



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI ECONOMIA “GIORGIO FUÀ”

Corso di Laurea triennale in Economia Aziendale

**EMISSIONE ANOMALA DI RADON
COME FENOMENO ANTICIPATORE DI
TERREMOTI**

**ANOMALY EMISSION OF RADON AS
SEISMIC PRECURSOR**

Relatore:
Prof. Palomba Giulio

Rapporto Finale di:
Piergallini Alessandro

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

- 1. INTRODUZIONE**
- 2. EVENTI SISMICI: PROBLEMI E POSSIBILI PREVISIONI**
 - 2.1 DANNI ECONOMICI PROVOCATI DAI TERREMOTI**
 - 2.2 RELAZIONE TRA RADON ED EVENTI SISMICI**
- 3. MODELLO ECONOMETRICO PER LA PREVISIONE DI EVENTI SISMICI**
- 4. CONCLUSIONI**
- 5. BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI**

1.INTRODUZIONE

Il sistema economico di un paese è soggetto a continui cambiamenti, alcuni prevedibili e costanti, altri molto più improvvisi e violenti, come ad esempio gli effetti generati dai disastri naturali, quali i terremoti.

È necessario comprendere come esaminare i dati derivanti dalle scosse sismiche, come ad esempio l'analisi della magnitudo che è calcolabile attraverso due scale di analisi: Richter¹ e Mercalli².

La prima è una scala logaritmica decimale³ che misura la quantità totale di energia rilasciata da un terremoto, trasmessa su un sismografo. La scala Mercalli, invece, è composta da 12 livelli crescenti in intensità, indicati con numeri romani, che descrivono gli effetti sulle persone, sulle strutture e sull'entità dei danni a partire dal primo livello, impercettibile scuotimento, all'ultimo, distruzione catastrofica.

Il seguente elaborato ha l'obiettivo di analizzare, nel primo capitolo, quali sono i danni che un terremoto può generare e come interpretare un'emissione anomala di radon come fenomeno anticipatore di eventi sismici. Nel terzo capitolo sarà mostrata un'applicazione empirica sul tema.

¹ Charles Francis Richter (1900 – 1985) è stato un fisico e sismologo statunitense che ha dato il nome alla famosa scala sismica di misurazione del magnitudo.

² Giuseppe Mercalli (1850 – 1914) è stato un geologo e sismologo che ha ideato una scala per la misurazione dell'intensità macrosismica di un terremoto attraverso l'osservazione dei danni.

³ Il passaggio da un grado a quello successivo all'interno della scala Richter indica un aumento dello scuotimento 10 volte superiore quello precedente. Ad esempio, una scossa pari al grado 6.0 ha un'intensità superiore di 10 volte quella di grado 5.0.

2. EVENTI SISMICI: PROBLEMI E POSSIBILI PREVISIONI

Nell'analisi di un evento sismico, è importante considerare una moltitudine di fattori utili sia per definire l'impatto del terremoto in una determinata zona, sia per prevedere e prevenire i disastri che potrebbe generare. In questo capitolo andremo a definire, nel primo paragrafo, i principali elementi in relazione ai danni, soprattutto economici, generati da un terremoto. Nel secondo paragrafo analizzeremo il radon come principale fenomeno da tenere in considerazione per cercare di prevedere un evento sismico.

2.1 DANNI ECONOMICI PROVOCATI DAI TERREMOTI

Il sistema economico di un paese può subire molti cambiamenti a causa di un evento improvviso quanto disastroso come il terremoto. Per riuscire a quantificare i danni che un evento sismico può mediamente generare, è importante analizzare diversi aspetti, quali la numerosità della popolazione, la localizzazione rispetto all'epicentro, la sicurezza strutturale degli edifici, la magnitudo e la profondità della scossa. Nella nostra analisi dei danni economici è quindi utile esaminare alcuni dati storici, per andare alla ricerca di similarità e aspetti chiave che possano aiutarci nella quantificazione dei danni.

Dal sito National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) è possibile ricavare un database sui terremoti in ogni luogo del mondo e limitare la ricerca anche a zone specifiche, così da effettuare un'analisi più mirata.

Esaminiamo al momento solamente le scosse di terremoto più rilevanti dal 1980 ad oggi, proposte dal sito NOAA, riguardanti l'Italia, che per la sua localizzazione e conformazione è altamente soggetta a frequenti scosse sismiche.

Nella *tabella 1* sono presenti: i danni espressi in milioni di Dollari USD, il numero di morti e feriti, la magnitudo, il livello di profondità, la localizzazione dell'epicentro, la data e l'ora nella quale si è verificata la scossa di terremoto.

Date	Hours	Location	Focal Depth(km)	Magnitude	Deaths	Injuries	Damage (\$Mil)
23/11/1980	18:34	Avellino, Potenza, Caserta, Naples	20	6.9	4689	7700	20000
14/02/1981	17:27	Avellino	10	4.6	12	0	0.5
17/10/1982	10:56	Perugia	16	4.4	0	0	35
29/04/1984	05:03	Perugia, Assisi, Gubbio	12	5.3	3	200	25
07/05/1984	17:49	Abruzzo	10	5.8	3	100	5
13/12/1990	00:24	Sicily: Carlentini	11	5.3	19	200	500
26/09/1997	09:40	Marche: Umbria	10	6	14	100	4524.9
06/09/2002	01:21	Sicily:Palermo	5	6	2	20	500
31/10/2002	10:32	San Giuliano di Puglia: Campobasso	10	5.7	29	135	796
06/04/2009	03:32	L'Aquila	9	6.3	309	1500	2500
29/05/2012	07:00	Emilia Romagna: Medolla, Mirandola, Cavezzo	10	5.9	17	350	15800
24/08/2016	03:36	Accumoli, Arquata, Amatrice	4	6.2	299	368	5000
30/10/2016	06:40	Norcia	9	6.6	2	20	200
18/01/2017	14:09	Farindola	9	5.7	34	11	18
26/12/2018	02:19	Sicily: Catania	10	5.1	0	28	115

Tabella 1 – Earthquakes, Southern Europe, Italy, Fonte: NOAA

In una prima analisi della *Tabella 1* notiamo che le scosse che hanno generato più danni in queste 15 osservazioni sono: quella dell'Irpinia il 23 novembre del 1980, dell'Umbria il 26 settembre 1997 e il terremoto dell'Emilia il 29 maggio 2012 con rispettivamente magnitudo pari a 6.9, 6.0 e 5.9 nella scala Richter. Risulta quindi esserci un'iniziale correlazione tra danni e magnitudo, però non possiamo dire che necessariamente un alto grado nella scala Richter generi sempre ingenti danni. Notiamo infatti che ci sono alcuni eventi sismici che, nonostante siano di grado 6.0, abbiano generato dei danni inferiori rispetto ad altre scosse di pari magnitudo. Ad esempio, la scossa di magnitudo 6.0 del 6 settembre 2002 a Palermo ha generato danni molto inferiori rispetto alla scossa dell'Emilia nel 2012 di magnitudo 5.9.

