

MISCELLANEA INGV

Il radon e la radioattività ambientale:
risultati del progetto di Alternanza
Scuola-Lavoro “Misure dell’attività del
gas radon nei suoli e nelle acque nel
territorio di Cerveteri (Roma,
Italia centrale)”



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

47



Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Mario CASTELLANO (mario.castellano@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

Segreteria di Redazione

Francesca DI STEFANO - Referente
Rossella CELI
Barbara ANGIONI

redazionecec@ingv.it

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

MISCELLANEA

INGV

Il radon e la radioattività ambientale:
risultati del progetto di Alternanza
Scuola-Lavoro “Misure dell’attività del gas
radon nei suoli e nelle acque nel territorio
di Cerveteri (Roma, Italia centrale)”

*Radon and environmental radioactivity:
results of the School-Work Pathway
“Measurements of gas radon activity in soils
and waters at Cerveteri area (Rome,
Central Italy)”*

Nunzia Voltattorni

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Sismologia e Tettonofisica

Accettato 15 gennaio 2019 | Accepted 15th January 2019

Come citare | How to cite Voltattorni N., (2019). Il radon e la radioattività ambientale: risultati del progetto di Alternanza Scuola-Lavoro “Misure dell’attività del gas radon nei suoli e nelle acque nel territorio di Cerveteri (Roma, Italia centrale)”. Misc. INGV, 47: 1-24.

In copertina Mappa geologica del territorio di Cerveteri (Roma, Italia centrale) | Cover Geological map of Cerveteri area (Rome, central Italy)

INDICE

Riassunto	7
Abstract	7
Introduzione	7
1. Lo strumento dell'Alternanza-Scuola-Lavoro	8
2. Radioattività naturale del radon	10
3. Il progetto Alternanza-Scuola-Lavoro INGV-ISIS Enrico Mattei	11
3.1 Formazione teorica	12
3.2 Formazione pratica	13
4. Risultati e discussione	13
4.1 Misure dell'attività del radon nei suoli	14
4.2 Misure per la determinazione del radon indoor	16
4.3 Radon disciolto in acqua	17
4.4 Campionamento in aree "estreme"	17
5. Conclusioni	18
Ringraziamenti	19
Bibliografia	19

Riassunto

Durante l'anno accademico 2017-2018 è stato sviluppato ed eseguito un progetto di ricerca Alternanza-Scuola-Lavoro (ASL) presso il Liceo Scientifico dell'Istituto Statale Istruzione Superiore (ISIS) Enrico Mattei di Cerveteri (Roma). Il progetto è nato dalla volontà di creare un percorso formativo di ASL per introdurre i ragazzi ad una problematica ambientale che è poco nota ma presente nel loro territorio. La proposta, quindi, è stata indirizzata allo studio della radioattività naturale locale poiché il paese di Cerveteri (a circa 50 km a NO di Roma) è caratterizzato da affioramenti di tufi (*Tufo rosso a scorie nere* e *Tufi stratificati varicolori di Sacrofano*, prodotti dell'attività vulcanica del Pleistocene medio-inferiore) che producono naturalmente il radon che è un gas radioattivo. Il territorio cerite ha, quindi, una radioattività naturale che si disperde facilmente in atmosfera. Tuttavia, essendo il radon un gas, può migrare ed accumularsi in ambienti chiusi quali cantine, seminterrati e piani terra se è presente oltre che nel suolo anche nel materiale edilizio. Il tufo, infatti, è notoriamente utilizzato come materiale da costruzione per cui il gas tende facilmente ad accumularsi in ambienti chiusi. Il progetto ha previsto lezioni frontali, misure sperimentali ed elaborazione dati dell'attività del radon nei suoli, *indoor* (cioè nelle abitazioni dei ragazzi) e disciolto in acqua. I risultati hanno messo in evidenza discrete ma localizzate anomalie ($> 16000 \text{ Bq/m}^3$) di radon nel territorio cerite e valori medio-bassi ($< 200 \text{ Bq/m}^3$) nelle abitazioni tranne in alcuni casi con valori ben oltre la soglia raccomandata dalla Direttiva 2013/59/Euratom ($> 300 \text{ Bq/m}^3$).

Abstract

During 2017-2018 academic year, a School-Work Pathway (SWP) project has been developed and accomplished with the collaboration of students attending the last year of the scientific high school of Cerveteri (Rome). The main focus of the project was to introduce students to an environmental problem that is not well known but it is locally present. The project has been addressed to the study of natural radioactivity due to the presence of tuff outcrops (Tufo rosso a scorie nere and Tufi stratificati varicolori di Sacrofano, deriving from middle-lower Pleistocene volcanic activity) that naturally produce the radioactive gas radon. Thus, the Cerveteri area has a natural radioactivity but radon is a gas that can migrate and easily escape in the atmosphere. However, tuffs can be used as building material and, in this case, radon can accumulate in houses and closed spaces (basements and cellars). The SWP project has been developed by means of lectures, experimental measurements and data elaboration of gas radon activity in soil, indoor (in the students' houses) and dissolved in water. Results have highlighted moderate ($>16000 \text{ Bq/m}^3$) but localized anomalies of soil gas radon and medium-low ($< 200 \text{ Bq/m}^3$) values of indoor radon excepting some cases exceeding the threshold ($> 300 \text{ Bq/m}^3$) recommended by 2013/59 Euratom Directive.

Introduzione

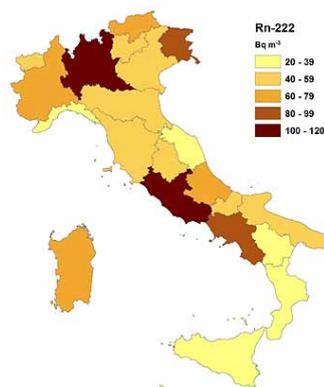
La tematica del progetto Alternanza Scuola-Lavoro (ASL) "Misure dell'attività del gas Radon nei suoli e nelle acque nel territorio di Cerveteri (Roma)" nasce dalla volontà di sensibilizzare i giovani del luogo ad una problematica esistente nel territorio e di cui non hanno consapevolezza nonostante la sua riconosciuta pericolosità. Infatti, il radon è un nemico subdolo la cui presenza passa inosservata poiché si tratta di un gas incolore, insapore e inodore. Si forma dal decadimento dell'uranio contenuto naturalmente nelle rocce e nel sottosuolo. Una volta formatosi, come tutti i gas, tende a volatilizzarsi e può essere respirato da chi ne viene a contatto. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS, o WHO) lo ha inserito insieme al fumo di sigaretta

