiggs, C.R., Rice, C.A., 1988. Radon potential of rocks and soils in Montgomery County, Maryland. U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map, Series Number: 2043.

- Gundersen, L.C.S., Schumann, R.R., 1996. Mapping the radon potential of the United States: Examples from the Appalachians. *Environment International*, 22(1): 829-837.
- Hanomolo, I.M., Hanomolo, A., 1962. Geologia și petrografia regiunii Someș-Muntele Rece-Măguri-Mănăstireni-Căpuș. *Dări de Seamă ale Comitetului Geologic*, 67: 97-113.
- Head, M. J., Gibbard, P.L., 2015. Early-Middle Pleistocene transitions: an overview and recommendation for the defining boundary. Geological Society, London, Special Publication, 247: 1-18.
- Hosu, A., 1999. Arhitectura sedimentației depozitelor Eocene din nord-vestul Depresiunii Transilvaniei. *Presa Universitară Clujeană*, Cluj-Napoca, 224 pp.
- IARC, 1988 International Agency for Research on Cancer (IARC) Lyon. Man-made mineral fibres and radon. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans, 309 pp.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection), 2007. Publication 103, The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
- Ielsch, G., Cushing, M.E., Combes, P., Cuney, M., 2010. Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to region Bourgogne. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101: 813-820.
- Keith, S., Doyle, J.R., Harper, C., Mumatz, M., Tarrago, O., Wohlers, W.D., Diamond, G.L., Citra, M., Barber, L.E., 2012. Toxicological Profile for Radon. Atlanta (GA): Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US), Atlanta, Georgia, 378 pp.
- Kemski, J., Klingel, R., Siehl, A., 1996. Clasification and mapping of radon-affected areas in Germany. *Environment International*, 22(1): 789-798.
- Kemski, J., Siehl, A., Stegemann, R., Valdivia-Manchego, M., 2004. Mapping the geogenic radon potential in Germany. *The Science of the Total environment*, 272: 217-230.
- Kemski, J., Klingel, R., Siehl, A., Stegemann, R., 2005. Radon transfer from ground to houses and prediction of indoor radon in Germany based on geological information. *Radioactivity in the environment*, 7: 820-832.
- Klepper, M.R., Wyant, D.G., 1957. Contribution to the geology of uranium. Geological Survey Bulletin 1046-F. United States Government Printing Office, Washington, 148 pp.
- Krészek, C., Bally, A.W., 2006. The Transylvanian Basin (Romania) and its Relation to the Carpathian Fold and Thrust Belt: Insights in Gravitational Salt Tectonics. *Marine and Petroleum Geology*, 23(4): 405-442.

- Kukla, G.J. Cilek V., 1996. Plio-Pleistocene megacycles: record of climate and tectonics. *Palaeogeography. Palaeoclimatology. Palaeoecology*, 120: 171-194.
- Law nr. 301/2015 establishing the requirements for protection of human health as regards radioactive substances in drinking water (published: 2015-12-07).
- Lazăr, C., Întorsureanu, I., 1982. Contribuții la cunoașterea zăcământului de fier de la Mașca-Băișoara – Munții Apuseni. *Dări de Seamă ale Ședințelor, Institutul de Geologie și Geofizică* 66(2): 45-69.
- Leung, S.S.Y., Nikezic, D., Leung, J.K.C., Yu, K.N., 2007. Sensitivity of LR 115 SSNTD in a diffusion chamber. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 263: 306-310.
- Manual tehnic sistem RM-2. Soil Radon Monitoring System RM-2, User Manual, Radon V.O.S., producer: Dr. Froňka, Nuclear Technology, Czech Republic.
- Mészáros, N., Clichici, O., 1976. Pe poteci cu banuței de piatră. Ghid geologic al zonei Cluj. Editura Sport-Turism, București, 166 pp.
- M.O. 752/3.978/136/2018, Ordinul ministrului sănătății, al ministrului educației naționale și al președintelui Comisiei Naționale pentru Controlul Activității Nucleare nr. 752/3.978/136/2018 pentru aprobarea Normelor privind cerințele de bază de securitate radiologică. Monitorul Oficial al României, Partea I, Nr. 517 bis/25.VI.2018.
- M.O. Partea I, Nr. 655/7.VII.2019, Ordin privind aprobarea Metodologiei pentru determinarea concentrației de radon în aerul din interiorul clădirilor și de la locurile de muncă, 2019.
- Moldovan, M., Niță, D.C., Costin, D., Cosma, C., 2013. Radon concentration in ground water from Măguri Răcătău area, Cluj county. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 8(3): 81-86.
- Murariu, T., 2005. *Geochimia și metalogenia uraniului*. Editura Universității Alexandru Ioan Cuza, Iași, 430 pp.
- Mureșan, I., 1974. Contributions a l'étude des banatites et des pyroclastites de la bordure du Nord-Est des Montagnes Gilău. *Bulletin de Volcanologie* 38(4): 1157-1180.
- Mureșan, I., 1980. *Geologia și petrografia bordurii de nord-est a Munților Gilău*. Editura Academiei Republicii Socialiste România, 127 pp.
- Mutihac, V., 1990. *Structura geologică a teritoriului României*. Editura Tehnică, București, 418 pp.
- Mutihac, V., Ionesi, L., 1974. *Geologia României*. Editura Tehnică, București, 646 pp.

