

Titolo

**MESSA A PUNTO ED IMPLEMENTAZIONE DEL SISTEMA DI
LETTURA POLITRACK PER LA VALUTAZIONE DELLA
CONCENTRAZIONE DI RADON**

Descrittori

 Tipologia del documento: **Rapporto Tecnico**

Collocazione contrattuale:

 Argomenti trattati: **Caratteristiche hardware e software del sistema di lettura Politrack. Procedura di taratura del sistema di lettura. Risultati dell'interconfronto per dispositivi passivi per la valutazione dell'esposizione a radon-22 organizzato dal Bundesamt für Strahlenschutz nel 2020.**
Sommario

Nel presente rapporto sono riportate le caratteristiche principali del sistema di lettura Politrack per la valutazione della concentrazione di Radon in aria: strumentazione, software di lettura e analisi dati. E' descritta la procedura di taratura effettuata a Febbraio 2020 ed i risultati ottenuti nell'interconfronto per dispositivi passivi per la valutazione dell'esposizione a radon-22 organizzato dal Bundesamt für Strahlenschutz nel 2020. Sulla base dei risultati ottenuti, si è ritenuto di poter affermare che il sistema di lettura Politrack è idoneo per essere implementato nelle operazioni di routine del servizio di valutazione della concentrazione di Radon ENEA.

Note
Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	9/3/2021	NOME	F.A. Vittoria	F. Mariotti	E. Fantuzzi
			FIRMA	<i>Fabrizio Almiri Vittoria</i>	<i>Franco Mariotti</i>	<i>Eugenio Fantuzzi</i>
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 2 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	---------------	-----------------

Indice

1. Introduzione	3
2. Politrack: sistema di lettura per rivelatori di CR-39	4
2.1. Strumento.....	4
2.2. Lettura dei rivelatori.....	4
2.3. Analisi dati.....	5
3. Taratura Febbraio 2020	6
3.1. Esposizione e lettura rivelatori.....	6
3.2. Rimozione outlier.....	6
3.3. Determinazione sensibilità e diametro 95° percentile.....	6
3.4. Determinazione curva di sensibilità.....	7
3.5. Fattore di normalizzazione individuale.....	7
4. Risultati interconfronto Bundesamt für Strahlenschutz 2020	9
4.1. Esposizioni.....	9
4.2. Risultati.....	9
4.3. Conclusioni.....	10
<i>Appendice A. Elenco dei parametri di ogni traccia misurati in fase di lettura dei rivelatori</i>	<i>11</i>
<i>Appendice B. Test del χ^2</i>	<i>13</i>
<i>Appendice C. Correzione della sovrapposizione tra tracce diverse</i>	<i>15</i>
<i>Appendice D. Sensibilità del rivelatore ed esposizione da radon</i>	<i>17</i>
<i>Appendice E. Calcolo dell'incertezza e dei limiti caratteristici</i>	<i>18</i>
<i>Appendice F. Taratura: densità di tracce</i>	<i>21</i>
<i>Appendice G. Taratura: grafici</i>	<i>26</i>
<i>Appendice H. Interconfronto: valori di esposizione misurati</i>	<i>29</i>

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 3 31
---	-----------------------------	--------------	------------------	----------------------	------------------------

1. Introduzione

Il Servizio di valutazione della concentrazione di Radon dell'ENEA utilizza da diversi anni un sistema di lettura per rivelatori di CR-39 progettato e realizzato presso il Laboratorio, denominato *Radonino*. Entro la fine del 2020, è prevista l'implementazione di un nuovo sistema di lettura commerciale, denominato *Politrack* (Mi.am, IT).

Scopo della seguente relazione è la discussione delle principali caratteristiche del sistema di lettura *Politrack* e delle azioni svolte per assicurare che il nuovo sistema di lettura sia idoneo per essere implementato nelle operazioni di routine del Servizio di valutazione della concentrazione di Radon ENEA.

Nello specifico verranno descritti: il programma di analisi dati, sviluppato ed adeguato per la lettura dei rivelatori radon ENEA (§2); il processo di taratura del lettore *Politrack*, effettuata a febbraio 2020 (§3); i risultati ottenuti in occasione dell'interconfronto per dispositivi passivi per la valutazione dell'esposizione a radon-222, organizzato dal Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) nel 2020 (§4).

2. Politrack: sistema di lettura per rivelatori di CR-39

2.1. Strumento

Il sistema (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) è composto da:

- Una base orizzontale in vetro su cui vengono disposti i rivelatori da analizzare. La base è collegata a due assi motorizzati (assi x e y) che ne permettono il movimento lungo il piano orizzontale.
- Una fonte di illuminazione LED collimata posizionata al di sotto della base in vetro.
- Una telecamera accoppiata ad un obiettivo posizionate al di sopra della base di vetro ed allineata alla fonte di illuminazione. Telecamera ed obiettivo sono collegati ad un asse motorizzato (asse z) che ne permette il movimento lungo la direzione verticale,

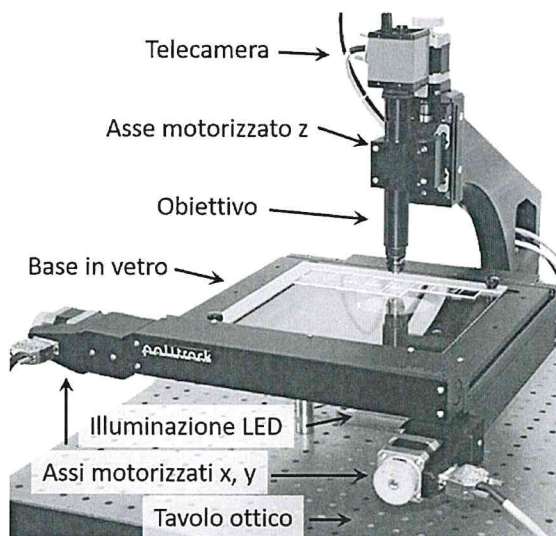


Figura 1 Sistema di lettura Politrak

- perpendicolare alla base in vetro.
- Un tavolo ottico su cui è fissata tutta la strumentazione di cui sopra.
- Un computer da cui è possibile gestire la strumentazione tramite un software proprietario sviluppato da Mi.am.

Il sensore della telecamera, accoppiato con l'obiettivo in dotazione, permette di catturare immagini di 1280x960 pixel, con dimensione effettiva del pixel pari a 0,766 μm . Ogni immagine (o *campo*) acquisita dalla telecamera ha pertanto dimensioni effettive pari a 0,980x0,735 mm². L'asse z permette la messa a fuoco accurata di ogni rivelatore, mentre tramite gli assi x e y è possibile acquisire più campi su uno stesso rivelatore e spostarsi tra rivelatori diversi.

2.2. Lettura dei rivelatori

I rivelatori da leggere vengono posizionati sulla base in vetro e letti in sequenza. La Figura 2 mostra lo schema di acquisizione dati per un singolo rivelatore. Vengono acquisiti una serie di campi in aree adiacenti lungo la superficie del rivelatore. La traiettoria di questa scansione è mostrata in Figura 2 dalla linea continua rossa, dove i punti rossi indicano la posizione centrale di ogni campo. Le diverse immagini vengono acquisite spostando il rivelatore lungo una griglia rettangolare $N_x \times N_y$ (numero di campi nella direzione x e y, rispettivamente), con spaziatura lungo l'asse orizzontale e verticale Δx e Δy , rispettivamente. I valori tipici dei parametri della scansione sono $N_x = 12$, $N_y = 25$, $\Delta x = 1$ mm, $\Delta y = 0,75$ mm; ma questi possono essere modificati nel programma di acquisizione dati.

I rivelatori presentano una zona centrale circolare, che è stata potenzialmente esposta a radiazione alfa prodotta da radon (area in grigio in Figura 2); la rimanente parte del rivelatore rimane schermata durante l'esposizione.

Il software di acquisizione analizza ogni campo acquisito e identifica le possibili tracce create dalla radiazione alfa e dall'attacco chimico a cui sono sottoposti i rivelatori prima della lettura. Per ogni traccia vengono rilevati una serie di parametri come per esempio posizione sul rivelatore, dimensione, etc... L'elenco completo dei parametri rilevati in fase di lettura è riportato per completezza in Appendice A. Per ogni rivelatore analizzato dal sistema di lettura, un elenco di tutte le tracce trovate e dei loro parametri viene salvato in un file di testo alla fine della lettura ("codice_rivelatore.trk").