Un confronto molto interessante è fra il terremoto che ha colpito Amatrice il 24 agosto del 2016, con magnitudo 6.2, e il terremoto dell'Aquila il 6 aprile 2009 di magnitudo 6.3. Entrambe le zone sono state profondamente colpite e notiamo che la scossa di Amatrice ha generato il doppio dei danni rispetto alla scossa dell'Aquila. Per quanto riguarda i decessi, invece, le scosse hanno avuto un impatto abbastanza simile nelle due zone: ad Amatrice 299 morti, all'Aquila 309. Nonostante abbiamo due zone colpite da scosse di pari magnitudo, notiamo che i danni sono stati molto superiori laddove c'è stata una scossa leggermente inferiore. È necessario, dunque, evidenziare la situazione nella quale si trovavano i due paesi. Innanzi tutto entrambe le scosse sono avvenute a notte fonda, verso le

3:30, in un orario nel quale la maggior parte degli abitanti si trovava nella propria abitazione a dormire, completamente inermi a un evento sismico violento e soprattutto improvviso.

Un altro aspetto molto importante è la stagione nella quale avvengono i due terremoti presi in esame. Il terremoto avvenuto ad Amatrice (Ri) ha generato molti più danni e un consistente numero di morti, paragonabile quantitativamente a quelli dell'Aquila, per un motivo particolare: è avvenuto in piena stagione turistica, infatti il numero delle vittime ad Amatrice è stato particolarmente alto perché il terremoto è avvenuto ad agosto. Per quanto riguarda i danni, la scossa del 24 agosto ha distrutto diversi comuni, oltre quello di Amatrice anche quelli di Accumoli (AP) e Arquata del Tronto (AP).

Semplicemente analizzando la *Tabella 1*, comprendiamo come non sia sempre semplice stimare ed interpretare correttamente quali siano i danni e cercare di generalizzarli.

La nostra analisi non può limitarsi solamente ai danni generati dal terremoto nel momento della scossa, ossia decessi, feriti, crolli di strutture, comuni e abitazioni. Bisogna anche tener presente che le zone colpite da un evento sismico subiscono un forte impatto sia sul sistema economico che su quello psico-fisico degli abitanti, i quali iniziano a cambiare il loro paniere di beni per poter sopravvivere.

Da ciò quando parliamo dei danni economici è necessario anche studiare come viene modificato nel breve e lungo periodo il comportamento economico degli abitanti della zona colpita e dintorni.

In merito all'analisi di alcuni degli effetti di lungo periodo, è utile leggere l'intervento di Signorini (2017), Vice Direttore Generale della Banca d'Italia e Presidente dell'Istituto per la Vigilanza sulle Assicurazioni (IVASS).

Nell'intervento vengono esposti gli effetti immediati di un sisma quali: distruzione di capitale, interruzione di molte attività produttive, commerciali e blocco di servizi e comunicazioni. Nel lungo periodo, invece, bisogna tener presente gli effetti sul capitale umano poiché le ricostruzioni, oltre a richiedere molte risorse per via dei costi elevati, richiedono molto tempo e ciò può indurre una parte della forza lavoro a trasferirsi in altre regioni. Si evidenzia anche una modifica nelle preferenze degli agenti economici che, a causa del terrore provato nel momento della scossa sismica, hanno sviluppato un comportamento avverso al rischio. Questo comportamento è molto comune tra le persone che hanno avuto esperienza di un disastro naturale, però non possiamo generalizzare. Esistono altri studi che hanno dimostrato una diversa risposta, molto interessante, agli eventi sismici.

Ad esempio, dallo studio condotto da Chen, Filipski e Zhang (2019) della International Food Policy Research Institute (IFPRI), si è notato che presso la provincia cinese del Sichuan, colpita da un terremoto nel 2008, il comportamento economico degli abitanti discostava nettamente dalle loro previsioni. Ipotizzavano che a causa della distruzione generata dal terremoto di magnitudo 7.9 presso la contea di Wenchuan, provincia di Sichuan, gli abitanti iniziassero ad adottare dei comportamenti economici di protezione e avversione al rischio, quali il risparmio. Nelle zone vicine all'epicentro, invece, i ricercatori esaminarono che, nonostante non ci siano state rilevanti variazioni di reddito, le persone tendevano a diminuire i loro risparmi, aumentare il consumo di alcool e giocare a mahjong, un noto gioco da tavola locale. Ne segue che gli abitanti, ormai psicologicamente segnati dalle perdite e dalle distruzioni causate dal terremoto, hanno cominciato a vivere ogni giorno come se fosse l'ultimo. Non sono più preoccupati a risparmiare poiché non pensano alla propria vita in una prospettiva di lungo periodo, ma come se potesse terminare improvvisamente.

Questi sono alcuni dei danni che un evento sismico può generare e si evidenzia quanto venga profondamente segnato un paese. La ripresa è possibile, ma richiede tempo e resistenza da parte degli abitanti delle zone colpite e sostegno da parte dello Stato e di istituti quali la Commissione Europea⁴. È importante, anche se difficile, continuare ad analizzare gli eventi sismici per individuare politiche di prevenzione, minimizzazione dei danni e ripresa economica rapida ed efficace.

2.2 RELAZIONE TRA RADON ED EVENTI SISMICI

Per minimizzare i danni che un terremoto può generare, è necessario, innanzitutto, attuare delle politiche di prevenzione quali un maggior controllo delle aree soggette ad alta intensità sismica e una ristrutturazione delle abitazioni per ridurre crolli, morti e feriti. Tali prevenzioni sono necessarie, ma non sempre sufficienti poiché è importante anche individuare dei fattori che possano aiutarci a prevedere l'impatto di un evento sismico, così da far evacuare le zone e mettere in sicurezza gli abitanti. In questo elaborato analizzeremo come principale fenomeno anticipatore di terremoti il radon.

Il radon è un gas naturale prodotto nel suolo dal decadimento radioattivo del radio, generato a sua volta dal decadimento radioattivo dell'uranio.

⁴ Nel sito ufficiale dell'Unione Europea è possibile ricercare gli "Aiuti di Stato" nei quali si riporta che la Commissione ha approvato 44 milioni di € a sostegno della ripresa economica nelle regioni italiane colpite dai terremoti nel 2016 e 2017.

Diversamente dal radio e dall'uranio, che sono fissati nella roccia e nel suolo, il radon ha una mobilità maggiore per il suo stato gassoso e può facilmente passare attraverso fratture, aperture e gli strati porosi presenti nelle rocce e nel suolo. Nelle zone a rischio sismico il suolo subisce continuamente deformazioni e compressioni che creano una moltitudine di crepe e fratture, permettendo così una maggiore emissione del radon. Ci sono molti studi, che analizzeremo in questo paragrafo, che mostrano la forte relazione tra emissione di radon ed eventi sismici, senza però dimenticare anche l'influenza dei parametri meteorologici.

Nella ricerca, condotta da Gosh, Deb e Sengupta (2009) sono riportate delle analisi di altri ricercatori che mostrano la relazione esistente tra emissione di radon e terremoti.