- Nador, A., Lantos, M., Toth-Makk, A., Thamo-Bozso, E., 2003. Milankovitch-scale multi-proxy records from fluvial sediments of the last 2.6 Ma, Pannonian Basin, Hungary. *Quaternary Science Reviews*, 22: 2157-2175
- Nador, A., Thamo-Bozso, E., Magyari, A., Babinszki, E., 2007. Fluvial responses to tectonics and climate change during the Late Weichselian in the eastern part of the Pannonian Basin (Hungary). *Sedimentary Geology* 202: 174-192
- Neznal, M., Neznal, M., Matolín, M., Barnet, I., Mikšová, J., 2004. The new method for assessing the radon risk of building sites. *Czech Geological Survey Special Papers*, Prague, 7-47.
- Neznal, M., Neznal, M., 2005. Permeability as an important parameter for radon risk classification of foundation soils. *Annals of Geophysics*, 48(1): 175-180.
- Papp, B., 2011. Radonul și fluxul de radon din sol. Aplicații în mediu, Geologie și geofizică. Teză de doctorat, Universitatea Babeș-Bolyai, Cluj-Napoca, 146 pp.
- Papp, B., Cucuș (Dinu), A., Cosma, C., 2017. A comprehensive study of residential, geogenic and water radon in the North area of Mures county, Romania. *Radiation Protection Dosimetry*, 179(1): 80-86.
- Paraschiv, D., 1979. Romanian Oil and Gas Fields. Institutul de Geologie și Geofizică, Studii Tehnice și Economice, Bucharest, A(13): 382 pp.
- Pasztor, L., Ssabo, K., Szatmari, G., Laborcsi, A., Horvath, A., 2016. Mapping geogenic radon potential by regression kriging. *Science of the Total Environment*, 544: 883-891.
- Pendea, I.F., Gray, J.T., Ghaleb, B., Tanțău, I., Bădărău, A.S., Nicorici, C., 2009. Episodic build-up of alluvial fan deposits during the Weichselian Pleniglacial in the western Transylvanian Basin, Romania and their paleoenvironmental significance. *Quaternary International*, 198: 98-112.
- Piciu, T., Simihăian, M., Stan, G., 2002. Aspecte pedologice. In: Cristea, V., Baciuc, C., Gafta, D. (eds.). *Municipiul Cluj-Napoca și zona periurbană. Studii ambientale*. Editura Accent, 25-36.
- Plch, J., 2008. Manual for Operating LUK 3P Device, M.Eng. SMM, Prague, 29 pp.
- Popescu, B., 1984. Litostratigraphy of cyclic continental to marine eocene deposits in NW Transylvania, Romania. *Archives des Sciences - Université de Genève*, 37(1): 37-73.
- Rallakis, D., Michels, R., Brouand, M., Parize, O., Cathelineau, M., 2019. The role of organic matter on uranium precipitation in Zoovch Ovoo, Mongolia. *Minerals*, 9(5): 310.
- Răileanu, G., Saulea, E., 1967. Republica Socialistă România, Harta Geologică. Foaia 10 Cluj, L-34-XII, 1:200.000. Comitetul de Stat al Geologiei, Institutul Geologic, București.