e l'amianto tra le cause principali di cancro ai polmoni. La nocività del radon è nota da diversi decenni tanto che, tra gli anni '80 e '90 è stata realizzata dall'ISPRA, dall'Istituto Superiore della Sanità e dai Centri Regionali di Riferimento della Radioattività Ambientale, un'indagine nazionale rappresentativa sulla esposizione al radon nelle abitazioni. Il valore della concentrazione media nazionale è risultato pari a 70 Bq/m³ [APAT, 2003] valore relativamente elevato rispetto alla media mondiale valutata intorno a 40 Bq/m³ e a quella europea di circa 60 Bq/m³. I risultati dell'indagine nazionale aggregati per Regione mostrano una situazione molto diversificata (Fig. 1) con concentrazioni medie regionali che vanno da poche decine di Bq/m³ fino ad oltre 100 Bq/m³ e singole abitazioni che arrivano fino a migliaia di Bq/m³. Tale differenza è dovuta principalmente alle differenti caratteristiche geologiche locali ma anche a molti altri fattori (presenza di uranio e radio nel suolo e nei materiali da costruzione, permeabilità del suolo, tecniche costruttive, ecc.) per cui, all'interno delle singole regioni, sono possibili variazioni locali, anche notevoli, della concentrazione di radon. Negli anni successivi all'indagine nazionale, diverse Regioni hanno svolto ulteriori indagini finalizzate all'individuazione dei livelli di attività del radon sul proprio territorio. I risultati hanno permesso di comprendere la distribuzione spaziale dei livelli di radon all'interno del territorio regionale e di rappresentarla attraverso delle mappe disponibili sui siti web delle Regioni come, ad esempio, le mappe per la Regione Lazio [Di Giosa et al., 2013] in cui sono visibili le percentuali di abitazioni eccedenti livelli di riferimento (Fig. 2). Ciò sicuramente costituisce un'importante strumento di informazione sulla presenza di radon nella propria regione se non nella zona di residenza. Tuttavia, il radon non è comunemente noto ed è richiesta una maggiore azione divulgativa da parte delle Regioni o enti/organi di competenza al fine di prendere provvedimenti in caso dell'avvenuta conoscenza di elevata attività di radon nelle proprie abitazioni.

Il progetto ASL nasce per rendere i ragazzi consapevoli della presenza di tale problematica nel loro territorio ed eventualmente affrontarla. Sono state svolte lezioni didattico-informative sulla geologia del territorio e quindi sulla probabilità della presenza di radon e le cause che ne derivano. I ragazzi dell'ASL sono stati coinvolti nelle campagne di prospezione geochimica per l'individuazione dell'attività del gas radon nei suoli, nelle abitazioni e disciolto in acqua.

Figura 1 Risultati dell'indagine nazionale sull'esposizione al radon nelle abitazioni [ISPRA, 2003].

Figure 1 National survey results of radon exposure in dwellings [ISPRA, 2003].



1. Lo strumento dell'Alternanza Scuola-Lavoro

L'Alternanza Scuola-Lavoro è una metodologia didattica innovativa istituita dalla Legge n. 53/2003 e disciplinata dal Decreto Legislativo n. 77/2005. Si rivolge agli studenti delle scuole secondarie di 2° grado ai quali permette di "alternare" momenti di formazione in aula e in una struttura ospitante (quali aziende e/o enti pubblici/privati) come metodo sistematico da introdurre nella didattica curriculare per avvicinare i giovani al mondo del lavoro, orientarli e promuovere il successo scolastico.

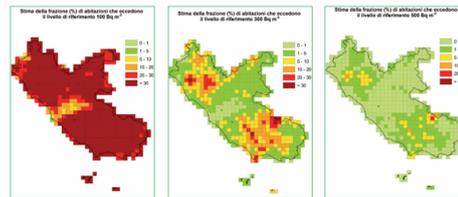


Figura 2 Mappe della percentuale di abitazioni eccedenti il livello di riferimento di 100 Bq/m³, 300 Bq/m³ e 500 Bq/m³ [Di Giosa et al., 2013].

Figure 2 Maps of dwelling percentage exceeding reference level of 100 Bq/m³, 300 Bq/m³ and 500 Bq/m³ [Di Giosa et al., 2013].

La Legge n. 107/2015 ha ribadito l'importanza di affiancare al sapere il saper fare, intensificando i rapporti della scuola con il territorio, con il mondo produttivo e dei servizi. Si potrebbe dire che l'alternanza è il metodo formativo nel quale ci si allena, intenzionalmente, a considerare le conoscenze (sapere) e le abilità (saper fare) come mezzi per impadronirsi di competenze nella risoluzione di problemi concreti (fine) [Gentili, 2016].

L'ASL si iscrive in quel processo di ricomposizione critica, dei saperi e delle conoscenze con cui oggi poter qualificare, nei contesti scolastici, i processi di *workbased learning* [Bertagna, 2013; Dalrymple et al., 2014, Morselli and Costa, 2014]. Superando il puro senso funzionalistico dell'acquisizione di competenza tecnica, questa metodologia formativa deve poter mobilitare nel ragazzo quella che i Greci chiamavano *métis*, ovvero l'intelligenza lavorativa [Gentili, 2013], intesa come insieme di attitudini mentali che combinano l'intuizione, la sagacia, la previsione, l'elasticità mentale, la capacità di cavarsela, l'attenzione vigile, il senso dell'opportunità. Oggi la capacità di professionalizzazione non è infatti solo espressione performante di competenze tecniche, ma piuttosto capacità di cogliere i molteplici significati dell'agire e di mobilitare in modo proattivo il talento coerentemente con il proprio progetto esistenziale [Loiodice, 2009]. Tale visione dell'Alternanza Scuola-Lavoro, nel suo portato formativo, esprime tre valori pedagogici fondamentali: 1) centralità della persona, ponendo il primato della risorsa umana (riferita a una persona matura, responsabile, critica nel pensare, nel fare e nell'agire) come condizione prima per lo sviluppo sociale; 2) unitarietà del sapere, capace di superare la separazione tra *theoría* e *téchne*, promuovendo un processo circolare tra saperi concettuali e abilità pratiche in prospettiva di apprendimento permanente; 3) affermazione del valore pienamente culturale e educativo dell'attività pratica colta nella sua portata capacitante. In sintesi, l'Alternanza Scuola-Lavoro rappresenta per il sistema scolastico una feconda opportunità per promuovere percorsi di *workbased learning* [Margiotta, 2006; Gibbs and Armsby, 2010] che favoriscano, nei giovani, processi di attivazione lavorativa e di identità sociale consapevole.

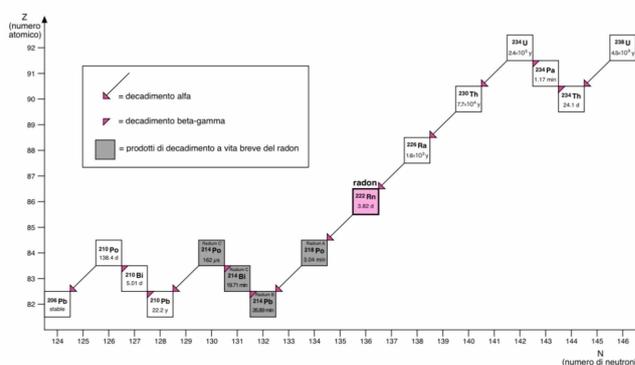
L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia vanta una esperienza pregressa di progetti di Alternanza Scuola-Lavoro. La diversificazione delle attività svolte all'interno dei progetti formativi che hanno interessato l'utilizzo di strumentazione scientifica, la ricerca bibliografica, la stesura di relazioni, l'utilizzo di dotazioni informatiche, il lavoro di gruppo e l'esposizione dei risultati, hanno permesso di sensibilizzare i ragazzi verso discipline scientifiche soprattutto alla luce del loro impiego sociale in termini di qualità della vita o di sviluppo tecnologico [Stefanelli et al., 2014]. Il progetto di Alternanza Scuola-Lavoro svolto con l'Istituto Statale Istruzione Superiore (ISIS) di Cerveteri ha avuto lo scopo di sensibilizzare i ragazzi alla radioattività naturale del territorio, una problematica poco nota nonostante la riconosciuta pericolosità per la salute. Una volta spiegata tale problematica, la partecipazione degli studenti allo svolgimento delle varie fasi del progetto è stata molto attiva, curiosa e attenta a dimostrazione che l'ASL può avere un ruolo educativo nello sviluppo delle capacità di comprensione e nell'introduzione alle tematiche che si riscontrano nella realtà quotidiana.