Ad esempio, in Giappone si analizzò una correlazione positiva tra il cambiamento giornaliero della concentrazione di radon e gli eventi sismici nei pressi di Tottori (Okabe, 1956).

In America, alcune analisi sulla faglia di Sant'Andrea e di Hayward – Calaveras mostrarono delle anomalie di radon, con un'emissione del 60% superiore del valore medio, durante due eventi sismici di magnitudo rispettivamente 4.3 e 4.0 (King, 1978).

In Italia, un'analisi presso le Grotte di Villanova, nella provincia di Udine, mostrò una variazione della concentrazione di radon durante gli eventi sismici verificatisi nel periodo dicembre 1996 – marzo 1997 (Garavaglia et al., 1998). Anche presso

l'Etna è stata riscontrata un'anomalia del radon associata all'attività sismica e vulcanica (Delfa et al., 2007).

In Italia, oltre alle analisi proposte dalla ricerca di Dipak Ghosh et al. (2009), ha avuto un ruolo importante Giampaolo G. Giuliani, ex tecnico dell'Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso, nell'analisi della relazione tra radon ed eventi sismici, soprattutto per il terremoto che colpì L'Aquila il 6 aprile del 2009.

Dalle ricerche di Giuliani si riscontra che un'emissione anomala di radon, spesso è legata a un potenziale e imminente terremoto, ma non è sempre possibile individuare l'epicentro, al massimo si determina il raggio d'azione entro cui potrebbe verificarsi. Ad esempio, Giuliani il 29 e 30 ottobre 2002 rilevò un'emissione anomala di radon e avvertì l'assessore abruzzese dell'imminenza di un forte sisma. Il problema fu l'individuazione dell'epicentro, poiché con l'utilizzo di un unico rilevatore, Giuliani riuscì solamente ad individuare l'evento sismico entro il raggio d'azione dello strumento. Il terremoto, come previsto, avvenne il giorno dopo la rilevazione delle anomalie di emissione del radon, il 31 ottobre 2002, con magnitudo 5.7 e colpì il Molise, con epicentro presso San Giuliano di Puglia, a Campobasso (vedi *Tabella 1*).

Notiamo quindi che, nonostante Giuliani avesse previsto un potenziale terremoto, non è stato possibile individuare con esattezza l'epicentro e far evacuare le zone in tempo, causando circa 29 morti presso Campobasso.

Lo stesso problema si è verificato per il terremoto che ha colpito L'Aquila.

Il 29 marzo del 2009 Giuliani, sempre analizzando un'emissione anomala di radon, prevede l'imminenza, nel pomeriggio dello stesso giorno, di una forte e disastrosa scossa di terremoto nei pressi di Sulmona e avvertì il sindaco, causando agitazione tra i cittadini. Il 29 marzo, però, non ci fu nessuna scossa e Giuliani ricevette un avviso di garanzia per procurato allarme, dal quale venne successivamente prosciolto poiché fu dimostrato, dai dati che analizzò, che il rischio di un terremoto non fosse inesistente. Però il 6 aprile del 2009, ci fu il disastroso terremoto che colpì L'Aquila, in linea con le sue previsioni riguardanti però Sulmona. Dobbiamo però precisare che lo stesso Giuliani smentì la voce riguardo a una sua seconda previsione di una forte scossa il 6 aprile a Sulmona anziché all'Aquila.

Gli esempi riguardanti il Giappone, l'America e l'Italia mostrano alcuni casi empirici di relazione tra un'emissione anomala di radon e i terremoti. È importante, però, analizzare nello specifico in che modo il radon si relaziona con l'attività sismica e quali variabili tenere in considerazione.

Dalla ricerca condotta da Riggio e Santulin (2015), viene mostrato come analizzare un'emissione di radon, per poi relazionarla a potenziali attività sismiche.

Da una misurazione continua della concentrazione di radon nel sottosuolo per un lungo periodo, è possibile classificare l'emissione di radon in due differenti categorie:

1. Tipo A (Friedmann, 2012): lento cambiamento della concentrazione di radon che può continuare anche per diversi anni.
2. Tipo B: emissioni anomale di radon che si manifestano molto più rapidamente, rispetto al tipo A, e possono essere seguite da un lento e costante aumento, oppure da brevi picchi della concentrazione di radon della durata di ore o giorni. Spesso questi picchi sono seguiti da un evento sismico entro una decina di giorni dalla loro rilevazione.

Nella nostra analisi ci interessa particolarmente l'emissione di tipo B, ovvero un'emissione anomala di radon, per prevedere l'impatto di un potenziale evento sismico.

Purtroppo l'analisi delle anomalie non è semplice ed immediata, anzi i ricercatori Riggio e Santulin (2015) hanno individuato le seguenti problematiche:

- Definizione dell'anomalia: analizzare se si tratta di un'anomalia significativa oppure di una piccola ed isolata singolarità. Per la sua individuazione può essere utilizzato il "*method of the 2 sigma*", nel quale un'anomalia di radon può essere considerata significativa se il suo valore differisce dalla media di circa ± 2 deviazioni standard (σ).

- Individuazione della distanza massima tra l'epicentro di un terremoto e il sito in cui si osserva l'anomalia di radon: uno dei problemi principali è, appunto, la localizzazione dell'epicentro. Raramente la localizzazione del sito, nel quale si riscontra un'anomala emissione di radon, corrisponde con l'epicentro del terremoto. Il percorso tramite il quale il radon raggiunge la superficie è costituito da fessure e fratture nel sottosuolo, dunque è un percorso non lineare. Ne segue che il sito nel quale si rileva l'anomalia è spesso molto distante dal punto in cui il radon ha avuto origine. È però possibile individuare un raggio d'azione entro il quale è più probabile che si verifichi l'evento sismico, attraverso la relazione di Hauksson e Goddard (1981):

$$M \geq 2.4 \log(D) - 0.43$$

dove “*M*” indica la magnitudo minima, nella scala Richter, per ottenere un'anomalia di radon a una distanza “*D*” espressa in chilometri (km).

Tale relazione fornisce informazioni sull'area interessata dalla deformazione del sottosuolo che precede un evento sismico di magnitudo *M*, individuando la distanza *D* dalla quale è possibile individuare l'anomalia di radon.

- Definizione del tempo precursore: ovvero il tempo che intercorre tra l'anomalia del radon e la scossa di terremoto.

- Importanza della struttura tettonica: la mobilità del radon, nel sottosuolo, varia a seconda della composizione del terreno e della presenza di fratture. Ad esempio, il radon si muove più rapidamente in terreni permeabili, come sabbia e ghiaia.

La ricerca condotta da Gosh, Deb e Sengupta (2009), pone attenzione anche al fattore meteorologico nell'analisi dell'emissione anomala di radon.

I parametri meteorologici che più influiscono nella misurazione del radon sono: l'umidità del suolo, le precipitazioni, la temperatura e la pressione atmosferica. In inverno si riscontra (Kovach, 1944 – 1945) una concentrazione di radon nel sottosuolo più alta rispetto ad altre stagioni, poiché la diluizione del gas nell'aria si riduce a causa dell'aumento dell'umidità nel suolo e delle precipitazioni.