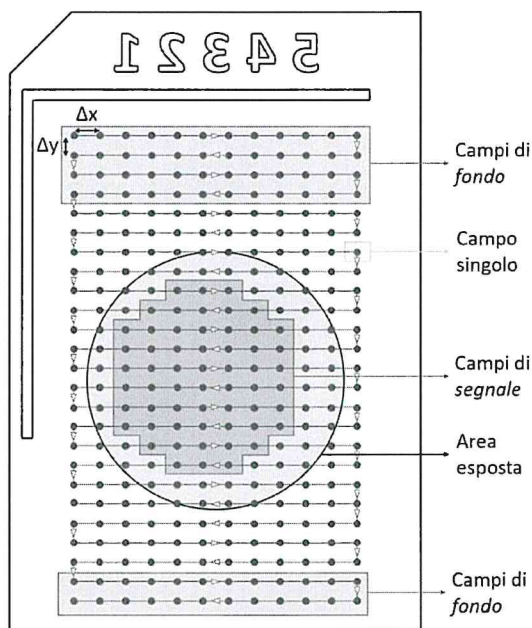


Figura 2. Schema di acquisizione del lettore Politrack.

2.3. Analisi dati

L'analisi dati viene effettuata attraverso un software sviluppato dal Servizio Radon ENEA. Per ogni rivelatore da analizzare, il software di analisi legge l'elenco delle tracce dal file di testo creato dal programma di lettura. Le tracce sono suddivise in base al campo in cui sono state rilevate. I diversi campi vengono suddivisi in 3 gruppi: campi di *fondo*, campi di *segnale*, campi *non determinati*. L'analisi procede effettuando le seguenti operazioni:

- *Rimozione dei campi con un numero anomalo di tracce* dai gruppi di fondo e di segnale. **Maggiori dettagli possono essere trovati nell'0.**
- *Applicazione di filtri* sui parametri di ogni traccia rilevati in fase di lettura, per eliminare le tracce che possono essere imputate a difetti del materiale e non a radiazione alfa.
- *Seconda rimozione dei campi con un numero anomalo di tracce*, secondo la stessa metodologia seguita per il primo punto (0).
- *Calcolo della densità superficiale di tracce* (n° tracce/cm²) nelle aree di fondo e di segnale.
- *Correzione della densità di tracce per compensare l'effetto della sovrapposizione di tracce diverse*. **Maggiori dettagli possono essere trovati nell'Appendice C.**
- *Determinazione dell'esposizione da radon*. **Maggiori dettagli possono essere trovati nell'Appendice D.**

I dettagli riguardanti il calcolo dell'incertezza associata alla misura ed alla determinazione dei limiti caratteristici (decision threshold/soglia di decisione e detection limit/limite di rivelazione) sono discussi nell'Appendice E.

3. Taratura Febbraio 2020

3.1. Esposizione e lettura rivelatori

Una serie di 90 rivelatori di CR-39 (TASL, UK) è stata esposta in camera Radon (Politecnico di Milano, IT) a 3 diversi valori di esposizione: 30 rivelatori a 192 ± 20^1 kBq h m⁻³, 30 rivelatori a 1044 ± 107^1 kBq h m⁻³, 30 rivelatori a 3319 ± 342^1 kBq h m⁻³. I rivelatori sono stati divisi in 5 gruppi, ognuno composto da 6 rivelatori per ogni valore di esposizione, per un totale di 18 rivelatori per gruppo. Ogni gruppo di rivelatori è stato attaccato in una soluzione di NaOH 6,5 N a 70°C per 4 h, 5 h, 6 h, 7 h e 8 h, rispettivamente. Tutti i rivelatori sono stati letti con il sistema di lettura Politrack, che ha permesso di ottenere la densità di tracce superficiale netta. I risultati ottenuti sono mostrati nelle tabelle dell'Appendice F.

3.2. Rimozione outlier

Si consideri un sottogruppo di 6 rivelatori, esposti allo stesso valore di esposizione ed attaccati con lo stesso tempo di attacco. Per ogni rivelatore in questo sottogruppo, la densità di tracce misurata deve essere uguale, a meno di fluttuazioni statistiche. Per rimuovere dall'analisi eventuali outlier, è stato calcolato il valore mediano della densità di tracce med_{DT} , e per ogni rivelatore il parametro ζ_i definito come:

$$\zeta_i = \frac{|DT_i - med_{DT}|}{u(DT_i)} \quad (1)$$

Dove DT_i è la densità di tracce del rivelatore i-esimo, e $u(DT_i)$ la relativa incertezza standard. I rivelatori per cui $\zeta_i > 5$ sono stati considerati outlier ed esclusi dalla successiva analisi.

3.3. Determinazione sensibilità e diametro 95° percentile

Per ogni sottogruppo di 6 rivelatori, esposti allo stesso valore di esposizione ed attaccati con lo stesso tempo di attacco, è stata calcolata la media pesata della densità di tracce e la relativa incertezza come:

$$\overline{DT} = \frac{\sum_i DT_i \cdot u(DT_i)^{-2}}{\sum_i u(DT_i)^{-2}} \quad (2)$$

$$u(\overline{DT}) = \left(\sum_i u(DT_i)^{-2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

I risultati sono riassunti nella tabella seguente.

Riferimento		Attacco 4 h		Attacco 5 h		Attacco 6 h		Attacco 7 h		Attacco 8 h	
Esp	$u(Esp)$	\overline{DT}	$u(\overline{DT})$	\overline{DT}	$u(\overline{DT})$	\overline{DT}	$u(\overline{DT})$	\overline{DT}	$u(\overline{DT})$	\overline{DT}	$u(\overline{DT})$
192	10	480	15	766	19	872	21	839	22	743	25
1044	54	1782	30	2774	38	3809	41	4354	45	4434	46
3319	171	7119	55	10905	71	13379	82	13703	88	14051	102

¹¹ Incertezza espansa con fattore di copertura k=2

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. LL	Pag. di 7 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	----------------	-----------------

La densità di tracce è direttamente proporzionale all'esposizione, secondo la relazione:

$$DT = S \cdot Esp \quad (4)$$

dove S è la sensibilità del rivelatore. S non è costante, ma dipende dalla dimensione delle tracce che si sono sviluppate durante l'attacco chimico. A tempi di attacco più brevi, corrispondono dimensioni delle tracce minori e conseguentemente un minor valore di S . Per ogni rivelatore viene calcolato il 95° percentile della distribuzione dei semiassi minori $D95\%_i$, e la relativa incertezza $u(D95\%_i)$; il parametro $D95\%$ viene utilizzato come indicatore della dimensione complessiva delle tracce. Per ogni gruppo di 18 rivelatori, attaccati con lo stesso tempo di attacco, è stata calcolata la media pesata di $D95\%$ e la relativa incertezza come:

$$\overline{D95\%} = \frac{\sum_i D95\%_i \cdot u(D95\%_i)^{-2}}{\sum_i u(D95\%_i)^{-2}} \quad (5)$$

$$u(\overline{D95\%}) = \left(\sum_i u(D95\%_i)^{-2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Per ogni tempo di attacco è stata poi determinata la sensibilità S e la relativa incertezza standard $u(S)$ tramite una "orthogonal distance regression" (una generalizzazione del metodo dei minimi quadrati al caso in cui anche la variabile indipendente sia affetta da incertezza statistica). I risultati sono mostrati nella tabella seguente, mentre i grafici delle rette di regressione sono mostrati nell'Appendice G.

3.4. Determinazione curva di sensibilità

I dati nella tabella precedente sono stati utilizzati per determinare la curva della sensibilità S in funzione di $D95\%$. Il modello utilizzato per descrivere la dipendenza di S da $D95\%$ è il seguente:

$$S(D95\%) = p_0 \cdot \{1 - \exp[-p_1 \cdot (D95\% - p_2)]\} \quad (7)$$

Dove $\mathbf{p} = [p_0 \ p_1 \ p_2]$ è il vettore dei parametri da determinare sperimentalmente. Tali parametri sono stati determinati tramite una "orthogonal distance regression" che ha fornito i seguenti valori di \mathbf{p} e della matrice delle covarianze $cov(\mathbf{p}, \mathbf{p})$:


$$\mathbf{p} = [4,25 \quad 5,06 \times 10^{-1} \quad 1,08 \times 10^1] \quad (8)$$

$$cov(\mathbf{p}, \mathbf{p}) = \begin{bmatrix} 7,66 \times 10^{-3} & -1,24 \times 10^{-2} & -3,05 \times 10^{-2} \\ -1,24 \times 10^{-2} & 2,80 \times 10^{-2} & 7,31 \times 10^{-2} \\ -3,05 \times 10^{-2} & 7,31 \times 10^{-2} & 2,16 \times 10^{-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Il grafico della curva di regressione è mostrato nell'Appendice G.