2. Radioattività naturale del radon

Il radon è un gas nobile e radioattivo, incolore e inodore generato continuamente dalla crosta terrestre, in particolare da rocce quali tufo, pozzolana, graniti e in minore quantità dai calcari. Il radon ha origine dal processo di decadimento dell'Uranio (^{238}U , fig. 3) che è naturalmente contenuto nelle rocce suddette e che sono la causa, quindi, di una radioattività naturale. Esistono tre isotopi principali del radon, il ^{222}Rn (detto semplicemente Radon), il ^{220}Rn (conosciuto anche come Toron) e il ^{219}Rn (detto Actinon), appartenenti, rispettivamente, alle famiglie radioattive aventi come capostipiti ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U [Bourdon et al., 2003]. Il ^{222}Rn (di seguito indicato semplicemente come radon) è l'isotopo caratterizzato dal tempo di dimezzamento più lungo (3.82 giorni) ed è quindi quello con una maggiore abbondanza e permanenza nell'ambiente. Gli altri due hanno tempi di dimezzamento molto inferiori (il toron decade in 55 secondi mentre l'actinon in 3,96 secondi) e contribuiscono limitatamente alla concentrazione totale di questo gas. Le principali sorgenti del radon indoor (all'interno delle abitazioni) sono, nell'ordine: il sottosuolo, i materiali da costruzione e l'acqua utilizzata a fini domestici. Il substrato geologico gioca però il ruolo principale nei processi di potenziale apporto del radon negli edifici. La natura delle rocce, la loro composizione mineralogica, la concentrazione degli elementi precursori (uranio, torio e radio), la porosità, la permeabilità, il contenuto d'acqua, la presenza di fratture e faglie, la presenza di cavità, sono gli elementi che più condizionano la concentrazione del radon nel sottosuolo e il suo trasporto attraverso le fondazioni [Castelluccio et al., 2012]. Non tutto il radon prodotto in un suolo o in una roccia per decadimento del radio è disponibile per il passaggio nell'aria, ma soltanto una parte di esso si libera nei pori (processo d'emanazione), può migrare nel terreno e quindi concentrarsi negli ambienti confinati. La presenza d'acqua nei pori influenza fortemente il movimento del radon nel suolo, ma il parametro che meglio regola il trasporto e l'esalazione è la permeabilità.

Figura 3 Catena di decadimento radioattivo dell'Uranio-238.

Figure 3 Radioactive decay chain of Uranium-238.



Com'è noto, quest'ultima può essere distinta in permeabilità primaria, dovuta alle caratteristiche intrinseche di vacuolarità dei terreni (dipendenti dalla densità, dalla porosità interconnessa e dalla granulometria) oppure secondaria (legata alla presenza di fratture e discontinuità strutturali). La carsificazione di una roccia può, inoltre, aumentare la permeabilità generale dell'ammasso roccioso e influenzare l'accumulo e la migrazione del radon nel sottosuolo. In presenza di fratture, faglie e discontinuità, il flusso di radon non ha soltanto una componente diffusiva (legata al gradiente di concentrazione del gas in un breve intorno del punto di misura), ma si esplica soprattutto attraverso un trasporto di tipo avvertivo [Richon et al., 2011] dovuto ai gradienti della pressione dei fluidi (H_2O , CO_2 , CH_4) nei pori: in quest'ultimo caso, il radon, proveniente da aree più profonde, risale con maggiore velocità verso la superficie insieme con altri fluidi che agiscono come convogli gassosi trasportatori (ovvero *carrier gas*).

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO), attraverso l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC), ha classificato fin dal 1988 il radon nel Gruppo 1 nel quale sono elencate le 105 sostanze per le quali si ha la massima evidenza di cancerogenicità per l'uomo. In Italia l'esposizione al radon è responsabile (secondo la stima del 2010 dell'Istituto Superiore di Sanità) di circa 3200 casi di tumore polmonare all'anno [ISS, 2013]. Il radon, essendo un gas inerte ed elettricamente neutro, non reagisce con altre sostanze e, di conseguenza, così come viene inspirato, viene espirato. Tuttavia, essendo radioattivo, genera una progenie (prodotti di decadimento) elettricamente carica negativamente che si attacca al particolato sempre presente in aria. Tale particolato se inalato, si può fissare sulle superfici dei tessuti polmonari. In particolare due isotopi del polonio (^{218}Po e ^{214}Po) sono radioattivi ed emettono radiazioni alfa che possono danneggiare le cellule umane.

Molti paesi industrializzati hanno emanato delle raccomandazioni per invitare la popolazione ad affrontare questo problema attraverso, innanzitutto, la misura della concentrazione di radon e l'adozione di azioni di risanamento quando questa supera determinati livelli che sono considerati un rischio elevato per la salute. Tali valori variano da paese a paese e, nella maggior parte dei casi, sono compresi nell'intervallo tra 150 e 400 Bq/m³. Di seguito alcuni esempi: Stati Uniti 150 Bq/m³, Inghilterra 200 Bq/m³, Germania 250 Bq/m³, Canada 800 Bq/m³. All'inizio del 2014 è stata pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale Europea la Direttiva 2013/59/Euratom che stabilisce i limiti per le concentrazioni di Radon (300 Bq/m³) e per le radiazioni emesse da materiali da costruzione. L'Italia avrebbe dovuto emanare delle disposizioni nazionali per attuare le indicazioni europee entro febbraio 2018 ma, a tutt'oggi, la popolazione non è ancora tutelata sul piano normativo. Analogamente a quanto avvenuto in altri Paesi, l'Italia era, tuttavia, già dotata di un Piano Nazionale Radon (PNR), cioè di un piano coordinato di azioni volte alla riduzione del rischio di tumore polmonare connesso all'esposizione al radon ed ai suoi prodotti di decadimento. Il PNR è stato preparato nel 2002 da un apposito gruppo di lavoro, composto da esperti di diversa provenienza e competenza, nell'ambito di una commissione del Ministero della Salute, e successivamente è stato valutato positivamente dal Consiglio Superiore di Sanità, approvato dal Ministro della Salute, ed infine discusso ed emendato nell'ambito della Conferenza Stato-Regioni. Nel 2006 il "Centro per la prevenzione ed il controllo delle malattie" (CCM), presso il Ministero della Salute, ha stanziato un primo finanziamento per avviare la realizzazione del PNR, affidandone il coordinamento all'Istituto Superiore di Sanità, coadiuvato da un Sottocomitato Scientifico di cui fanno parte esperti di vari Enti, Ministeri, Regioni. Il PNR prevede azioni su valutazione del rischio, mappatura della concentrazione di radon ed individuazione degli edifici a maggiore presenza di radon, identificazione di sistemi per prevenire o ridurre l'ingresso del radon negli edifici, informazione della popolazione e di gruppi specifici, formazione degli addetti, normative per le abitazioni ed i luoghi di lavoro. Le azioni di tutela dal rischio radon passano attraverso informazione alla popolazione e possono consistere in interventi di bonifica a livello degli edifici esistenti o in soluzioni progettuali per quanto riguarda i nuovi edifici [Agnesod et al., 2007].