Nella stagione invernale, l'umidità genera un aumento dell'emissione del radon dal sottosuolo, ma a causa dell'aumento delle precipitazioni si ha una riduzione della porosità delle rocce e ne segue che aumenta la concentrazione e non l'emissione di radon. Da un'altra ricerca condotta da Kovach (1945) si riscontra anche una riduzione della concentrazione di radon nel sottosuolo a causa di un aumento della pressione barometrica.

I cambiamenti di pressione, però, non devono essere considerati necessariamente un fattore meteorologico, poiché possono essere causati dall'accumulo di stress nel sottosuolo prima di un evento sismico. In un'area soggetta a continui cambiamenti sismici, l'accumulo di stress, dovuto dallo spostamento continuo

delle placche terrestri, genera una compressione del volume dei pori e continue deformazioni della composizione del sottosuolo, aprendo nuove fratture tramite le quali il radon raggiunge più facilmente lo strato poroso vicino alla superficie. Dalla compressione dei pori, il radon riesce a fuoriuscire e ne segue un aumento dell'emissione del gas dal sottosuolo. Si mostra, dunque, che un aumento della pressione generi una riduzione della concentrazione del gas nel sottosuolo, o un aumento della sua emissione.

Il problema è come interpretare un aumento della pressione barometrica, se considerarlo un fattore meteorologico o un fenomeno anticipatore di un potenziale terremoto. È importante, dunque, considerare una seconda variabile: la temperatura del suolo.

Dalla seconda legge isocora⁵ di Gay-Lussac (1802), *“a volume costante, la pressione di un gas è direttamente proporzionale alla sua temperatura assoluta”*, ne segue che un aumento della temperatura genera un aumento della pressione.

In relazione ai terremoti è possibile analizzare la correlazione tra pressione atmosferica e temperatura del suolo per avere una maggiore chiarezza sulla causa generatrice di un'emissione anomala di radon. Se, ad esempio, rilevassimo un aumento della pressione barometrica, che genera un'elevata fuoriuscita del gas, laddove la temperatura del suolo è più elevata rispetto alla media, potremmo

⁵ In un sistema termodinamico, una trasformazione è definita isocòra quando si ha una trasformazione del sistema nel quale il volume rimane costante.

presupporre che sia più probabile che l'anomalia sia stata causata da un fenomeno meteorologico. Precisiamo, però, che non avremo mai la certezza sulla natura effettiva dell'emissione del radon. Può succedere che, in una giornata particolarmente calda, l'anomalia sia in realtà premonitrice di una scossa sismica, nonostante avessimo previsto una causa meteorologica.

3. MODELLO ECONOMETRICO PER LA PREVISIONE DI EVENTI SISMICI

In questo capitolo analizzeremo un *dataset* utile per esaminare la concentrazione di radon nel sottosuolo come fattore utile per la previsione di eventi sismici. Nel paragrafo “*Relazione tra radon ed eventi sismici*”, abbiamo analizzato i vari studi condotti sull’emissione di radon, mostrando una relazione con gli eventi sismici, ma anche con il fattore meteorologico.

Nella nostra indagine sarà necessario analizzare il fattore meteorologico per verificare l’ipotesi se effettivamente le anomalie sulla concentrazione di radon siano riconducibili principalmente ad un’attività sismica.

L’analisi verterà su un *dataset* di 637 osservazioni giornaliere, dal 5 aprile 2007 al 31 dicembre 2008, sulla concentrazione di radon nel sottosuolo rilevata presso l’isola di Stromboli in Sicilia (Eolie), in relazione alla temperatura del suolo e alla pressione barometrica, entrambe utili per la verifica della presenza o meno del fattore meteorologico. Nella raccolta dei dati è stata rilevata la concentrazione del ^{222}Rn , ovvero del Radon – 222, l’isotopo più stabile del radon con un’emivita, ovvero tempo di decadimento, di 3.8 giorni.

Nella nostra indagine sarà dunque importante considerare che la concentrazione del radon analizzata nel giorno t sia influenzata anche dall’emissione del gas rilevata nei giorni precedenti ($t-1$, $t-2$, ...).

La nostra è un'analisi di serie storiche (*time series*) e di seguito sono mostrati i grafici, che descrivono la raccolta giornaliera dei dati, nei quali l'ordinata corrisponde alla variabile che andiamo ad analizzare e l'ascissa rappresenta il tempo.

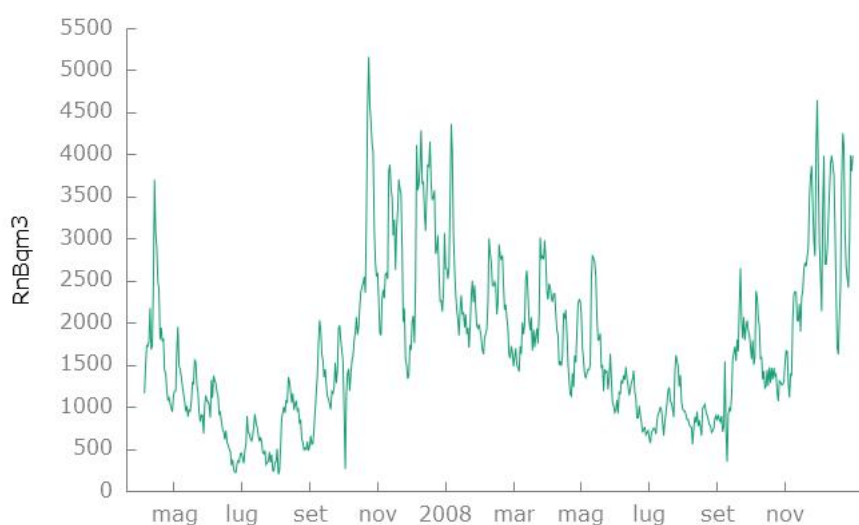


Grafico 1 – Grafico della serie storica della concentrazione del radon

Nel *Grafico 1* la variabile “*RnBqm3*” rappresenta la concentrazione di Radon-222 nel sottosuolo con unità di misura Bq/m^3 (Becquerel per metro cubo).

Il Becquerel indica il numero di decadimenti radioattivi che avvengono in un secondo in un metro cubo di aria all'interno di alcuni materiali come il radio e l'uranio, dai quali viene emesso il radon.

Il *Grafico 1* mostra un notevole aumento della concentrazione di radon nel sottosuolo durante i periodi autunnali (settembre – dicembre) e invernali

(dicembre – marzo), in accordo con gli studi condotti da Kovach (1944 – 1945) esaminati nel capitolo precedente.