3.5. Fattore di normalizzazione individuale

La sensibilità individuale di ogni rivelatore può variare all'interno di un determinato lotto. La sensibilità S precedentemente determinata si riferisce al valor medio del lotto preso in esame, ma non fornisce una stima della variazione di S all'interno del lotto stesso. È possibile descrivere la variazione individuale della sensibilità di ogni rivelatore, rispetto alla sensibilità media S , introducendo un fattore di normalizzazione individuale f_i , da cui si ottiene che la densità di tracce DT_i misurata sul rivelatore i -esimo, esposto ad un valore di esposizione Esp sarà uguale a:

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 8 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	---------------	-----------------

$$DT_i = f_i \cdot S \cdot Esp \quad (10)$$

Da cui si può ricavare:

$$u_{rel}(f_i) = \frac{std(f_i)}{media(f_i)} = \frac{std(DT_i)}{media(DT_i)} \quad (11)$$

Dove *std* indica la deviazione standard e *u_{rel}* indica l'incertezza standard relativa.

Per poter valutare *u_{rel}(f_i)*, una ulteriore serie di 10 rivelatori di CR-39 (TASL, UK) è stata esposta in camera Radon (Politecnico di Milano, IT) a 3319 ± 342^2 kBq h m⁻³. I rivelatori sono stati attaccati in una soluzione di NaOH 6,5 N a 70°C per 7 h e letti con il sistema di lettura Politrack. I risultati ottenuti sono mostrati nella tabella seguente.

Cod. Dos.	<i>DT</i> [cm ⁻²]	<i>u(DT)</i> [cm ⁻²]	<i>media(DT)</i> [cm ⁻²]	<i>std(DT)</i> [cm ⁻²]	$\frac{std(DT)}{media(DT)}$
52801	13304	211	13961	667	0,05
52802	14498	222			
52803	13172	208			
52804	13830	219			
52805	13568	213			
62860	13331	213			
62861	14716	227			
62862	14959	230			
62863	13631	217			
62864	14604	226			

L'analisi mostra che il valore di *u_{rel}(f_i)*, per questo lotto di rivelatori, è pari a 0,05.

² Incertezza espansa con fattore di copertura k=2

4. Risultati interconfronto Bundesamt für Strahlenschutz 2020

4.1. Esposizioni

Ad ogni partecipante è stato richiesto di fornire 35 dispositivi per la valutazione della concentrazione di radon-222. Di questi, 7 dispositivi non sono stati esposti al radon (gruppo "transit"), mentre i rimanenti 28 sono stati esposti a 4 diversi livelli di esposizione (7 dispositivi per esposizione). I 4 valori di esposizione usati dal Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) per questo interconfronto sono: 301 kBq h m⁻³, 808 kBq h m⁻³, 870 kBq h m⁻³ e 1999 kBq h m⁻³. L'incertezza relativa espansa su tutti i valori di esposizione è pari a 5%, con fattore di copertura k = 2.

4.2. Risultati

Dopo l'esposizione, i rivelatori sono stati attaccati chimicamente in una soluzione di NaOH 6,25 N a 70°C per 6 h e 50 min, prima di essere analizzati con il sistema di lettura Politrack. Nella tabella seguente sono riportati i valori medi dell'esposizione misurata sui 7 dispositivi di ogni gruppo e l'errore relativo tra la risposta media e il valore di riferimento dell'esposizione. Si nota come l'errore relativo sia minore, in valore assoluto, di 5% per ogni gruppo di esposizione.

Gruppo Esposizione	Esposizione di riferimento [kBq h m ⁻³]	Esposizione media misurata [kBq h m ⁻³]	Errore relativo
0	0	3	-
1	301	305	1,3 %
2	808	835	3,3 %
3	870	901	3,6 %
4	1999	1966	-1,6 %

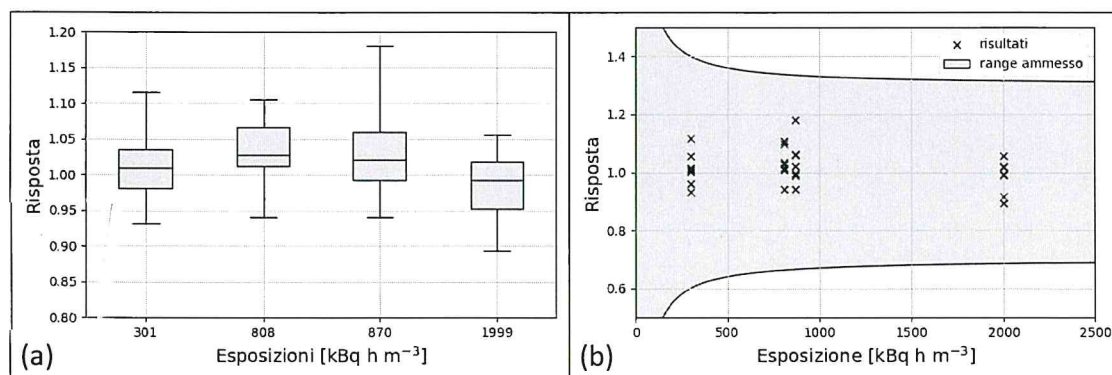



Figura 3. Grafici della risposta dei rivelatori usati per l'interconfronto per dispositivi passivi per la valutazione dell'esposizione a radon-222, organizzato dal Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) nel 2020. (a) Grafico scatola e baffi, in cui sono evidenziati il valore minimo, massimo, ed il 25°, 50° e 75° percentile della risposta di ciascun gruppo di rivelatori. (b) Valori di risposta di ciascun rivelatore in funzione dell'esposizione di riferimento; in grigio è evidenziato il range ammesso entro cui i valori di risposta ottenuti sono considerati non anomali.

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 10 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	---------------	------------------

In Figura 3 (a) è riportato un grafico scatola e baffi della risposta (definita come il rapporto tra l'esposizione misurata e l'esposizione di riferimento) di ciascun dispositivo per ogni valore dell'esposizione di riferimento. In Figura 3 (b), invece, sono riportati i singoli valori della risposta di ciascun dispositivo in funzione dell'esposizione di riferimento ed è evidenziato il *range ammesso*, così come definito dal BfS, per poter considerare una misura non anomala (*outlier*). Nessuno dei dispositivi analizzati ha fornito una risposta anomala. Nell'Appendice H sono riportati i valori dell'esposizione misurata e della risposta di ciascun rivelatore, insieme alle relative incertezze espanse con fattore di copertura $k=2$.


4.3. Conclusioni

Il nuovo sistema di lettura Politrack, per rivelatori di CR-39, ha mostrato ottimi risultati nell'analisi di rivelatori esposti durante l'interconfronto per dispositivi passivi per la valutazione dell'esposizione a radon-222, organizzato dal Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) nel 2020. L'errore relativo per l'esposizione media misurata su ciascun gruppo di rivelatori è inferiore, in valore assoluto, al 5% e nessun rivelatore utilizzato ha fornito una risposta al di fuori del range ammesso per rivelatori considerati non anomali. Questi risultati permettono di affermare che il nuovo sistema di lettura è idoneo per essere implementato nelle operazioni di routine del servizio di valutazione della concentrazione di Radon ENEA.