3. Il progetto Alternanza-Scuola-Lavoro INGV-ISIS Enrico Mattei

Nonostante la presenza e la realizzazione di un PNR, la conoscenza/consapevolezza della presenza del radon e del rischio che ne deriva è ancora poco diffusa e nota.

La proposta del progetto ASL all'ISIS Enrico Mattei nasce con l'obiettivo di educare i ragazzi a tale importante problematica ambientale del territorio di Cerveteri in cui risiedono. Infatti, il paese di Cerveteri (a circa 50 km a NO di Roma) è caratterizzato, da un punto di vista geologico, da affioramenti di tufi (nello specifico: *Tufo rosso a scorie nere* e *Tufi stratificati varicolori di Sacrofano*, fig. 4) che sono il prodotto dell'attività vulcanica del Pleistocene medio-inferiore. Il tufo, oltre agli

affioramenti presenti sul territorio, viene anche utilizzato, grazie alla sua capacità coibente, come principale componente edilizio delle abitazioni. Il tufo è radioattivo come tutti i prodotti derivanti dall'attività vulcanica (quali, ad esempio, pozzolana, granito, porfido) in quanto hanno un contenuto naturale di uranio da cui, attraverso una catena di decadimento, deriva il gas radon. Il territorio cerite ha, quindi, una radioattività naturale che si può disperdere facilmente in atmosfera ma può anche migrare ed accumularsi nelle abitazioni. Tenendo conto di tali problematiche, il progetto ASL per lo studio della radioattività naturale del territorio di Cerveteri è stato accolto con grande interesse ed entusiasmo sia da parte dei docenti che degli studenti coinvolti. Il percorso di attività di formazione ha previsto sia una fase teorica che una pratica. Complessivamente, l'attività è stata svolta in 50 ore articolate secondo un piano di lavoro concordato con i tutors considerando sia le scadenze/impegni degli studenti sia le attività pratiche da svolgere in campagna quali le prospezioni di gas del suolo che devono essere fatte in primavera-estate su terreno asciutto [Hinkle, 1994].

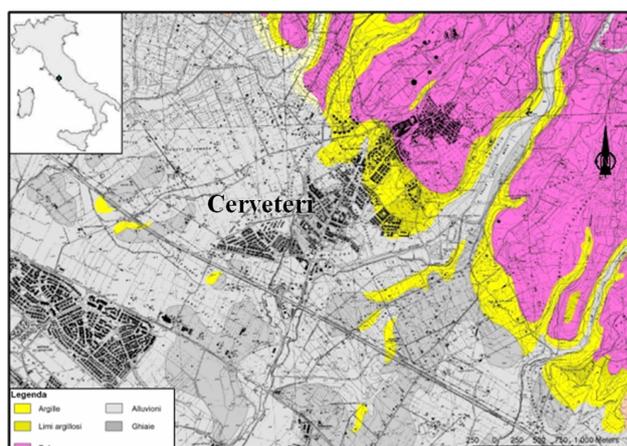
3.1 Formazione teorica

La formazione teorica è stata fondamentale e necessaria per preparare gli studenti all'attività pratica da svolgere, soprattutto se in autonomia. La prima fase, quindi, è stata dedicata a lezioni frontali di apprendimento scientifico e gli argomenti delle lezioni sono stati i seguenti:

- introduzione al progetto: sono state spiegate in dettaglio le finalità del progetto e le varie fasi previste sia teoriche che pratiche;
- la geologia del territorio: si è ritenuta necessaria una lezione a carattere geologico al fine di far conoscere meglio il territorio ai ragazzi in particolare l'origine dei sedimenti tufacei da cui deriva il radon;
- le caratteristiche chimico-fisiche del gas radon;
- le normative europee riguardanti i livelli di radioattività in luoghi pubblici e privati: è stata fatta una panoramica della situazione europea, i limiti fissati da ogni singola nazione e le direttive europee di riferimento considerando che in Italia non esiste ancora una normativa vigente;
- le tecniche di abbattimento della radioattività da gas radon: tecniche passive (ventilazione naturale) e tecniche attive (ventilazione forzata, depressurizzazione del vespaio, suzione del sottosuolo, parete ventilata, ecc.);
- spiegazione e dimostrazione pratica del funzionamento degli strumenti da utilizzare nel corso del progetto per effettuare le misure dell'attività del radon nei suoli, disciolto in acqua e nelle proprie abitazioni (indoor).

Figura 4 Mappa geologica del territorio di Cerveteri (Roma, Italia centrale).

Figure 4 Geological map of Cerveteri area (Rome, central Italy).



3.2 Formazione pratica

La formazione pratica è stata indirizzata allo svolgimento di varie attività da svolgere al fine di avere una panoramica dei possibili scenari in cui l'attività del radon può manifestarsi. Sono state proposte e di seguito effettuate le seguenti attività:

- misure del gas radon nei suoli in un'area di circa 3 km² comprendente la scuola e parte dell'abitato di Cerveteri, Fig. 5);
- misure di gas radon indoor sia in alcuni locali della scuola che nelle abitazioni degli studenti interessati;
- campionamento di gas radon disciolto nelle acque di pozzi e sorgenti dell'area di Cerveteri, caratterizzazione dei principali parametri fisico-chimici in loco (pH, Eh e conducibilità) e nel laboratorio chimico scolastico (alcalinità);
- campionamento di acque e misure di gas radon in aree considerate estreme dal punto di vista geochimico quali la Caldara di Manziana e Canale Monterano (entrambe in provincia di Roma);
- elaborazione dei risultati ottenuti tramite softwares appropriati (quali, ad esempio, Surfer, Grapher, Statistica) per la realizzazione di mappe di distribuzione delle concentrazioni del gas con possibilità di definire zone ad alta/bassa pericolosità e/o l'analisi statistica della distribuzione dei valori ottenuti.

Una volta conclusa la parte operativa, gli studenti hanno lavorato in autonomia (suddivisi in gruppi di lavoro) per l'assemblaggio di tutte le conoscenze e i dati acquisiti al fine di renderli pubblici attraverso un evento istituzionale alla presenza di tutti gli studenti dell'ISIS, il dirigente scolastico, insegnanti nonché autorità locali. Inoltre, durante le varie fasi operative, tutti i partecipanti al progetto (sia studenti che tutors) erano in condivisione e contatto continuo in rete tramite l'uso di un gruppo *whatsApp* e la creazione di una *cloud* per l'immagazzinamento di tutti i dati, risultati, foto e documenti vari. È stato creato anche un sito internet (<https://sites.google.com/a/enricomattei.it/radon86>) in continuo aggiornamento man mano che si è proceduto con l'avanzamento delle varie fasi del progetto.