Grafico 2 – Grafico della serie storica della temperatura del suolo

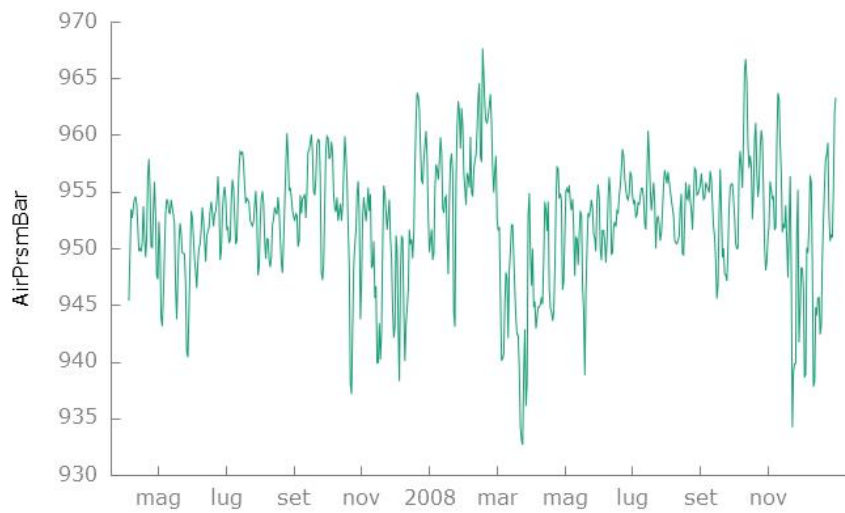


Grafico 3 – Grafico della serie storica della pressione barometrica

Nel *Grafico 2* “*SoilTC*” rappresenta la temperatura in °C sul suolo e nel *Grafico 3* “*AirPrsmBar*” rappresenta la pressione atmosferica (o barometrica) espressa in millibar (mBar ovvero 10^{-3} Bar).

La *Tabella 2* esprime le statistiche descrittive per avere una maggior chiarezza sulle variabili da analizzare nel modello econometrico delle serie storiche.

Il termine “*SQM*” indica lo scarto quadratico medio (σ).

Variabile	Minimo	Massimo	Mediana	Media	SQM
RnBqm3	206.84	5165.90	1537	1731.40	951.51
SoilTC	9.48	28.82	18,62	18.82	5.59
AirPrsmBar	932.72	967.70	953,1	952.38	5.39

Tabella 2 – Statistiche descrittive delle variabili prese in esame

Esaminiamo poi i grafici di dispersione per un’interpolazione tra i punti, ovvero per determinare un’eventuale funzione di regressione che approssimi al meglio i dati rilevati giornalmente che costituiscono la “nuvola di punti”.

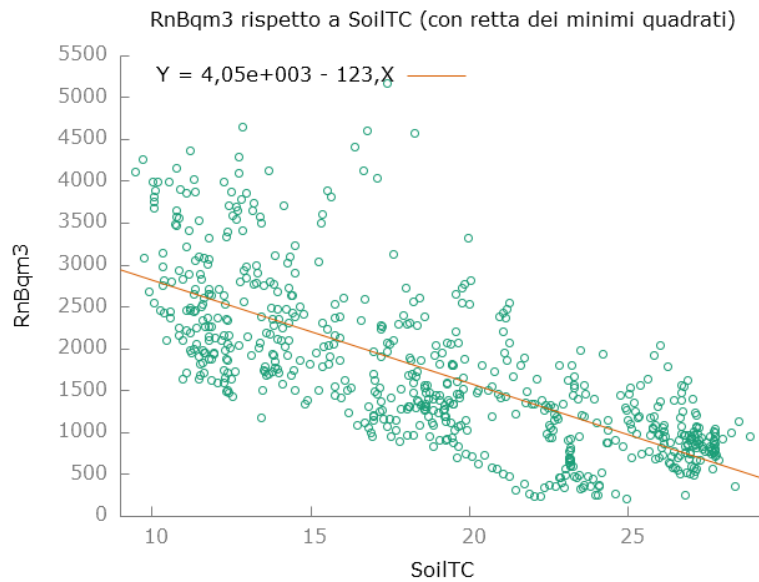


Grafico 4 – Grafico di dispersione delle emissioni di radon rispetto alla temperatura del suolo

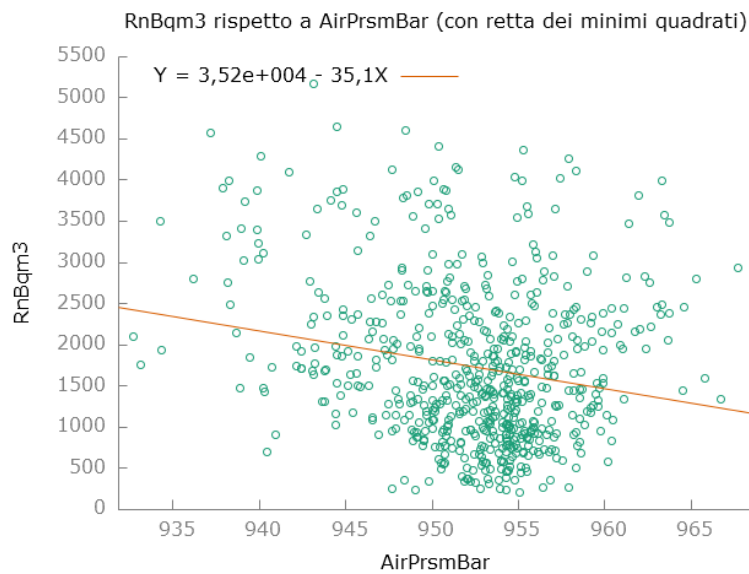


Grafico 5 – Grafico di dispersione delle emissioni di radon rispetto alla pressione atmosferica

I *Grafici 4 e 5* mostrano i grafici di dispersione considerando la concentrazione di radon come variabile dipendente. Nei due grafici la retta dei minimi quadrati ha un coefficiente angolare negativo, ciò mostra che un aumento della temperatura o della pressione barometrica in media riducono la concentrazione di radon nel sottosuolo, come avevamo già analizzato nel capitolo precedente.

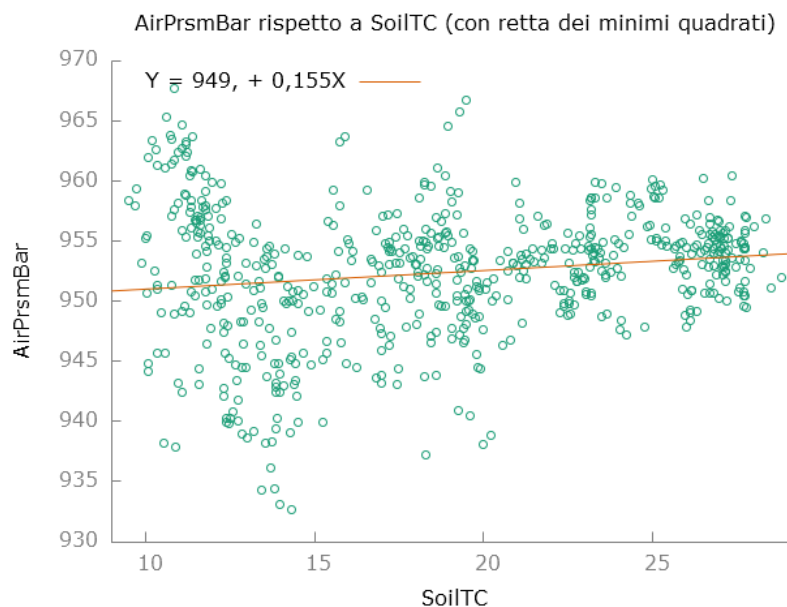


Grafico 6 – Grafico di dispersione della pressione atmosferica rispetto alla temperatura del suolo

Il *Grafico 6* mostra la retta dei minimi quadrati con variabile dipendente la pressione barometrica e variabile indipendente la temperatura del suolo. La retta ha una pendenza positiva, ne segue che un aumento della temperatura genera in media un aumento della pressione barometrica.