	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 11 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	---------------	------------------

Appendice A. Elenco dei parametri di ogni traccia misurati in fase di lettura dei rivelatori

x	Coordinata x del centro di massa
y	Coordinata y del centro di massa
per	Perimetro della traccia
per ch	Perimetro del "convex hull" (poligono convesso più piccolo contenente la traccia)
per buchi	Somma dei perimetri dei buchi presenti nella traccia
feret	Diametro di Feret (distanza massima tra due punti nella traccia)
max ell eq	Asse maggiore dell'ellisse equivalente (ellisse con la stessa area e perimetro della traccia)
min ell eq	Asse minore dell'ellisse equivalente
max ret eq	Lato maggiore del rettangolo equivalente
min ret eq	Lato minore del rettangolo equivalente
R idr	Raggio idraulico (rapporto tra area e perimetro della traccia)
diam w disk	Diametro del "Waddel disk" (disco con la stessa area della traccia)
area	Area della traccia
area buchi	Area dei buchi nella traccia
area ch	Area del "convex hull"
n° buchi	Numero di buchi nella traccia
% area/imm	Rapporto percentuale dell'area della traccia rispetto a quella dell'immagine
elong	Fattore di elongazione (rapporto tra diametro di Feret e lato minore dell'ellissi equivalente)
comp	Fattore di compattezza (rapporto tra l'area della traccia e l'area del rettangolo che la circonda)
heywood	Fattore "Heywood" (rapporto tra l'area della traccia e la circonferenza del "Waddel disk")
Hu 1, Hu 2, ..., Hu 7	"Hu moments" dal primo al settimo ordine
max(fer,ell)	Valore massimo tra il diametro di Feret e l'asse maggiore dell'ellissi fittata (vedi oltre)
X(nel frame)	Coordinata x del centro dell'ellissi fittata
Y(nel frame)	Coordinata y del centro dell'ellissi fittata
amax fit	Asse maggiore dell'ellissi fittata
amin fit	Asse minore dell'ellissi fittata
area fit	Area dell'ellissi fittata
perim fit	Perimetro dell'ellissi fittata

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 12 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	---------------	------------------

- moda sg** Moda dei livelli di grigio nella traccia
- media sg** Media dei livelli di grigio nella traccia
- residual** Residuo del fit
- sharp** Fattore di "sharpness" o nitidezza della traccia
- roundness** Fattore di "roundness" o circolarità della traccia
- n frame** Numero del campo in cui la traccia è stata rivelata

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib.	Pag. di 13 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	----------	------------------

Appendice B. Test del χ^2

Si considerino n campi disgiunti del rivelatore e si assuma che l'esposizione a radon di tutti gli n campi sia uguale. In queste condizioni si può assumere che il numero di tracce N misurato su un generico campo sia una variabile aleatoria che segue una distribuzione di Poisson, il cui valor medio λ è uguale a $S \cdot E + \lambda_b$, dove E è l'esposizione a radon, S è la sensibilità del rivelatore e λ_b è il numero medio di tracce di fondo dovute ad imperfezioni nel rivelatore:

$$N = \mathcal{P}(\lambda) \quad (12)$$

In queste ipotesi si può dimostrare che la variabile aleatoria Q definita come:

$$Q = (n - 1) \frac{\text{var}(N)}{\text{media}(N)} \quad (13)$$

segue la distribuzione χ^2 con $n - 1$ gradi di libertà, dove $\text{var}(N)$ e $\text{media}(N)$ indicano la varianza e la media di N , rispettivamente.

Nel caso in cui il numero di tracce misurato in uno o più campi sia molto diverso dal valor medio, il valore di Q sarà significativamente più alto del valore atteso. Questo può essere verificato attraverso un test d'ipotesi, con un determinato livello di significatività α . Nella tabella seguente sono indicati i valori massimi del parametro $Q/(n - 1)$ con livello di significatività $\alpha = 0,05^3$, per i due valori di n comunemente usati nell'analisi dati del lettore Politrack (58 campi di segnale e 72 campi di fondo).

$Q/(n - 1)$	Valore atteso	Valore massimo ($\alpha = 0,05$)
$n = 58$	1	1,33
$n = 72$	1	1,29

Nel caso in cui $Q/(n - 1)$ superi il valore massimo stabilito, i campi il cui numero di tracce si discosta maggiormente dal valor medio vengono progressivamente eliminati, fino a quando il test d'ipotesi non viene superato. Nella figura seguente è mostrato un esempio dell'applicazione di tale processo ad un rivelatore di prova, in cui è evidente la presenza di un graffio sulla superficie. Nelle tabelle sottostanti sono invece indicati i parametri dell'analisi condotta sul rivelatore di prova per le aree di fondo e di segnale.

Fondo	Tracce Rivelate	Nr. Campi	Tracce / cm ²	$Q/(n - 1)$	$Q_{max}/(n - 1)$
Analisi Iniziale	51	96	74	12,3	1,25
Analisi Finale	10	93	15	1,10	1,25

³ La probabilità che il parametro $Q/(n - 1)$ assuma valori superiori al relativo valore massimo, per puri effetti statistici, è inferiore ad α . In questo caso l'ipotesi che il numero di tracce per campo N segua una distribuzione di Poisson viene rifiutata.

Segnale	Tracce Rivelate	Nr. Campi	Tracce / cm ²	$Q/(n - 1)$	$Q_{max}/(n - 1)$
Analisi Iniziale	1151	58	2752	1,71	1,33
Analisi Finale	1042	55	2628	0,93	1,34

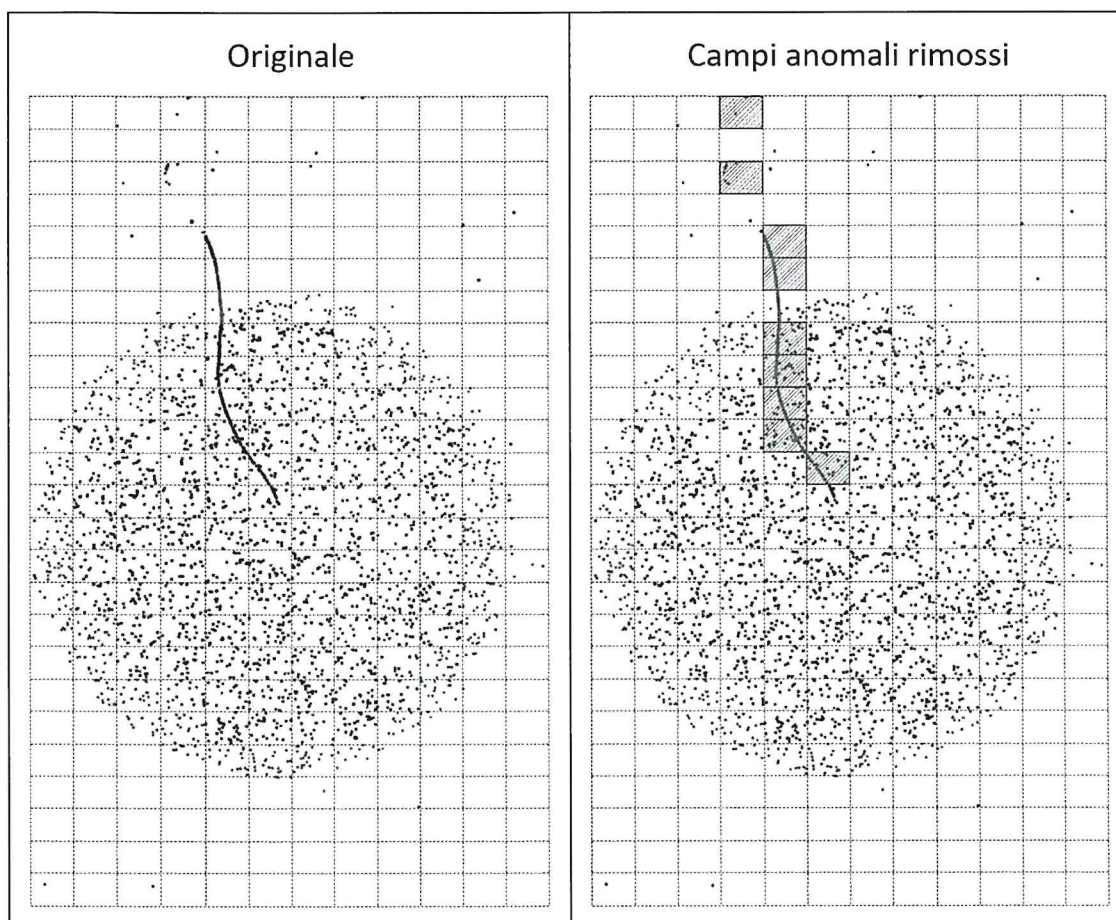


Figura 4. Mappa delle tracce rivelate su un rivelatore di prova. La griglia tratteggiata evidenzia i bordi di ogni campo acquisito dal sistema di lettura. Le tracce evidenziate in nero appartengono ai campi di segnale, le tracce in blu ai campi di fondo, le tracce in rosso ai campi non determinati. Nell'immagine a destra sono evidenziati in viola i campi delle zone di segnale e di fondo eliminati dopo aver eseguito il test del χ^2 descritto nel testo.