Figura 5 Mappa di distribuzione dei punti di campionamento del gas radon.

Figure 5 Distribution map of radon sampling points.

4. Risultati e discussione

La fase pratico-sperimentale del progetto ha coinvolto gli studenti nelle misure di radon nel suolo, nelle proprie abitazioni e disciolto in acqua. Gli studenti sono stati divisi in gruppi per le misure di gas del suolo e, in alcune occasioni, è stata affidata loro tutta la strumentazione necessaria per le rilevazioni così da lavorare in completa autonomia sebbene non mancasse mai una supervisione.

Attraverso semplici strumenti informatici già noti agli studenti, sono state quindi fatte tabelle dei dati raccolti continuamente aggiornate. Una volta terminata la raccolta dati, si è proceduto alla loro elaborazione per creare grafici e mappe di distribuzione dei valori.

4.1 Misure dell'attività del radon nei suoli

Sono state eseguite 47 misure di attività del radon nei suoli in un'area di circa 3 km² (un campione ogni 500 m circa, Fig. 5) comprendente la scuola (a SSE), molte delle abitazioni degli studenti e la parte terminale della necropoli "Banditaccia" in cui affiorano i sedimenti tufacei (a NNO). Per le misure dell'attività di radon nei suoli, è stato utilizzato uno spettrometro alfa certificato RAD 7 DurrIDGE® collegato, attraverso un tubo in plastica ad una sonda posta nel terreno fino ad una profondità di circa 50 cm (Fig. 6). La pompa interna allo strumento aspira il gas del suolo (1litro/minuto) che fluisce nella camera di ionizzazione dove vengono generati ioni positivi ²¹⁸Po le cui emissioni alfa permettono di misurare l'attività del ²²²Rn (espressa in Bq/m³). La misura attendibile dell'attività del radon è dopo 15 minuti, tempo necessario perché i nuclei del Po e del Rn raggiungano l'equilibrio.

Figura 6 Misure di attività del gas radon nel giardino della scuola e gli studenti che hanno partecipato al progetto ASL.

Figure 6 Radon gas measurements at the school's yard and the students attending the SWP project.



I principali parametri statistici dei risultati ottenuti sono mostrati in tabella 1. L'attività del radon va da un minimo di 634 Bq/m³ fino ad un massimo di 51000 Bq/m³ con un valore medio di circa 14000 Bq/m³. Il valore della deviazione standard è di 11661 Bq/m³ indicando una stima di alta variabilità dei dati come anche evidenziato dal valore dell'indice di asimmetria (skewness) pari a 1.35.

Tabella 1 Principali parametri statistici
Table 1 Main statistical parameters

	Radon (Bq/m ³)
Valore minimo	634
Valore massimo	51000
Media	13987
Deviazione standard	11661
Skewness	1.35

I dati ottenuti sono stati trattati statisticamente utilizzando il diagramma di probabilità cumulata che permette di analizzare la distribuzione dei valori in termini di variabilità. La figura 7a mostra la curva di distribuzione dei valori e la presenza di varie popolazioni evidenziate sia dai cambiamenti di pendenza della curva sia dalle lacune nella continuità della distribuzione [Sinclair, 1991]. In particolare, sono state individuate 4 popolazioni: 1) il tenore di fondo (*background*) che corrisponde all'intervallo normale di concentrazione (tra 0 e < 16000 Bq/m³) dell'area, 2) deboli anomalie che sono valori (compresi nel range ≥ 16000 e < 24000 Bq/m³) leggermente superiori al valore di background e che corrispondono a valori anomali localmente [Miesch, 1981], 3) anomalie, corrispondenti all'intervallo da ≥ 24000 a < 31000 Bq/m³ e 4) valori estremi (*outliers*),

cioè valori molto elevati rispetto al resto delle popolazioni. Poiché l'analisi della curva di probabilità ha evidenziato 4 popolazioni, i dati sono stati suddivisi in quattro classi e riportati in una mappa (*classed map*, Fig. 7b) per visualizzarne la distribuzione spaziale.

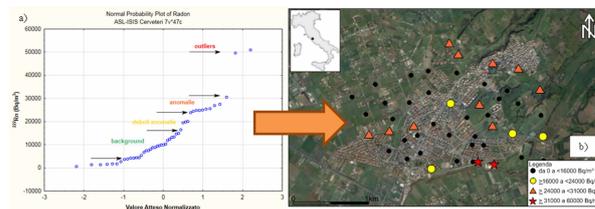


Figura 7 a) Grafico della probabilità normale per l'individuazione di classi di popolazione; b) mappa della distribuzione spaziale delle classi di popolazione del radon.

Figure 7 a) Normal probability plot for the identification of population classes; b) spatial distribution map of radon population classes.

Nella figura 7b è evidente come i valori al di sopra del tenore di fondo ($>16000 \text{ Bq/m}^3$) siano raggruppati in diversi settori dell'area campionata ma principalmente a NE allineati in direzione NNO-SSE lungo il margine dei tufi affioranti su cui è ubicata la necropoli della Banditaccia. Sono stati trovati dei punti anomali lontano dagli affioramenti tufacei e precisamente a sud della necropoli a circa 500 m dall'ISIS verso E (lungo Via Settevene Palo nuova). Due valori estremamente anomali ($>31000 \text{ Bq/m}^3$) sono stati misurati a Piano del Fregneto (lungo Via Fontana Morella situata verso SO, le due stelle rosse nella figura 7b). Entrambi le ultime due aree con valori anomali sono in pieno dominio di alluvioni e argille che, notoriamente, hanno una notevole capacità di fissazione chimico-fisica di eventuali elementi che migrano e che quindi difficilmente raggiungono la superficie [Zarlenga, 2009; Voltattorni et al., 2010]. È stata quindi svolta un'analisi più approfondita del territorio sia per osservazione diretta sia attraverso immagini da satellite con il risultato che il settore orientale dell'area è caratterizzato dalla presenza, in superficie, di resti tufacei appartenenti alla necropoli. Il settore occidentale, invece, non presenta apparentemente, a livello di superficie, resti in tufo né si evidenzia la presenza di faglie e/o fratture che generalmente costituiscono vie di fuga preferenziale dei gas del suolo. Da una ricerca bibliografica condotta sulle necropoli etrusche dell'area [Pace et al., 1955], è emerso che oltre alla nota e già citata necropoli della Banditaccia, vi è quella del Monte Abatone a SE di Cerveteri e del Sorbo ad ovest (Fig. 8) ma anche altre più piccole, meno famose ed alcune a carattere ipogeo: Cava della Pozzolana, Macchia della Signora, S. Paolo e la Necropoli Rupestre di Greppe S. Angelo.

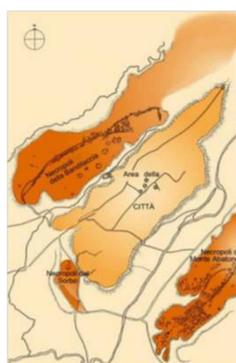


Figura 8 Pianta delle necropoli etrusche di Cerveteri [Pace et al., 1955].

Figure 8 Map of Cerveteri Etruscan necropolis [Pace et al., 1955].

