

DIPARTIMENTO RISCHI FISICI E TECNOLOGICI
Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

STRATEGIE DI MONITORAGGIO E CONTROLLO DEI SITI NUCLEARI
Aggiornamento 2022

Redazione	Funzione: Componente SS Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari	
	Nome: Luca Albertone	
	Funzione: Componente SS Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari	
	Nome: Manuela Marga	
	Funzione: Componente SS Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari	
Verifica	Nome: Giuseppe Tozzi	
	Funzione: Responsabile SS Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari	
Approvazione	Nome: Laura Porzio	
	Funzione: Responsabile Dipartimento Rischi fisici e tecnologici	
	Nome: Giovanni d'Amore	

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: djp.rischi.fisici.tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

INDICE

1. PREMESSA	3
2. INQUADRAMENTO NORMATIVO	3
3. LE RETI DI MONITORAGGIO	4
4. VALORI SOGLIA E VALORI DI SCREENING	8
Dose da esposizione esterna	10
Dose da ingestione	11
Dose da inalazione	15
5. ANALISI STATISTICA DEI DATI	17
6. STIMA DELLA DOSE	21
7. REQUISITI PRESTAZIONALI	23

1. PREMESSA

Il presente documento è stato redatto allo scopo di fornire una revisione ed un aggiornamento delle strategie adottate a partire dal 2006 da Arpa Piemonte nelle attività di monitoraggio e controllo radiologico dei siti nucleari Piemontesi di Bosco Marengo (AL), Saluggia (VC) e Trino (VC), con particolare riferimento agli obiettivi di:

- verificare costantemente i livelli di contaminazione ambientale;
- dare tempestiva informazione sul verificarsi di eventi anomali o di fenomeni di accumulo della radioattività nell'ambiente;
- verificare il rispetto dei limiti di dose fissati per la popolazione dalla normativa vigente.

Tale revisione si è resa necessaria per:

- aggiornamento dei limiti statistici;
- entrata in vigore del D. Lgs. 31 luglio 2020 n. 101 "Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, 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 e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117".

2. INQUADRAMENTO NORMATIVO

Il quadro legislativo di riferimento è costituito dal decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101 "Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, 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 e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117" e dalla Legge 31 dicembre 1962 n. 1860 e s.m.i.

In particolare, per quanto riguarda il monitoraggio della radioattività ambientale, l'art. 152 del D. Lgs. 31 luglio 2020 n. 101 demanda la gestione delle reti uniche regionali alle singole Regioni le quali, per l'effettuazione dei prelievi e delle misure, debbono avvalersi delle strutture pubbliche idoneamente attrezzate.

In quest'ambito la Regione Piemonte si avvale di Arpa Piemonte ed ha emanato la Legge regionale 18 febbraio 2010 n. 5 "Norme sulla protezione dai rischi da esposizione a radiazioni ionizzanti" e le disposizioni per lo svolgimento di dette attività di monitoraggio con D.G.R. 19 Gennaio 2018, n. 23-6389 "Legge regionale 18 febbraio 2010, n. 5 "Norme sulla protezione dai rischi da esposizione a radiazioni ionizzanti". Direttive per le attività di controllo ambientale della radioattività di origine naturale ed artificiale. Revoca della D.G.R. n. 17-11237 del 09.12.2003".

I compiti di controllo su tutti gli aspetti della sicurezza nucleare sono invece in capo all'ISIN, autorità di sicurezza nazionale. Tuttavia Arpa Piemonte svolge alcune attività di controllo in collaborazione con ISIN in attuazione dell'accordo quadro di collaborazione in materia di monitoraggio e radioattività ambientale tra l'ISIN, l'ISPRA e le ARPA/APPA" siglato nel maggio 2020.

In particolare il D. Lgs. 101/2020 disciplina i criteri base della radioprotezione ambientale e della protezione sanitaria degli individui della popolazione.

Inoltre il D. Lgs. 15 febbraio 2016 n. 28 "Attuazione della direttiva 2013/51/Euratom del Consiglio, del 22 ottobre 2013, che stabilisce requisiti per la tutela della salute della

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip.rischi.fisici.tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

popolazione relativamente alle sostanze radioattive presenti nelle acque destinate al consumo umano” fissa in particolare le caratteristiche radiometriche delle acque potabili.

3. LE RETI DI MONITORAGGIO

Le reti di monitoraggio della radioattività ambientale costituiscono lo strumento operativo attraverso il quale è possibile valutare l’impatto radiologico dei rilasci in normale esercizio degli impianti, segnalare eventuali anomalie – legate a modificazioni dell’assetto del territorio, o ad un diverso sfruttamento dello stesso, o ad eventi, non configurabili come situazioni incidentali, che comportino comunque un’alterazione dello stato radioecologico di una componente ambientale – nonché effettuare una stima della dose efficace per gli individui di riferimento della popolazione.

Una rete di monitoraggio è costituita essenzialmente da un insieme di punti di campionamento correlati a specifiche matrici ambientali e alimentari a cui vengono associate frequenze minime di campionamento.

Affinché una rete di monitoraggio possa dimostrarsi uno strumento efficace deve possedere alcune caratteristiche fondamentali:

- la significatività dei punti di campionamento rispetto alle modalità di diffusione dei contaminanti;
- la rappresentatività delle matrici prelevate;
- la capacità di segnalare tempestivamente qualsiasi anomalia;
- l’adeguatezza delle tecniche analitiche.