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 15 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	---------------	------------------

Appendice C. Correzione della sovrapposizione tra tracce diverse

Le tracce si dispongono in maniera casuale sulla superficie del rivelatore. È possibile che due o più tracce si trovino abbastanza vicine tra loro da sovrapporsi, anche solo parzialmente. In questa eventualità diventa difficile determinare la densità di tracce corretta. L'effetto della sovrapposizione tra tracce diverse può essere trascurato quando la densità di tracce non è elevata (più precisamente quando la distanza media tra le tracce è molto minore rispetto alla dimensione delle tracce stesse). Quando la densità di tracce raggiunge valori elevati, però, l'effetto della sovrapposizione delle tracce non è trascurabile al fine dell'ottenimento di una stima corretta della densità delle tracce (e di conseguenza dell'esposizione a radon).

Nel caso specifico del lettore Politrack, il programma di acquisizione non riesce ad identificare correttamente gruppi di due o più tracce sovrapposte, che vengono automaticamente "scartati" durante l'analisi. Pertanto, solo le tracce non sovrapposte vengono identificate correttamente e registrate nel file di output.

A tale scopo è stato sviluppato un modello statistico che permette di calcolare la densità di tracce *reale* (in cui sono considerate sia tracce sovrapposte, sia non sovrapposte) a partire dalla densità di tracce *misurata* (che comprende solo le tracce non sovrapposte). In particolare, indicando con λ la densità di tracce reale e con η la densità di tracce misurata, è possibile scrivere:

$$\eta = P_{no}(\lambda) \cdot \lambda \quad (14)$$

dove $P_{no}(\lambda)$ è la probabilità che non ci sia sovrapposizione tra tracce.

Si consideri un caso semplificato, in cui tutte le tracce hanno forma circolare e raggio R . In questo caso $P_{no}(\lambda)$ è uguale alla probabilità che la distanza tra una traccia e la sua prima vicina sia maggiore di $2R$. Assumendo che le tracce siano distribuite in maniera casuale sulla superficie del rivelatore⁴, si può dimostrare che la densità di probabilità $f(a; \lambda)$ della distanza a tra una traccia e la sua prima vicina, quando la densità di tracce è uguale a λ , è:

$$f(a; \lambda) = 2\pi\lambda a \exp[-\pi\lambda a^2] \quad (15)$$

La probabilità $P_{no}(\lambda)$ per tracce circolari di raggio R sarà quindi data da:

$$P_{no,R}(\lambda) = \int_{2R}^{\infty} f(a; \lambda) da = \exp[-4\pi R^2 \lambda] \quad (16)$$

Questa equazione può essere generalizzata al caso in cui le tracce abbiano dimensioni diverse. Assumendo che $g(r)$ sia la distribuzione di probabilità del raggio r di una traccia, si ha che:

$$P_{no}(\lambda) = \int_0^{\infty} dr_0 \int_0^{\infty} dr_1 g(r_0)g(r_1) \int_{r_0+r_1}^{\infty} da f(a; \lambda) \quad (17)$$

$$P_{no}(\lambda) = \int_0^{\infty} dr_0 \int_0^{\infty} dr_1 g(r_0)g(r_1) \exp[-\pi(r_0 + r_1)^2 \lambda] \quad (18)$$

La distribuzione dei diametri $g(r)$ può essere ricavata sperimentalmente analizzando l'area delle tracce rivelate. Infine, la densità di tracce reale λ può essere determinata invertendo l'Eq. (14) tramite la seguente minimizzazione:

⁴ Più precisamente, la posizione di ogni traccia può essere descritta da un processo di Poisson in due dimensioni.

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 16 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	---------------	------------------

$$\lambda = \arg \min_{\lambda} \{[\eta - P_{no}(\lambda) \cdot \lambda]^2\} \quad (19)$$

È importante ribadire che l'Eq. (18) è stata derivata nell'ipotesi di tracce circolari e considerando solo il caso di sovrapposizione tra primi vicini⁵. Simulazioni Monte-Carlo hanno, però, dimostrato che, per i casi d'uso comune del Servizio Radon ENEA, l'errore massimo risultate nella stima di λ utilizzando le Eq. (14) e (18) è dell'ordine del 1%, trascurabile rispetto alle altre fonti di incertezza nella stima di λ .

⁵ Questa ipotesi esclude i casi in cui una traccia non si sovrappone con la sua prima vicina, ma con altre tracce poste ad una distanza maggiore. Tale eventualità può verificarsi solo nel caso in cui le tracce abbiano dimensioni diverse.

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 17 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	---------------	------------------

Appendice D. Sensibilità del rivelatore ed esposizione da radon

La densità di tracce λ , create dai prodotti di decadimento del radon, misurata sul rivelatore è direttamente proporzionale all'esposizione a radon E , secondo la relazione $\lambda = S \cdot E$, dove la costante di proporzionalità S è detta *sensibilità*. A parità di condizioni di esposizione, materiale del rivelatore, attacco chimico e condizioni di lettura, la sensibilità S assume un valore costante. Nella pratica, però, le condizioni di attacco chimico possono variare, sia per la difficoltà di ricreare la stessa soluzione di attacco, sia per possibili variazioni accidentali della temperatura e del tempo di attacco. È possibile, quindi, che la sensibilità S vari tra i diversi attacchi chimici che si svolgono durante le operazioni del Servizio di valutazione della concentrazione di radon.

La variazione di S con le condizioni di attacco chimico dipende, in ultima analisi, dalla diversa dimensione che le tracce possono assumere al termine dell'attacco: una soluzione meno concentrata o un tempo di attacco più corto risultano in tracce con dimensioni minori, più difficilmente identificabili dal sistema di lettura. Un parametro utile per caratterizzare la dimensione complessiva delle tracce è il 95° percentile della distribuzione dei semiassi minori della traccia, d_{95} . S aumenta all'aumentare di d_{95} , fino a raggiungere un valore di saturazione, quando tutte le tracce che vengono sviluppate con l'attacco chimico sono rivelate dal sistema di lettura⁶. Sperimentalmente è stata determinata la seguente relazione tra S e d_{95} :

$$S = p_0 \cdot \{1 - \exp[-p_1 \cdot (d_{95} - p_2)]\} \quad (20)$$

Dove il vettore dei parametri $\mathbf{p} = [p_0 \ p_1 \ p_2]$ viene determinato in fase di taratura del sistema. Per ogni rivelatore letto, viene calcolato il parametro d_{95} e la relativa sensibilità tramite l'Eq. (20). Infine, l'esposizione viene determinata dividendo la densità di tracce netta per la sensibilità:

$$E = \frac{\lambda_s - \lambda_b}{S} \quad (21)$$

Dove λ_s è la densità di tracce, corretta per l'effetto di sovrapposizione delle tracce, misurata nella regione esposta del rivelatore, mentre λ_b è la densità di tracce, corretta per l'effetto di sovrapposizione delle tracce, misurata nella regione di fondo del rivelatore.

⁶ Nella pratica, in realtà, i sistemi di lettura possono implementare dei filtri che eliminano tracce troppo grandi. In questo caso la sensibilità torna a decrescere quando d_{95} assume valori molto elevati.

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 18 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	---------------	------------------

Appendice E. Calcolo dell'incertezza e dei limiti caratteristici

L'incertezza della misura e i limiti caratteristici vengono calcolati in accordo con la norma ISO 11929. Di seguito sono riportati i passaggi per la determinazione dell'esposizione:

1. Calcolo della densità di tracce rivelate nella regione di segnale η_s e di fondo η_b , e delle relative incertezze standard $u(\eta_s)$ e $u(\eta_b)$:

$$\eta_s = \frac{N_s}{A_s} ; \quad \eta_b = \frac{N_b}{A_b} \quad (22)$$

$$u(\eta_s) = \sqrt{\frac{\eta_s}{A_s}} ; \quad u(\eta_b) = \sqrt{\frac{\eta_b}{A_b}} \quad (23)$$

Dove $u(\eta_s)$ e $u(\eta_b)$ sono calcolate nell'ipotesi di incertezza Poissoniana su N_s e N_b .