La distribuzione spaziale dei valori più elevati dell'attività di radon nei suoli è quindi correlata alla presenza di tufi sia come affioramenti sia, presumibilmente, come resti delle necropoli etrusche. Quest'ultima ipotesi è comunque da verificare attraverso una prospezione geochimica dei gas del suolo maggiormente dettagliata ed una consulenza archeologica adeguata.

4.2 Misure per la determinazione del radon indoor

La messa in loco di campionatori (canestrini a carboni attivi) per la determinazione di radon entro le abitazioni è stata eseguita direttamente dai ragazzi seguendo le procedure insegnate loro. Ogni ragazzo e/o insegnante, coinvolto nel progetto e che aveva possibilità di fare misure, ha avuto in dotazione un contenitore metallico al cui interno vi sono carboni attivi (circa 100 gr) in grado di adsorbire il radon presente nell'aria. Il canestrino viene aperto e posizionato sul pavimento. L'esposizione del canestrino dura 48 ore e la stanza in cui è posizionato deve avere porte e finestre chiuse per tutto il tempo dell'esposizione così da considerare le peggiori condizioni ambientali (vale a dire senza alcun ricambio d'aria). Una volta trascorso il tempo stabilito, il canestrino viene chiuso e consegnato al laboratorio di radionuclidi dell'INGV per le analisi di spettrometria gamma.

Sono state fatte 24 misure di radon indoor inclusi anche tre locali della scuola. I canestrini sono stati ubicati in diversi ambienti (7 cantine, 7 seminterrati, 5 piani terra e 5 primi piani) in funzione della disponibilità di una stanza non utilizzabile per tutto il tempo dell'esposizione del campionatore. I risultati sono mostrati in tabella 2. I valori vanno da un minimo di 35 Bq/m³ ad un massimo di 1144 Bq/m³. La diversità degli ambienti in cui sono stati posti i canestrini, ha permesso di affrontare e discutere più approfonditamente le modalità di accumulo del radon in ambiente chiuso. Infatti, i valori più bassi sono stati trovati per lo più nei piani terra e/o primi piani dove, notoriamente, il radon difficilmente riesce ad accumularsi poiché è un gas poco volatile. Non è stato sorprendente constatare che le misure effettuate in cantine e/o seminterrati avessero i valori più elevati dato che il radon è un gas ben otto volte più pesante dell'aria poiché ha una densità elevata pari a 9.72 g/l a 0°C e un peso atomico di 222.05 u.m.a.

Tabella 2 Valori di attività del radon indoor nei diversi livelli di abitazioni (cantina, seminterrato, piano terra e primo piano).

Table 2 Radon activity values at different dwelling levels (cellars, basement, ground level and first floor).

Cantina (Bq/m ³)	Seminterrato (Bq/m ³)	Piano Terra (Bq/m ³)	Primo Piano (Bq/m ³)
233	67	80	35
116	1144	197	163
96	49	43	93
304	112	52	222
45	248	123	195
207	325		
149	346		

I risultati ottenuti sono stati quindi confrontati con la geologia del territorio per individuare le abitazioni che si trovano sugli affioramenti tufacei e quindi potenzialmente più sensibili all'accumulo del gas. Un ulteriore importante fattore discriminante, di cui si è tenuto conto per la presenza del radon, è il materiale edilizio dell'abitazione stessa. Infatti, essendo il tufo il

materiale di costruzione più facilmente reperibile sul territorio, è stato molto utilizzato in passato sia per gli edifici abitativi sia per opere secondarie quali muri di confine, forni esterni, pozzi domestici e similari. In particolare, dall'analisi comparativa è emerso che la presenza di radon (sebbene non in quantità ritenute nocive per la salute umana) al primo piano di tre abitazioni è fondamentalmente dovuta al materiale di costruzione delle stesse.

Le tre misure effettuate in locali della scuola hanno mostrato concentrazioni ben al di sotto di quella limite (300 Bq/m^3) raccomandata dalla Direttiva 2013/59/Euratom.

4.3 Radon disciolto in acqua

I campioni prelevati per le misure del radon disciolto in acqua sono stati di numero molto esiguo non essendo disponibili pozzi privati sul territorio. Sono stati fatti campionamenti solamente da due pozzi: il primo della scuola e il secondo privato (di uno studente). In entrambi i casi, il prelievo di acqua è stato fatto dal rubinetto direttamente collegato al pozzo. Inizialmente l'acqua è stata fatta fluire nel tubo, a sua volta collegato al rubinetto, per qualche minuto per permettere un adeguato spurgo ed evitare quindi di campionare acqua stagnante. L'estremità del tubo è stata quindi posizionata all'interno della bottiglia-campionatore tenuta reclinata e riempita evitando sia un flusso turbolento che favorisce il degassamento dell'acqua, sia un flusso troppo lento da favorire la contaminazione atmosferica [Liotta e Martelli, 2012]. La bottiglia-campionatore ha una capacità di 0.6 l e, una volta riempita, è stata posta in un circuito chiuso: una pompa a membrana invia l'aria contenuta nel circuito sul fondo della bottiglia dove per gorgogliamento è asportato il radon in soluzione; l'aria ricca di radon transita quindi nei carboni attivi di un collettore (canestrino) dello stesso tipo utilizzato per le misure di concentrazione di radon indoor [Galli et al., 1999]. Dopo un ricircolo di almeno due minuti è completato il trasferimento del radon nei carboni attivi. Il canestrino viene poi portato al laboratorio INGV per le analisi di spettrometria gamma.

I valori ottenuti dalle analisi dei due pozzi campionati, sono entrambi molto bassi ($< 30 \text{ Bq/m}^3$). La disponibilità di soli due campioni chiaramente non ha permesso di fare una stima della distribuzione del radon disciolto nel territorio indagato ma ha dato comunque modo di mostrare ai ragazzi un ulteriore approccio scientifico.

4.4 Campionamento in aree “estreme”

Il progetto ha previsto la visita e il campionamento di due aree considerate “estreme” per particolari condizioni geologico-ambientali. La prima area è stata il Monumento naturale Caldara di Manziana, una riserva naturale situata all'interno del Parco naturale di Bracciano e alle estreme propaggini sud-occidentali del complesso vulcanico Sabatino, a circa venti chilometri a N di Cerveteri. Si tratta di una depressione di origine vulcanica dove nell'area centrale è presente una “polla” (Fig. 9) che rappresenta l'attività idrotermale tardiva del vulcanismo sabatino e consiste principalmente nell'emissione di gas dalla sorgente perenne di acqua termale dei fluidi racchiusi nel sottosuolo. In prossimità della polla affiora il cosiddetto “tufo di Bracciano”, colata piroclastica all'interno della quale sono riconoscibili frammenti di roccia vulcanica (in particolare frammenti di lava leucitica). L'attività idrotermale consiste principalmente nella risalita di acque termominerali e nell'emissione di gas (per lo più CO_2), che sono responsabili del “ribollire” dell'acqua o del fango dei laghetti. L'acqua della caldara è molto mineralizzata e ricca soprattutto dei composti dello zolfo; essa esce ad una temperatura di 20°C e dà luogo alla deposizione di concrezioni sulfuree, con colori che vanno dal bianco al grigio, alle diverse tonalità di giallo.