Dopo aver esaminato le variabili in esame, possiamo determinare un modello ADL(3,2) in forma logaritmica per poi sottoporlo ad alcuni test di specificazione. Applicando il logaritmo delle variabili della nostra indagine e due variabili *dummy* (*down* e *reb*) otterremo il modello ADL(3,2) con T = 634 osservazioni giornaliere:

$$radon_t = \mu_{const} + \sum_{i=1}^3 \varphi_i radon_{t-i} + \sum_{j=0}^2 temp_{t-j} \beta_j + \sum_{h=0}^2 air_{t-h} \gamma_h + down_t + reb_t + \varepsilon_t$$

dove:

- $\varepsilon_t \sim WN(0, \sigma^2)$ è un'innovazione omoschedastica,
- $radon = \ln(RnBqm3)$,
- $air = \ln(AirPrrmBar)$,
- $temp = hpfilt(\ln(SoilTC))$ ovvero è stato adottato il Filtro di Hodrick-Prescott con il quale la variabile sarà analizzata come uno scostamento dall'andamento di lungo periodo di $\ln(SoilTC)$ come possiamo vedere nel seguente *Grafico 7*:

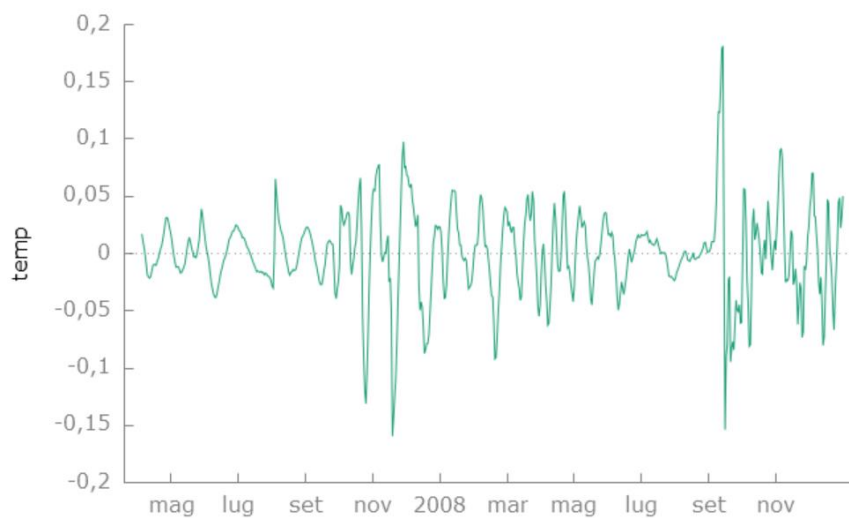


Grafico 7 – Grafico delle serie storiche dello scostamento dall'andamento di lungo periodo della temperatura del suolo in forma logaritmica

- *down* è una variabile *dummy* con valore 1 per il giorno 2007/10/02 per un possibile errore di misurazione dei dati,
- *reb* è un'altra variabile *dummy* utile per l'effetto *rebound* che scaturisce dall'inatteso ribasso del giorno prima associato alla variabile *down*.

Modello 1: OLS, usando le osservazioni 2007-04-08:2008-12-31 (T = 634)
Variabile dipendente: radon

	coefficiente	errore std.	rapporto t	p-value
const	12,1907	9,20159	1,325	0,1857
radon_1	0,899741	0,0383098	23,49	8,27e-088 ***
radon_2	-0,0240393	0,0482304	-0,4984	0,6184
radon_3	0,0957733	0,0360760	2,655	0,0081 ***
temp	-1,93522	0,413657	-4,678	3,55e-06 ***
temp_1	1,81669	0,654131	2,777	0,0056 ***
temp_2	0,796603	0,432132	1,843	0,0657 *
air	2,05529	2,14949	0,9562	0,3394
air_1	-9,76378	3,09870	-3,151	0,0017 ***
air_2	5,96175	2,16954	2,748	0,0062 ***
down	-1,18105	0,163644	-7,217	1,55e-012 ***
reb	1,26542	0,170221	7,434	3,51e-013 ***
Media var. dipendente	7,293868	SQM var. dipendente	0,603037	
Somma quadr. residui	16,23889	E.S. della regressione	0,161578	
R-quadro	0,929455	R-quadro corretto	0,928208	
F(11, 622)	745,0077	P-value (F)	0,000000	
Log-verosimiglianza	262,0839	Criterio di Akaike	-500,1677	
Criterio di Schwarz	-446,7431	Hannan-Quinn	-479,4222	
rho	-0,016338	Valore h di Durbin	-1,560327	

Figura 1 – Stima del modello ADL(3,2) con variabile dipendente il logaritmo della concentrazione di radon

La variabile dipendente è il logaritmo della concentrazione di radon nel sottosuolo al tempo *t* (*radon*) in Bq/m³, mentre i regressori sono la costante (*const*), il logaritmo naturale della temperatura del suolo in °C, il logaritmo della variabile filtrata *temp*, e il logaritmo della pressione barometrica in mBar (*air*); naturalmente vengono considerati anche i ritardi della variabile dipendente e dei

regressori. Infine, ci sono le due variabili *dummy* (*down* e *reb*) definite in precedenza. Poiché il modello utilizza i logaritmi delle serie, ad eccezione delle *dummy*, i coefficienti stimati delle variabili e dei regressori rappresentano le elasticità.

Per la variabile *temp* i parametri stimati significativi sono quelli con $j=0,1$ e per *air* $h=1,2$. Secondo il modello stimato la pressione barometrica rilevata nei 2 giorni precedenti ha un'influenza sul radon emesso al tempo t , mentre la temperatura del suolo va ad influire al tempo t e nel giorno precedente $t-1$.

Esaminiamo poi l'influenza del radon emesso nei giorni precedenti, in relazione anche al tempo di decadimento del radon di circa 3.8 giorni. I parametri stimati $\hat{\gamma}_i$ inerenti alle rilevazioni della concentrazione di radon nel sottosuolo nei 3 giorni precedenti sono significativi per $i=1,3$; ne segue che rifiutiamo H_0 con la quale si ipotizzava l'azzeramento degli stessi parametri. Il radon emesso nei 3 giorni precedenti influenza il valore rilevato al giorno t probabilmente a causa dell'emivita del gas. Da una prima analisi notiamo dunque che l'emissione del radon sia influenzata principalmente dal fattore meteorologico, poiché non esaminiamo incongruenze rispetto ai modelli teorici. Se analizziamo i segni dei soli coefficienti significativi di elasticità di ogni regressore notiamo che complessivamente si mantenga un segno negativo, in accordo con i *Grafici 4 e 5*.