2. Calcolo della densità di tracce reale nella regione di segnale λ_s e di fondo λ_b , e delle relative incertezze standard $u(\lambda_s)$ e $u(\lambda_b)$:

$$\lambda_s = \arg \min_{\lambda} \{[\mu_s - P_{no}(\lambda) \cdot \lambda]^2\} ; \quad \lambda_b = \arg \min_{\lambda} \{[\mu_b - P_{no}(\lambda) \cdot \lambda]^2\} \quad (24)$$

$$u(\lambda_s) = \frac{u(\eta_s)}{|P_{no}'(\lambda_s) \cdot \lambda_s + P_{no}(\lambda_s)|} ; \quad u(\lambda_b) = \frac{u(\eta_b)}{|P_{no}'(\lambda_b) \cdot \lambda_b + P_{no}(\lambda_b)|} \quad (25)$$

3. Calcolo del 95° percentile della distribuzione dei semiassi minori delle tracce d_{95} e della relativa incertezza standard $u(d_{95})$. Viene creato un vettore \mathbf{d} contenente i valori dei semiassi minori di tutte le tracce rilevate nella zona di segnale, in ordine crescente. A \mathbf{d} viene associato un secondo vettore \mathbf{f} contenente numeri interi crescenti da 1 al numero totale di tracce N_s :

$$\mathbf{d} = [d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_{N_s}] ; \quad \mathbf{f} = [1 \quad 2 \quad \dots \quad N_s] \quad (26)$$

Tali vettori possono essere usati per ottenere una stima della *funzione di probabilità cumulata* cdf_d dei semiassi minori d :

$$cdf_d(d) = \frac{f}{N_s} = \hat{f} \quad (27)$$

L'inverso della funzione cdf_d fornisce il valore del semiasse maggiore relativo ad un determinato percentile della distribuzione. d_{95} può quindi essere ottenuto tramite la seguente relazione:

$$d_{95} = cdf_d^{-1}(0,95) \quad (28)$$

Dato che la funzione cdf_d^{-1} è ottenuta sperimentalmente tramite i vettori \mathbf{d} e \mathbf{f} , il valore di d_{95} è calcolato mediante interpolazione lineare.

L'incertezza standard $u(d_{95})$ viene calcolata tramite un metodo Monte Carlo. Una serie di 10^4 vettori \mathbf{d}_r , ciascuno composto da N_s elementi, viene generata casualmente, secondo la funzione di probabilità cumulata trovata sperimentalmente (Eq. (27)). Per ciascun vettore \mathbf{d}_r , viene calcolato il relativo valore $d_{95,r}$, secondo la procedura descritta in precedenza. L'incertezza standard $u(d_{95})$ viene infine calcolata come la deviazione standard di tutti i valori di $d_{95,r}$.

4. Calcolo della sensibilità S e della relativa incertezza standard $u(S)$. A partire dai valori di d_{95} e $u(d_{95})$ trovati al punto precedente, si trova:

$$S = p_0 \cdot \{1 - \exp[-p_1 \cdot (d_{95} - p_2)]\} \quad (29)$$

ENEA	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 19 31
-------------	-----------------------------	--------------	-----------	---------------	------------------

$$u(S) = \sqrt{\sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \frac{\partial S}{\partial p_i} \frac{\partial S}{\partial p_j} cov(p_i, p_j) + \left[\frac{\partial S}{\partial d_{95}} u(d_{95}) \right]^2} + [S \cdot u_{rel}(f_i)]^2 \quad (30)$$

Il primo termine sotto radice quadrata è il contributo all'incertezza dato dalla stima del vettore dei parametri $\mathbf{p} = [p_0 \ p_1 \ p_2]$ e $cov(p_i, p_j)$ indica gli elementi della matrice delle covarianze dei parametri, ottenuta in fase di taratura del sistema di lettura. Il secondo termine sotto radice quadrata è il contributo dato dall'incertezza sul parametro d_{95} . L'ultimo termine sotto radice quadrata è il contributo all'incertezza dato dalla variabilità della sensibilità individuale di ogni rivelatore, all'interno di un determinato lotto, e viene determinato in fase di taratura del sistema di lettura.

5. Calcolo dell'esposizione E e della relativa incertezza standard $u(E)$:

$$E = \frac{\lambda_s - \lambda_b}{S} \quad (31)$$

$$u(E) = \sqrt{\frac{u(\lambda_s)^2 + u(\lambda_b)^2}{S^2} + \left[E \frac{u(S)}{S} \right]^2} \quad (32)$$

6. Calcolo dei limiti caratteristici. Si consideri l'Eq. (32); per valori di esposizione prossimi a 0 l'effetto della sovrapposizione tra tracce può essere trascurato e $\lambda_s \cong \eta_s$ e $\lambda_b \cong \eta_b$:

$$\begin{aligned} u(E) &= \sqrt{\frac{u(\eta_s)^2 + u(\eta_b)^2}{S^2} + \left[E \frac{u(S)}{S} \right]^2} \\ &= \sqrt{\frac{(\eta_s/A_s) + (\eta_b/A_b)}{S^2} + \left[E \frac{u(S)}{S} \right]^2} \end{aligned} \quad (33)$$

Ricordando che $\eta_s = S \cdot E + \eta_b$, è possibile esprimere l'incertezza sull'esposizione E come funzione dell'esposizione stessa:

$$\tilde{u}(\tilde{E}) = \sqrt{\frac{[(S \cdot \tilde{E} + \eta_b)/A_s] + (\eta_b/A_b)}{S^2} + \left[\tilde{E} \frac{u(S)}{S} \right]^2} \quad (34)$$

Nell'ultima equazione E e $u(E)$ sono stati sostituiti formalmente da \tilde{E} e $\tilde{u}(\tilde{E})$, in accordo con il formalismo usato nella norma ISO 11929.

La *decision threshold* E^* (soglia di decisione) è definita come:

$$E^* = k_{1-\alpha} \tilde{u}(0) = k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{(\eta_b/A_s) + (\eta_b/A_b)}{S^2}} \quad (35)$$

Dove $k_{1-\alpha}$ è il quantile della distribuzione normale standard corrispondente alla probabilità $1 - \alpha$. E^* viene usata come soglia per determinare se il rivelatore è stato realmente esposto a radon. Se l'esposizione misurata è inferiore a E^* si conclude che il rivelatore non è stato esposto, e viceversa. La probabilità che l'esposizione misurata sia, per fluttuazioni statistiche, superiore ad E^* in assenza di esposizione a radon è $1 - \alpha$ (errore di primo tipo o falso positivo). Per convenzione si è scelto $\alpha = 0,05$ e $k_{1-\alpha} = 1,65$.

Il *detection limit* $E^\#$ (limite di rivelazione) è definito come:

$$E^\# = E^* + k_{1-\beta} \tilde{u}(E^\#) \quad (36)$$

	Istituto di Radioprotezione	IRP-P000-018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 20 31
---	-----------------------------	--------------	-----------	---------------	------------------

$E^\#$ è il valore più piccolo dell'esposizione reale per cui la probabilità che il risultato della misura sia inferiore a E^* è minore di β . In altri termini, $E^\#$ è il valore dell'esposizione reale per cui la probabilità di classificare il rivelatore come non esposto a radon è uguale a β (errore di secondo tipo o falso negativo). Per convenzione si è scelto $\beta = 0,05$ e $k_{1-\beta} = 1,65$. Il valore di $E^\#$ può essere trovato risolvendo iterativamente l'Eq. (36).

Appendice F. Taratura: densità di tracce

Nelle seguenti tabelle sono riportati i risultati della densità di tracce DT e della relativa incertezza standard $u(DT)$ misurati tramite il sistema di lettura Politrack su tutti i rivelatori utilizzati per la taratura. Nelle tabelle è anche indicato il valore mediano della densità di tracce med_{DT} per ogni sottogruppo di rivelatori esposti allo stesso valore di esposizione ed attaccati con lo stesso tempo di attacco, ed il valore del parametro ζ . In aranzione sono evidenziati i rivelatori per cui $\zeta > 5$.