La seconda area visitata è stata la Riserva Naturale Regionale Monterano che si trova tra i Monti

della Tolfa e i Monti Sabatini nel territorio del comune di Canale Monterano, a circa 30 km a nord di Cerveteri. Il territorio della Riserva segue il corso del fiume Mignone dalla località Sassone (Canale Monterano) fino alla zona tufacea su cui sorge il borgo di Rota nel comune di Tolfa (RM).

Figura 9 Attività di campionamento e misure alla Caldara di Manziana (Roma).

Figure 9 Sampling and measurement activity at Caldara di Manziana (Rome).



Figura 10 Attività di campionamento e misure a Canale Monterano (Roma).

Figure 10 Sampling and measurement activity at Canale Monterano (Rome).



Nel territorio della riserva affiorano sedimenti calcareo-marnosi, argille e sabbie di origine marina e depositi di origine vulcanica appartenenti all'attività esplosiva del Pleistocene medio-inferiore. Di rilievo nella riserva sono gli affioramenti di tufo, di cui caratteristico è il *Tufo rosso a scorie nere*. L'area è caratterizzata da fasi tardo-magmatica quali risalita di acque termominerali, ricche di zolfo e gas residui che danno luogo ad attività solfatariche. In particolare, nel punto di confluenza del torrente Biscione con il Fosso della Palombara l'acqua ferruginosa del torrente si arricchisce di elementi sulfurei prendendo la colorazione tipica giallastra. Questa zona, chiamata la Zolfatara di Monterano (Fig. 10), è caratterizzata da emissioni in prevalenza di CO_2 che provocano piccoli getti nelle polle d'acqua mineralizzate a bassa temperatura.

In entrambe le aree sono state fatte misure dei principali parametri chimico-fisici (pH, Eh, alcalinità, conducibilità elettrica) e campionamenti dell'acqua per la determinazione della presenza di radon disciolto. I risultati ottenuti sono stati messi a confronto con i due campioni di acqua da pozzi campionati, al fine di far comprendere come le caratteristiche fisico-chimiche di un'acqua possono cambiare notevolmente in funzione di diversi processi (quali arricchimento/impovertimento di minerali per interazioni acqua-roccia, tempi di residenza nel sottosuolo, mescolamento, ecc.) a cui è sottoposta durante il suo percorso.

5. Conclusioni

Il progetto di Alternanza-Scuola-Lavoro ha avuto lo scopo di sensibilizzare i ragazzi alla radioattività naturale del territorio in cui vivono. Nel complesso di tale esperienza, gli studenti hanno mostrato curiosità ed interesse sin dalle prime fasi del progetto raggiungendo così una valutazione finale più che positiva sia per impegno, interesse, apprendimento dei concetti e la loro applicazione. Le esperienze condotte hanno raggiunto anche l'obiettivo di introdurre i ragazzi a varie attività scientifiche che, come hanno avuto modo di constatare in prima persona, non sono fini a sé stesse ma consentono di studiare ed affrontare importanti tematiche ambientali. Infatti, i risultati ottenuti hanno reso concreta la problematica della radioattività

naturale poiché hanno messo in evidenza zone del territorio con alta concentrazione di radon sia nei suoli che indoor e quindi a rischio per la salute umana, a lungo termine.

L'approccio scientifico teorico-pratico ha permesso, pertanto, di raggiungere sia la consapevolezza di un argomento che difficilmente viene sviluppato nella didattica ordinaria sia la percezione del rischio ambientale a livello locale.

Ringraziamenti

Ritengo necessario ringraziare, prima di tutti, la Prof.ssa Roberta Cosimi che ha accettato con entusiasmo la proposta del progetto e grazie alla sua gestione della progettazione e degli aspetti specifici-tecnici, è riuscita a coinvolgere e, a sua volta, a trasmettere entusiasmo ai ragazzi della 5E e 5F dell'anno accademico 2017-2018. I ragazzi coinvolti nel progetto hanno affrontato tutto il periodo formativo con curiosità ed attiva partecipazione e per questo sono grata a loro poiché hanno facilitato il mio compito. Ringrazio le tutors Prof.ssa Valentina Bettini e Prof.ssa Quinta Donnini che hanno condiviso questa esperienza formativa con grande disponibilità ed apertura e i Prof. G. Maccioni e V. Sossi che hanno fornito il supporto tecnico per le materie di indirizzo. Un particolare ringraziamento ai colleghi INGV coinvolti, più o meno volontariamente, nel progetto ASL: il Dott. Andrea Gasparini che, grazie alla sua disponibilità, ha reso possibile il completamento della campagna di gas radon nei suoli, la Dott.ssa Monia Procesi che gentilmente ha fornito la mappa geologica e il Dott. Gianfranco Galli che ha analizzato tutti i canestrini a carboni attivi nel suo laboratorio.

Bibliografia

- Agnesod G., Bianchi A.R., Bochicchio F., Denaro L., Erba P., Grandi C., Minach L., Trevisi R., Trotti F., (2007). *Il radon in Italia: guida per il cittadino*. ISPeSL - Dipartimento di Medicina del Lavoro. Quaderni per la salute e la sicurezza. ISBN 978-88-6230-026-1.
- Bertagna G., (2013). *Lavoro scuola apprendistato: idee per un rilancio dell'istruzione e della formazione*. Prospettiva EP, 3, settembre-dicembre, pp. 23-38.
- APAT, (2003) - *Annuario dei dati ambientali*. Edizione 2003, 120 pp.
- Bourdon B., Turner S., Henderson G.M., Lundstrom C.C., (2003). *Introduction to U-series geochemistry*. In: "Uranium-series geochemistry", Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 52, 1-21.
- Catelluccio M., Giannella G., Lucchetti C., Moroni M., Tuccimei P., (2012). *La classificazione della pericolosità radon nella pianificazione territoriale finalizzata alla gestione del rischio*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 2, 1-13.
- Dalrymple R., Kemp C., Smith P., (2014). *Characterizing Work-Based Learning as a Triadic Learning Endeavour*. Journal of Further and Higher Education, 38 (1), 75-89.
- Decreto Legislativo 15 aprile 2005, n. 77. "Definizione delle norme generali relative all'alternanza scuola-lavoro, a norma dell'articolo 4 della legge 28 marzo 2003, n. 53". Gazzetta Ufficiale n. 262 del 11/11/2003.
- Di Giosa A.D., Torri G., Sotgiu A.M., Salvi F., Innocenzi V., Leone P., (2013). *Il monitoraggio del gas radon nel Lazio*. ARPA Lazio - ISPRA, 2013
- Direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio, del 5 dicembre 2013, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L13, 17/01/2014. ISSN 1077-0707.