Non dobbiamo però neanche sottovalutare la natura vulcanica del sito di rilevazione dei dati che potrebbe essere soggetto a frequenti movimenti delle zolle

nel sottosuolo. L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha infatti evidenziato l'inizio di una fase effusiva presso lo Stromboli dal 27 febbraio 2007. Notiamo ad esempio che il coefficiente di elasticità $\hat{\gamma}_0$ del regressore *air* non sia significativo e dunque che la pressione barometrica registrata al tempo *t* non vada ad influire sull'emissione del radon al tempo *t*, ciò potrebbe rilevare una differenziazione dal modello teorico e suggerire una relazione con un ipotetico movimento tettonico tipico della zona vulcanica di rilevazione dei dati.

L'analisi della significatività dei parametri non è però sufficiente per verificare se abbiamo determinato un modello econometrico adeguato per la nostra indagine, è necessario dunque svolgere ulteriori verifiche con dei test diagnostici e di specificazione.

```
Regressione ausiliaria per il test RESET di specificazione  
OLS, usando le osservazioni 2007-04-08:2008-12-31 (T = 634)  
Variabile dipendente: radon
```

```
Statistica test: F = 5,073478,  
con p-value = P(F(2,620) > 5,07348) = 0,00652
```

Figura 2 – Test RESET

Nella *Figura 2* è mostrato il *test RESET* (Regression Specification Error Test) che si occupa di esaminare la forma funzionale del modello e l'assenza di variabili omesse (H_0).

Poiché rifiutiamo H_0 , possiamo concludere che c'è la possibilità di variabili omesse, nonostante l'elevato valore di R^2 mostrato nella *Figura 1*.

Nell'analisi dell'emissione del radon il test potrebbe indicare che la temperatura del suolo e la pressione atmosferica non sono, come abbiamo anche mostrato nel capitolo precedente, gli unici fenomeni che influiscono nell'indagine. Ciò potrebbe anche suggerire che la concentrazione del radon abbia una relazione con altri fattori connessi ai fenomeni sismici, come ad esempio la presenza di nuove fratture nel sottosuolo che generano un aumento dell'emissione del gas.

Non conviene però terminare con il *test RESET*, è necessario svolgere altre verifiche con i test diagnostici per analizzare se il modello, nonostante l'omissione di regressori rilevanti, è comunque adeguato per la nostra indagine.

Procediamo dunque con il test di Breusch–Godfrey e di Ljung–Box per esaminare se riscontriamo delle autocorrelazioni di ordini superiori.

```
Test di Breusch-Godfrey per l'autocorrelazione fino all'ordine 7
OLS, usando le osservazioni 2007-04-08:2008-12-31 (T = 634)
Variabile dipendente: uhat

Statistica test: LMF = 1,195876,
con p-value = P(F(7,615) > 1,19588) = 0,303

Statistica alternativa: TR^2 = 8,513867,
con p-value = P(Chi-quadro(7) > 8,51387) = 0,289

Ljung-Box Q' = 5,23045,
con p-value = P(Chi-quadro(7) > 5,23045) = 0,632
```

Figura 3 – Test di Breusch-Godfrey e Ljung-Box

Considerando come ipotesi nulla H_0 l'assenza di autocorrelazione fino all'ordine 7 giorni, la *Figura 3* mostra che non rifiutiamo H_0 . Il modello risulta non mispecificato in media, quindi è attendibile per la nostra indagine, però conviene

realizzare un ultimo test per verificare anche se lo stimatore OLS determinato tramite un modello ADL(3,2) sia il Best Linear Unbiased Estimator (BLUE). Procediamo dunque con il test White e poi quello di Breusch – Pagan per verificare la quinta ipotesi classica, ovvero la presenza di omoschedasticità (H_0).

```
Test di White per l'eteroschedasticità
OLS, usando le osservazioni 2007-04-08:2008-12-31 (T = 634)
Variabile dipendente: uhat^2

R-quadro = 0,407416

Statistica test: TR^2 = 258,301518,
con p-value = P(Chi-quadro(56) > 258,301518) = 0,000000

Test di Breusch-Pagan per l'eteroschedasticità
OLS, usando le osservazioni 2007-04-08:2008-12-31 (T = 634)
Variabile dipendente: uhat^2 scalata

Somma dei quadrati spiegata = 249,032

Statistica test: LM = 124,515961,
con p-value = P(Chi-quadro(11) > 124,515961) = 0,000000
```

Figura 4 – Test di White e di Breusch-Pagan per l'eteroschedasticità

La *Figura 4* mostra un problema di eteroschedasticità nei residui, poiché il p-value rifiuta fortemente l'ipotesi nulla H_0 in entrambi i test di eteroschedasticità.

L'ultima verifica da esaminare è quella relativa all'eteroschedasticità condizionale ovvero il *test ARCH*:

Test per ARCH di ordine 7

Ipotesi nulla: non sono presenti effetti ARCH
Statistica test: LM = 120,532
con p-value = $P(\text{Chi-quadro}(7) > 120,532) = 5,93676e-023$

Figura 5 – Test ARCH

Il *test ARCH* rifiuta fortemente l'ipotesi di omoschedasticità condizionale (H_0), quindi conferma una presenza di eteroschedasticità. Ciò non genera però problemi rilevanti alla nostra indagine, perché l'ipotesi più importante per verificare l'adeguatezza di un modello è stata non rifiutata, ovvero la verifica svolta attraverso i test di autocorrelazione presenti nella *Figura 3*.

Nel caso si voglia però risolvere il problema di eteroschedasticità e di variabili omesse è possibile adottare altre soluzioni:

1. Aggiornare il modello con l'aggiunta di altre variabili connesse all'effetto meteorologico se si riscontra un problema di variabili omesse.
2. Se non è possibile riformulare il modello, bisogna verificare che lo stimatore GLS sia flessibile (FGLS).
3. Se non è possibile usare lo stimatore FGLS, si devono adottare gli errori standard robusti all'eteroschedasticità.

Il modello ADL(3,2) in forma logaritmica è comunque adeguato per la nostra indagine, da come possiamo notare nella *Figura 6*:



Figura 6 – Confronto tra il modello stimato ADL(3,2)(serie fore) e il modello reale $\ln(RnBqm3)$, (serie radon)

Nella *Figura 6* notiamo che il nostro modello stimato ADL(3,2), rappresentato dalla funzione “fore” approssima ottimamente il modello “reale” (*radon*) che descrive l’andamento dell’emissione del radon nel periodo di osservazione.