Rivelatori sottoposti ad attacco chimico per 4 h:

Cod. Dos.	DT [cm ⁻²]	u(DT) [cm ⁻²]	Esp [kBq h m ⁻³]	u(ESP) [kBq h m ⁻³]	Tempo attacco [h]	med(DT)	ζ		
57166	584	52	192	10	4	484	1,9		
57167	451	38					0,9		
57168	388	33					2,9		
57169	512	36					0,8		
57170	567	38					2,2		
57171	457	35					0,8		
57172	1252	56	1044	54		4	1784	9,5	
57173	2018	71						3,3	
57174	1792	67						0,1	
57175	1775	67						0,1	
57176	1577	63						3,3	
57177	1804	67						0,3	
57178	7051	135	3319	171			4	7067	0,1
57179	7018	135							0,4
57180	7052	135							0,1
57181	7082	135							0,1
57182	7113	137							0,3
57183	7411	138							2,5

Rivelatori sottoposti ad attacco chimico per 5 h:

Cod. Dos.	DT [cm ²]	u(DT) [cm ²]	Esp [kBq h m ⁻³]	u(ESP) [kBq h m ⁻³]	Tempo attacco [h]	med(DT)	ζ
57190	749	58	192	10	5	775	0,4
57191	787	46					0,3
57192	821	47					1,0
57193	764	45					0,2
57194	786	45					0,2
57195	697	42					1,8
57196	2685	83	1044	54		2821	1,6
57197	2829	84					0,1
57198	2937	86					1,3
57199	2813	84					0,1
57200	2615	85					2,4
57201	3309	91					5,4
57202	10960	174	3319	171		10924	0,2
57203	10511	170					2,4
57204	10682	172			1,4		
57205	11099	176			1,0		
57206	11341	178			2,3		
57207	10888	174			0,2		

Rivelatori sottoposti ad attacco chimico per 6 h:

Cod. Dos.	DT [cm ²]	u(DT) [cm ²]	Esp [kBq h m ⁻³]	u(ESP) [kBq h m ⁻³]	Tempo attacco [h]	med(DT)	ζ		
57214	826	64	192	10	6	835	0,1		
57215	828	49					0,1		
57216	946	52					2,2		
57217	968	51					2,6		
57218	822	48					0,3		
57219	841	47					0,1		
57220	3812	100	1044	54		6	3798	0,1	
57221	3973	101						1,7	
57222	3696	99						1,0	
57223	3686	98						1,1	
57224	3784	100						0,1	
57225	3917	102						1,2	
57226	12851	196	3319	171			6	13404	2,8
57227	14044	206							3,1
57228	13661	199							1,3
57229	12979	199							2,1
57230	13667	205							1,3
57231	13148	201							1,3

Rivelatori sottoposti ad attacco chimico per 7 h:

Cod. Dos.	DT [cm ²]	u(DT) [cm ²]	Esp [kBq h m ⁻³]	u(ESP) [kBq h m ⁻³]	Tempo attacco [h]	med(DT)	ζ
57238	742	57	192	10	7	848	1,8
57239	848	48					< 0,1
57240	847	49					< 0,1
57241	817	47					0,6
57242	919	50					1,4
57243	1184	57					5,9
57244	4662	112	1044	54		4297	3,2
57245	4092	107					1,9
57246	4358	109					0,6
57247	4237	107					0,6
57248	4196	107					0,9
57249	4637	113					3,0
57250	13944	216	3319	171		13702	1,1
57251	13372	211					1,6
57252	13739	214					0,2
57253	13665	214			0,2		
57254	13492	213			1,0		
57255	14031	217			1,5		

Rivelatori sottoposti ad attacco chimico per 8 h:

Cod. Dos.	DT [cm ²]	u(DT) [cm ²]	Esp [kBq h m ⁻³]	u(ESP) [kBq h m ⁻³]	Tempo attacco [h]	med(DT)	ζ	
57262	701	56	192	10	8	778	1,4	
57263	702	49					1,5	
57264	1777	72					13,9	
57265	778	48					< 0,1	
57266	778	47					< 0,1	
57267	1259	63					7,6	
57268	4080	109	1044	54		4407	3,0	
57269	4421	111					0,1	
57270	4978	118					4,8	
57271	4393	111					0,1	
57272	4511	113					0,9	
57273	4297	111					1,0	
57274	13715	225	3319	171			14170	2,0
57275	13970	228						0,9
57276	14369	232						0,9
57277	17950	268						14,1
57278	13303	220						3,9
57279	15065	239						3,7

Appendice G. Taratura: grafici

Nelle seguenti figure sono riportati i grafici delle rette di regressione ottenute tramite il metodo della "orthogonal distance regression" per la determinazione della sensibilità S e la relativa incertezza standard $u(S)$, per ogni valore del tempo di attacco. Nell'ultima figura è mostrata la curva di regressione ottenuta tramite il metodo della "orthogonal distance regression" per la determinazione del vettore dei parametri p , che descrive la dipendenza tra S e $D95\%$, e della matrice delle covarianze $cov(p, p)$.

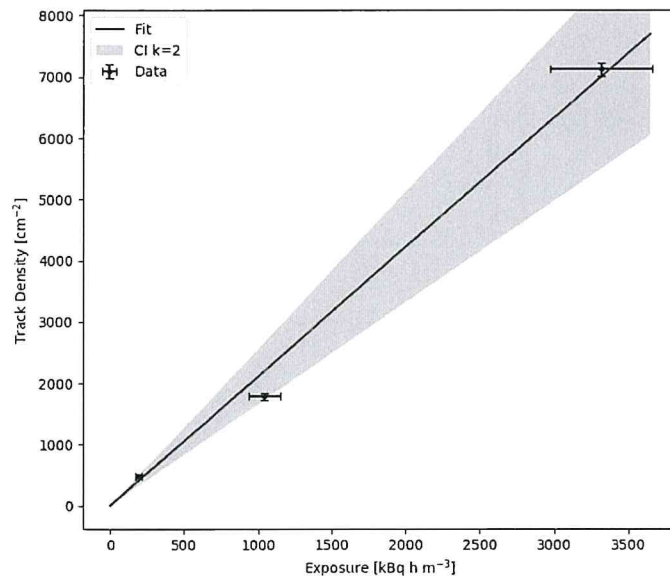


Figura 5. Retta di regressione per la determinazione della sensibilità S e dell'incertezza standard $u(S)$, per l'attacco chimico della durata di 4 h.

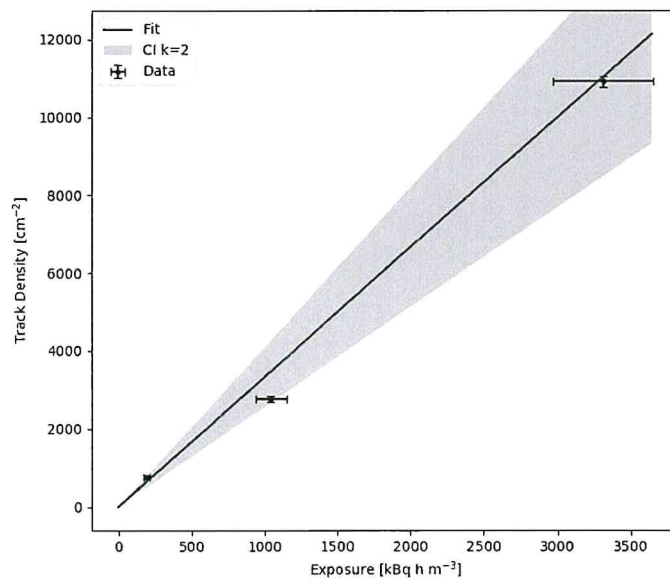


Figura 6. Retta di regressione per la determinazione della sensibilità S e dell'incertezza standard $u(S)$, per l'attacco chimico della durata di 5 h.