- Galli G., Guadoni C., Mancini C., (1999). *Radon grab sampling in water by means of radon transfer in activated charcoal collectors*. Il Nuovo Cimento, 22C, 3-4.
- Gibbs P. and Armsby P., (2010). *Higher Education Quality and Work-Based Learning: Two Concepts Not yet Fully Integrated*. Quality in Higher Education, 16 (2), 185-187.
- Gentili C., (2013). *Scuola e impresa. Teorie e casi di partnership pedagogica*. Vol. 6, Franco Angeli Editore.
- Gentili C., (2016). *L'alternanza scuola-lavoro: paradigmi pedagogici e modelli didattici*. Nuova Secondaria, 10, Anno XXXIII
- Hinkle, M., 1994. *Environmental conditions affecting concentrations of He, CO₂, O₂ and N₂ in soil gases*. Appl. Geochem. 9, 53-63.
- ISPRA <http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/radioattivita-ambientale/Radon/la-situazione-in-italia>.
- ISS (2013). *Il radon e i suoi effetti sulla salute*. In: Il Piano Nazionale Radon per la riduzione del rischio di tumore polmonare in Italia. Ministero della Salute.
- Legge 28 marzo 2003, n.53. "Delega al Governo per la definizione delle norme generali sull'istruzione e dei livelli essenziali delle prestazioni in materia di istruzione e formazione professionale". Gazzetta Ufficiale n. 77 del 02 Aprile 2003.
- Legge 13 luglio 2015, n. 107 "Riforma del sistema nazionale di istruzione e formazione e delega per il riordino delle disposizioni legislative vigenti". (15G00122) Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.162 del 15-07-2015.
- Liotta M. and Martelli M., (2012). *Dissolved gases in brackish thermal waters: an improved analytical method*. Geofluids, 12, 236-244.
- Loiodice I., (2009). *Orientamenti, teorie e pratiche per la formazione permanente*. Progedit, Bari.
- Margiotta U., (2006). *Il significato dell'alternanza oggi*. In: Margiotta U. e Tortorici G., ASL Compendio, 27-39. Siracusa: Rete Scuola Sicilia.
- Miesch A.T., (1981). *Estimation of the geochemical threshold and its statistical significance*. J. Geochem. Explor., 16, pp. 49-76.
- Morselli D. and Costa M., (2014). *Il laboratorio di attraversamento dei confini nell'alternanza scuola-lavoro*. RICERCAZIONE: Ricerca educativa, valutativa e studi sociali sulle politiche e il mondo giovanile, 6, (2), 193-209.
- Pace B., Vighi R., Ricci G., Moretti M., (1955). *Caere. Scavi di Raniero Mengarelli*. Monumenti Antichi Lincei, XLII, Roma.
- Richon P., Perrier F., Koirala B.P., Girault F., Bhattarai M., Sapkota S.N., (2011). *Temporal signatures of advective versus diffusive radon transport at a geothermal zone in Central Nepal*. Journal of Environmental Radioactivity, 102, 88-102.
- Sinclair, A.J., (1991). *A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plots revisited*. J. Geochem. Explor. 41, 1-22.
- Stefanelli P., Carmisciano C., Pistelli A., Tosi D., (2014). *L'alternanza scuola-lavoro all'INGV: 2010/2014, un'esperienza quinquennale nella divulgazione scientifica*. Quaderni di Geofisica, 122.
- Voltattorni N., Lombardi S., Rizzo S., (2010). *²²²Rn and CO₂ soil-gas geochemical characterization of thermally altered clays at Orciatico (Tuscany, Central Italy)*. Applied Geochemistry 25, 1248-1256.
- Zarlenga F., (2009). *Le ricerche condotte dall'ENEA fra il 1976 e il 1991 sul confinamento geologico delle scorie radioattive a lunga vita e ad alta attività*. Rapporto tecnico. <http://hdl.handle.net/10840/4129>.

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Francesca DI STEFANO, Rossella CELI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

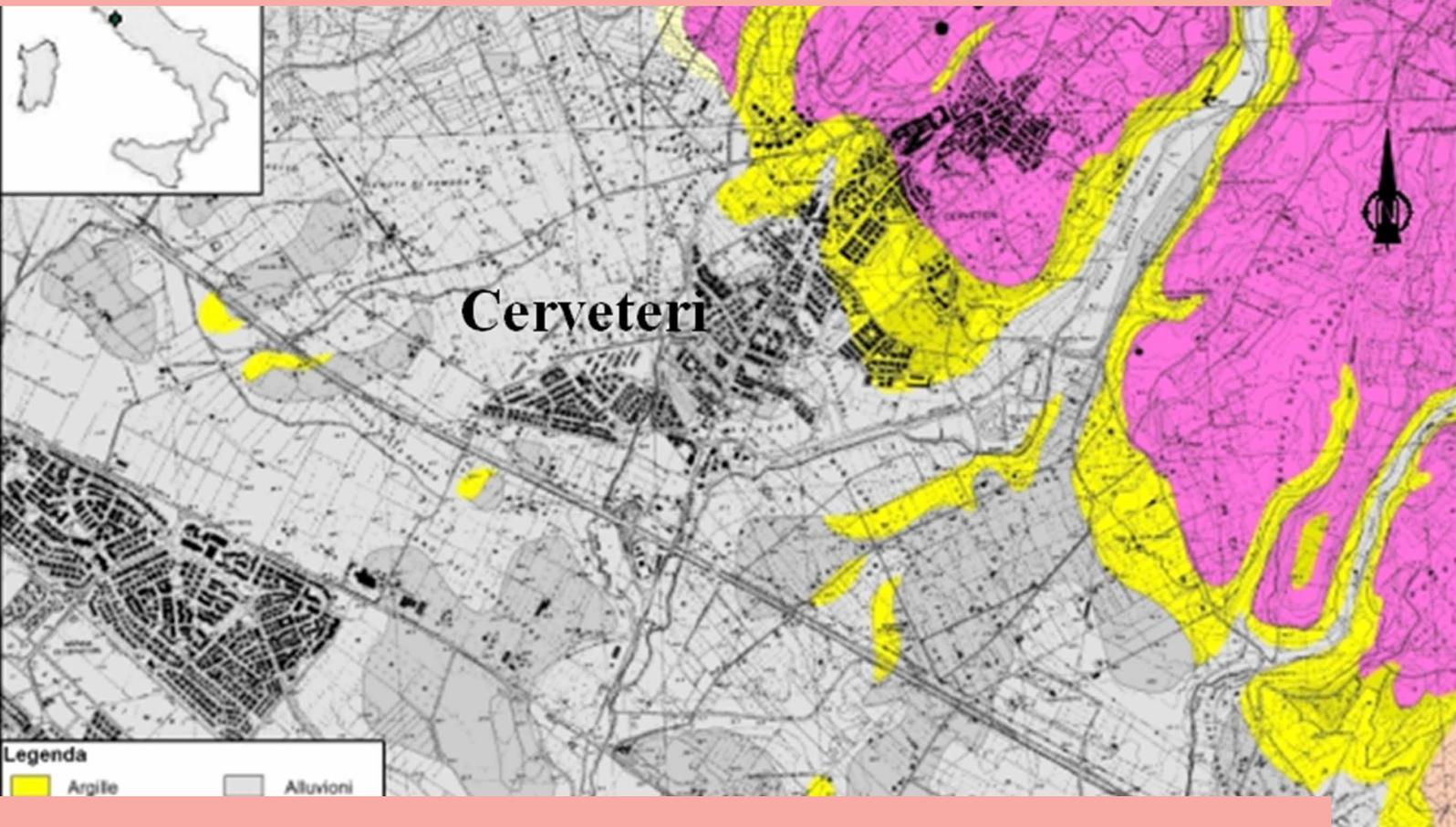
Progetto grafico e impaginazione

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

©2019

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