Deduciamo dunque che l’ADL(3,2) stimato è un buon modello previsivo nel quale l’emissione del radon dipende principalmente dal fattore meteorologico poiché il modello teorico è stato riscontrato in relazione all’emivita del gas, mostrato dalla significatività anche del terzo giorno precedente alla rilevazione

della concentrazione, e in relazione ai regressori che complessivamente hanno mantenuto un segno negativo.

Ciò non significa comunque che non sono state rilevate alcune anomalie sull'emissione del radon, come possiamo vedere dalla serie dei residui nella *Figura 7* in relazione anche alle statistiche descrittive degli stessi nella *Tabella 3*:

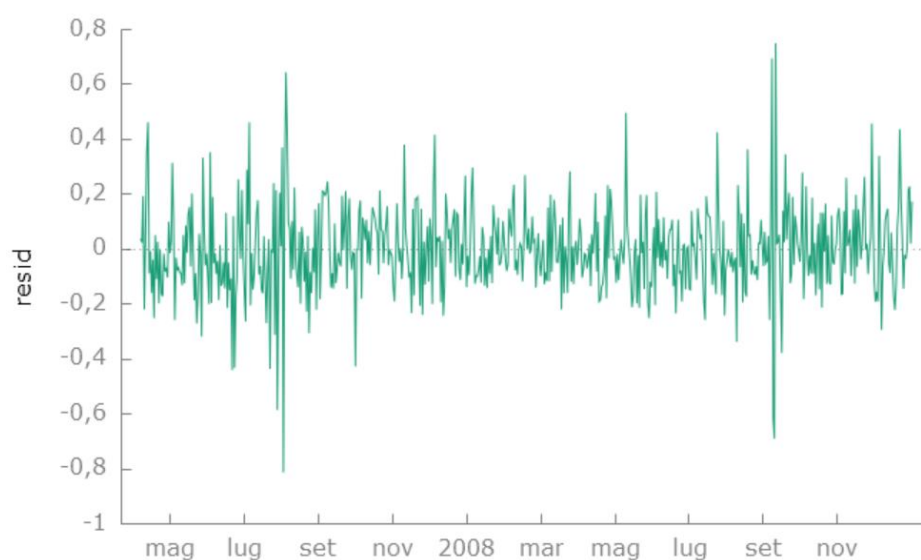


Figura 7 – Grafico delle serie storiche dei residui del modello ADL(3,2)

Variabile	Minimo	Massimo	Mediana	Media	SQM	RMSE
<i>resid</i>	-0.81232	0.75020	-0.00868	0	0.16017	0.16004

Tabella 3 – Statistiche descrittive dei residui (resid)

Nella *Tabella 3* è stato calcolato anche il *RMSE* per valutare la bontà delle previsioni effettuate dal modello.

Nel *Grafico 7* possiamo notare delle rilevanti variazioni nel valore dei residui nei periodi tra luglio – settembre 2007 e settembre – novembre 2008 rispetto all'andamento medio. Queste variazioni rappresentano le anomalie dell'emissione di radon le quali potrebbero dipendere o da altri fattori meteorologici che non sono stati considerati, come ad esempio il livello di precipitazioni o l'effetto serra, oppure dal fattore sismico e vulcanico tipico del sito di rilevazione dei dati, ovvero Stromboli (ME).

4. CONCLUSIONI

Nonostante il terremoto sia un evento sostanzialmente imprevedibile e caratterizzato da un'elevata incertezza circa il suo verificarsi, siamo riusciti a definire attraverso l'analisi del radon alcune delle molteplici variabili utili per la previsione dell'ipotetica scossa sismica e aiutarci nel monitoraggio delle zone soggette a questi disastri naturali, così da poter attuare politiche di prevenzione e minimizzazione dei danni economici.

Nell'analisi dell'emissione del radon abbiamo riscontrato che sono molteplici e di varia natura i fenomeni che influenzano la concentrazione del gas quali i fattori meteorologici, il periodo e il sito di rilevazione dei dati.

Importante è però concentrarsi sulle anomalie dell'emissione di radon, ovvero quelle situazioni nelle quali troviamo un'incongruenza con i modelli teorici e che potrebbero suggerirci la presenza di un rischio sismico.

È quindi necessario studiare il sito di rilevazione, la sua posizione geografica e se in passato sono state riscontrate delle scosse sismiche per aiutarci ad avere maggiori probabilità che l'anomalia non sia occasionale, ma connessa a un ipotetico movimento delle zolle premonitore di un terremoto.

Ciò non significa che debba necessariamente verificarsi un terremoto, poiché stiamo proponendo solo alcune previsioni e soprattutto non abbiamo nessuna certezza su ciò che effettivamente ha causato le anomalie dell'emissione di radon dal sottosuolo.

Se si dovessero riscontrare delle anomalie in siti che non sono soggetti a frequenti eventi sismici, la possibilità di un terremoto non deve essere comunque scartata, però potrebbe anche esserci un problema legato all'effetto serra oppure a un peggioramento delle condizioni meteorologiche in quella zona.

Le nostre indagini dunque possono proporci nuove prospettive di analisi del problema che potrebbero poi essere utili per effettuare previsioni accurate anche laddove sembra impossibile prevedere.

Nel caso di un sito soggetto a frequenti eventi sismici, un'anomalia di radon ci suggerisce che potrebbe verificarsi un nuovo evento sismico. Ne segue che le nostre indagini serviranno anche per attuare tempestivamente misure di sicurezza e prevenzione per mettere in stato di sicurezza i cittadini delle zone che potrebbero essere colpite da un ipotetico terremoto.

5. BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI

Chen K., Filipski M., Zhang X. (2019), How do the earthquakes shape economic behaviour ?, in “*IFPRI blog*”.

<https://www.ifpri.org/blog/how-do-earthquakes-shape-economic-behavior>

Dataset *Tabella 1*, sito NOAA, Search Parameters: Region Southern Europe, Country Italy. <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/earthquake/eventdata?region=130&country=ITALY> <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/earthquake/search>

Ghosh D., Deb A., Sengupta R. (2009), Anomalous radon emission as precursor of earthquake, in “*Journal of Applied Geophysics*”, Vol. 69, pp. 67 – 81, Javadpur University, India.

Monitoraggio sismologico di Stromboli, INGV,

<https://www.ov.ingv.it/ov/it/monitoraggio-sismologico-di-stromboli.html>

Riggio A., Santulin M. (2015), Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor, in “*Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*”, Vol. 56, n. 2, pp. 95 – 114, Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), Trieste, Italy.

Signorini L.F. (2017), Terremoti, economici e no, in “*Le Marche nel corso del 2017: tra ripresa economica ed effetti del sisma*”, Università di Camerino.

Wikipedia, l'enciclopedia libera, Charles Francis Richter.

Wikipedia, l'enciclopedia libera, Gianpaolo Giuliani.

Wikipedia, l'enciclopedia libera, Giuseppe Mercalli.

Wikipedia, l'enciclopedia libera, Terremoto del Centro Italia del 2016 e del 2017.

Wikipedia, l'enciclopedia libera, Radon – 222.