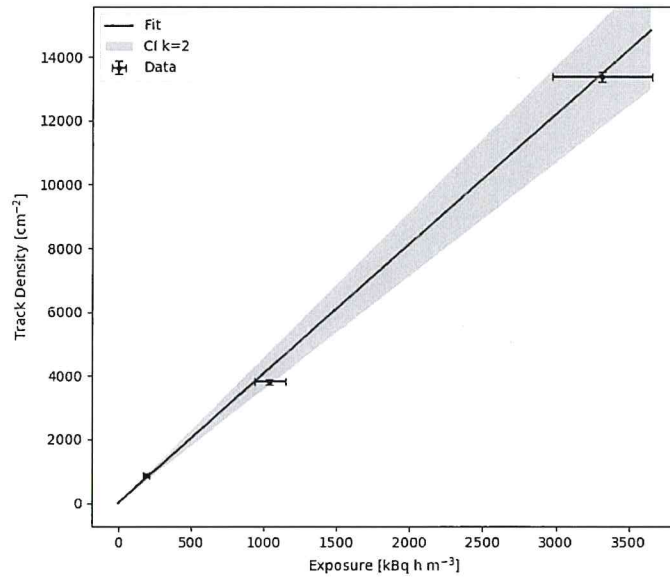


Figura 7. Retta di regressione per la determinazione della sensibilità S e dell'incertezza standard $u(S)$, per l'attacco chimico della durata di 6 h.

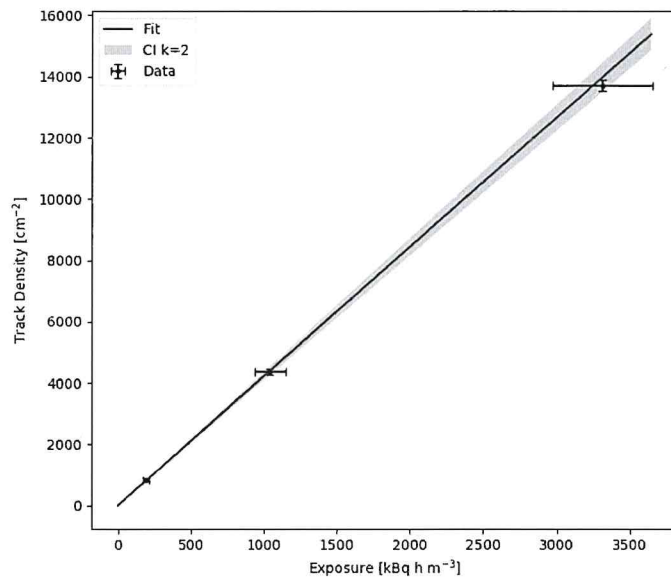


Figura 8. Retta di regressione per la determinazione della sensibilità S e dell'incertezza standard $u(S)$, per l'attacco chimico della durata di 7 h.

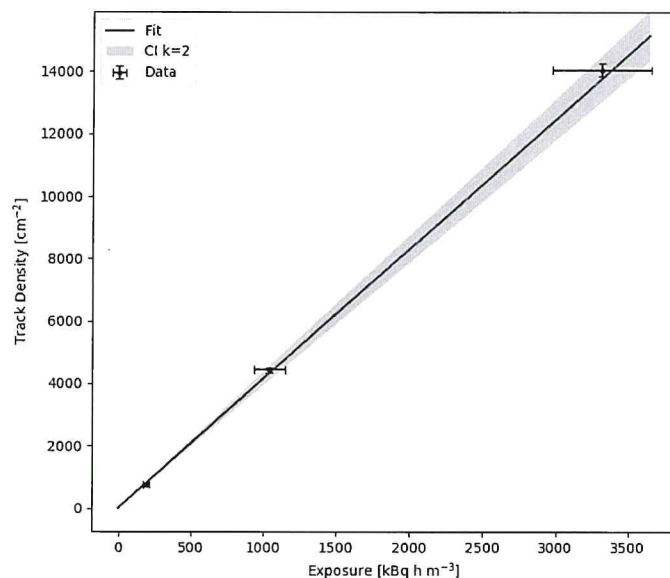


Figura 9. Retta di regressione per la determinazione della sensibilità S e dell'incertezza standard $u(S)$, per l'attacco chimico della durata di 8 h.

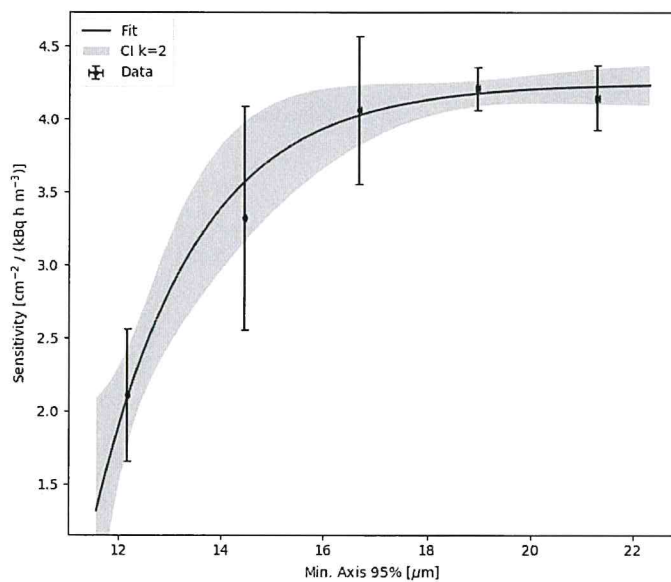


Figura 10. Curva di regressione per la determinazione del vettore dei parametri p e della matrice delle covarianze $cov(p, p)$, per determinare la dipendenza della sensibilità S dal parametro $D_{95\%}$.

Appendice H. Interconfronto: valori di esposizione misurati

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori di esposizione (Esp) e la risposta (R) misurati per ciascun rivelatore usato nell'interconfronto, e la relativa incertezza espansa (U(Esp) e U(R)) con fattore di copertura k=2.

Codice	Esp [kBq h m ⁻³]	U(Esp) k=2 [kBq h m ⁻³]	R	U(R) k=2	Rif [kBq h m ⁻³]
57489	2	11			0
57506	10	11			
57473	-11	12			
57494	-15	14			
57482	10	12			
57481	2	11			
57501	21	13			
Media gruppo	3				
Deviazione standard	443 %				
Errore relativo					

Codice	Esp [kBq h m ⁻³]	U(Esp) k=2 [kBq h m ⁻³]	R	U(R) k=2	Rif [kBq h m ⁻³]
57495	302	43	1,00	0,14	301
57505	289	41	0,96	0,14	
57486	305	43	1,01	0,14	
57491	304	43	1,01	0,14	
57499	280	41	0,93	0,14	
57474	318	45	1,06	0,15	
57478	336	46	1,12	0,15	
Media gruppo	305		1,01		
Deviazione standard	6,0 %		6,0 %		
Errore relativo	1,3 %		1,3 %		

	Codice	Esp [kBq h m ⁻³]	U(Esp) k=2 [kBq h m ⁻³]	R	U(R) k=2	Rif [kBq h m ⁻³]
	57496	760	90	0,94	0,11	808
	57475	836	99	1,03	0,12	
	57488	830	97	1,03	0,12	
	57500	894	104	1,11	0,13	
	57504	816	96	1,01	0,12	
	57484	820	97	1,02	0,12	
	57480	888	103	1,10	0,13	
Media gruppo	835		1,03			
Deviazione standard	5,5 %		5,5 %			
Errore relativo	3,3 %		3,3 %			

	Codice	Esp [kBq h m ⁻³]	U(Esp) k=2 [kBq h m ⁻³]	R	U(R) k=2	Rif [kBq h m ⁻³]
	57492	818	96	0,94	0,11	870
	57490	889	104	1,02	0,12	
	57485	862	101	0,99	0,12	
	57479	921	108	1,06	0,12	
	57498	924	108	1,06	0,12	
	57476	866	101	1,00	0,12	
	57503	1028	120	1,18	0,14	
Media gruppo	901		1,04			
Deviazione standard	7,4 %		7,4 %			
Errore relativo	3,6 %		3,6 %			

Codice	Esp [kBq h m ⁻³]	U(Esp) k=2 [kBq h m ⁻³]	R	U(R) k=2	Rif [kBq h m ⁻³]
57493	1977	217	0,99	0,11	1999
57477	1831	201	0,92	0,10	
57502	1786	196	0,89	0,10	
57487	2038	223	1,02	0,11	
57483	2036	223	1,02	0,11	
57497	2111	231	1,06	0,12	
57472	1984	217	0,99	0,11	
Media gruppo	1966		0,98		
Deviazione standard	5,9 %		5,9 %		
Errore relativo	-1,6 %		-1,6 %		