- RIM (2018). International comparison measurement of radon in soil gas at radon reference sites Cetyne and Buk in the Czech Republic, 17 September 2018. TECHNICAL REPORT.
- RIM (2021). International comparison measurement of radon in soil gas at radon reference sites Cetyne and Buk in the Czech Republic, 17 September 2018. TECHNICAL REPORT.
- Răileanu, G., Saulea, E., 1967. Republica Socialistă România, Harta Geologică. Foaia 10 Cluj, L-34-XII, 1:200.000. Comitetul de Stat al Geologiei, Institutul Geologic, București.
- Rusu, A., 1970. Corelarea faciesurilor Oligocenului din regiunea Treznea-Bizușa (NV Bazinului Transilvaniei). Studii și Cercetări Geologie, Geofizică, Geografie. Seria Geologie, 15(2): 513-525.
- Săndulescu, M., 1984. Geotectonica României. Editura Tehnică, București, 335 pp.
- Săndulescu, M., Visarion, M., 1978. Considérations sur la structure tectonique du soubassement de la Dépression de Transylvanie. Dări de Seamă Institutul de Geologie și Geofizică, 64: 153-173.
- Săndulescu, M., Kräutner, H., Borcoș, M., Năstăseanu, S., Patrulius, D., Ștefănescu, M., Ghenea, C., Lupu, M., Savu, H., Bercia, I., Marinescu, F., 1978. Geological map of Romania, 1:1,000,000. Geological Institute of Romania Printing House, Bucharest.
- Săndulescu, M., 1988. Chapter 2: Cenozoic Tectonic History of the Carpathians. In: Royden, L.H., Horvath, F. (eds.). The Pannonian Basin: A Study in Basin Evolution. American Association of Petroleum Geologists, Special Volumes, 113: 17-25.
- Săsăran, L., Săsăran, E., 2003. Facies analysis of the Late Cretaceous deposits from Corni Quarry (North-Eastern border of Gilău Mountains). Studia UBB Geologia, 48(2): 81-94.
- Săsăran, L., 2011. Upper Cretaceous deposits from the North-Eastern edge of Gilău Mountains (Northern Apuseni Mountains). In: Bucur, I., Săsăran, E. (eds.). Calcareous algae from Romanian Carpathians, 33-36.
- Stoici, S.D., Tătaru, S., 1988. Uraniul și Thoriul. Editura Tehnică, București, 338 pp.
- Ștefan, A., Lazăr, C., Întorsureanu, I., Horvath, A., Gheorghiuță, I., Bratosin, I., Șerbănescu, A., Călinescu, E., 1985. Petrological Study of the Banatic Eruptive Rocks in the Eastern Part of the Gilău Mountains. Dări de Seamă ale Institutului Geologic și Geofizic, 69: 215-247.
- Ștefan, A., Lazăr, C., Berbeleac, I., Udubașa, G., 1988. Evolution of banatitic magmatism in the Apuseni Mts. and associated metallogenesis. Dări de Seamă ale Institutului Geologic și Geofizică, 72-73(2): 195-213.



- Ștefan, A., Roșu, E., Andar, A., Robu, L., Robu, N., Bratosin, I., Grabari, G., Vajdea, E., 1992. Petrological and geochemical features of banatitic magmatites in northern Apuseni Mountains. *Romanian Journal of Petrology*, 75: 97-115.
- Tollefsen, T., Cinelli, G., Bossew, P., Gruber, V., De Cort, M., 2014. From the European indoor radon map towards an atlas of natural radiation; *Radiation Protection Dosimetry*, 162: 129-134.
- Tondeur, F., Cinelli, G., Dehandschutter, B., 2014. Homogeneity of geological units with respect to the radon risk in Wallon region of Belgium. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139: 140-151.
- Tunyagi, A., Dicu, T., Cucos, A., Burghele, B.D., Dobrei, G., Lupulescu, A., Moldovan, M., Nită, D., Papp, B., Pap, I., Szacsvai, K., Țenter, A., Beldean-Galea, M.S., Anton, M., Grecu, Ș., Cioloca, L., Milos, R., Botos, M.L., Chiorean, C.G., Catalina, T., Istrate, M.A., Sainz, C., 2020. An innovative system for monitoring radon and indoor air quality. *Romanian Journal of Physics*, 65: 1-14.
- Ud-Din Khan, S., Nakhabov, A., 2020. Nuclear Reactor Technology development and Utilization. Fuel Cycles, Advanced Reactors, and Hybrid Systems. In *Woodhead Publishing Series in Energy*, Elsevier, 492 pp.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation ), 2008 Report. Sources and effects of ionizing radiation. Vol. 1: Sources, 2008.
- Vlaicu-Tătărâm, N., 1963. Stratigrafia Eocenului din regiunea de la Sud-Vest de Cluj. Editura Academiei Republicii Socialiste România, 204 pp.
- WHO (World Health Organisation), 2009. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Hajo, Z., Ferid, S., (eds.), Geneva, 94 pp.
- WHO, 2011. Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth edition. World Health Organisation, Geneva, 541 pp.
- Yarmoshenko, I., Malinovsky, G., Vasilyev, A., Onischenko, A., Seleznev, A., 2016. Geogenic and anthropogenic impacts on indoor radon in the Techa River region. *Science of the Total environment*, 571: 1298-1303.
- Zhukovsky, M., Onischenko, A., Bastrikov, V., 2010. Radon measurements-discussion of error estimates for selected methods. *Applied Radiation and Isotopes*, 68: 816-820.