È possibile formulare le seguenti considerazioni generali:

- l’acqua degli acquedotti, distribuita ad un’utenza molto vasta, consente di controllare l’eventuale contaminazione della falda profonda;
- l’acqua dei pozzi privati e dei pozzi di controllo consente di controllare la contaminazione della falda superficiale;
- le matrici alimentari di produzione locale, oltre a fornire un indice del grado di diffusione della contaminazione nell’ambiente, consentono di calcolare il contributo alla dose efficace per gli individui di riferimento della popolazione in seguito all’ingestione di cibi eventualmente contaminati;
- i suoli consentono di controllare la contaminazione conseguente il rilascio sia degli effluenti liquidi che aeriformi;
- l’acqua superficiale e i sedimenti fluviali consentono di controllare la contaminazione conseguente il rilascio degli effluenti liquidi e di segnalare eventuali fenomeni di accumulo;
- il *fallout* (deposizione al suolo) consente di controllare la contaminazione conseguente il rilascio degli effluenti aeriformi e di effettuare una stima della quantità di radioattività che, presente nell’aria a causa di eventi incidentali, ricade al suolo sia per deposizione secca che umida (precipitazioni);
- il particolato atmosferico consente di controllare la contaminazione conseguente il rilascio degli effluenti aeriformi, fornisce indicazioni sul grado di contaminazione dell’aria e consente di dare tempestivamente l’allarme in merito a rilasci in atmosfera conseguenti ad incidenti radiologici in corso.

Nelle tabelle e figure seguenti sono riportati i piani di monitoraggio ordinari dei siti di Bosco Marengo, Saluggia e Trino revisionati nel 2020.

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

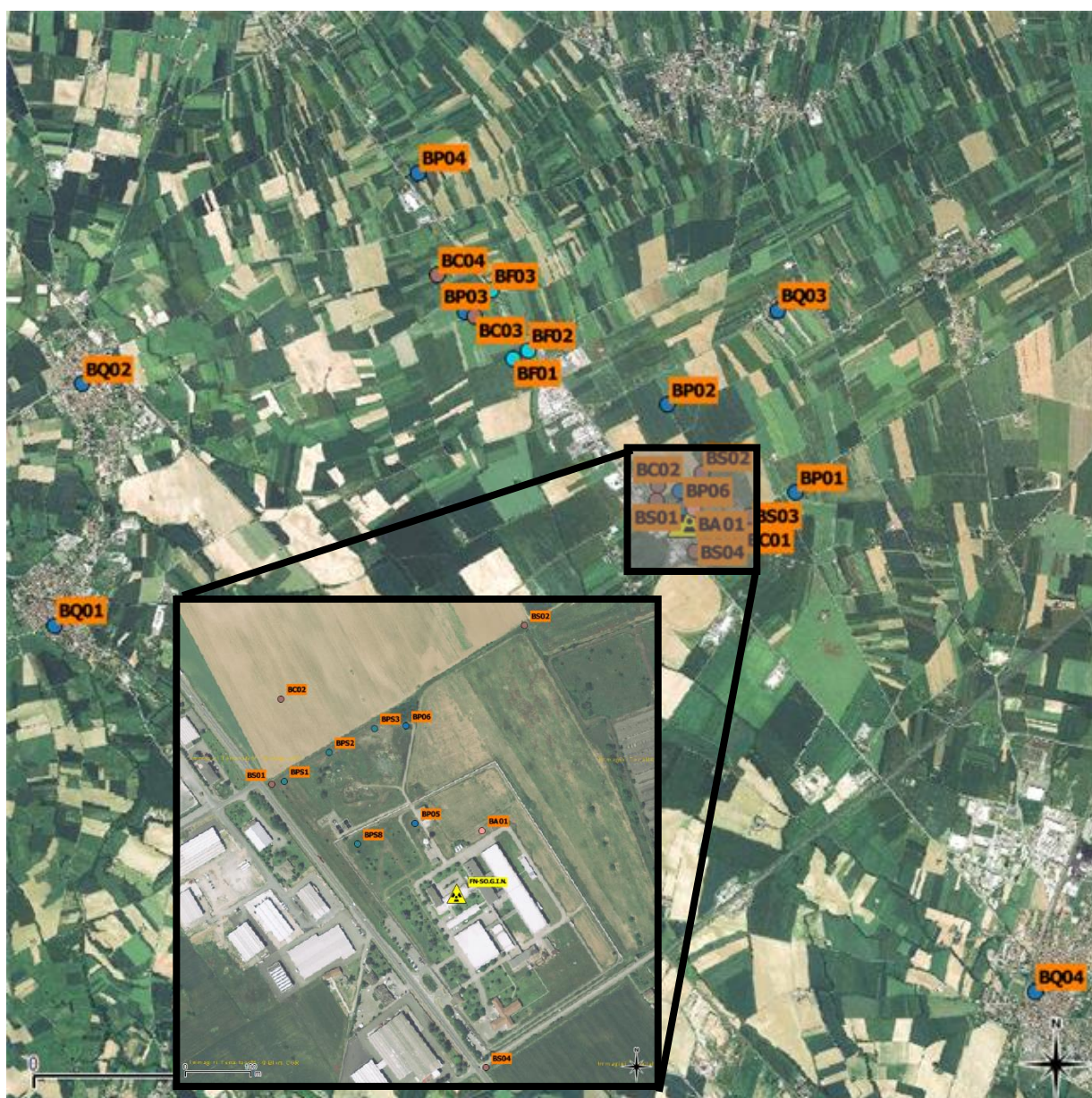
Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

Tabella 1 Piano di monitoraggio ordinario del sito nucleare di Bosco Marengo.

Matrice	Punti di campionamento	Frequenza di campionamento
Acqua potabile	BQ01, BQ02, BQ03, BQ04	Annuale
Acqua di falda superficiale	BP01, BP02, BP03, BP04, BP05, BP06, BPS1, BPS2, BPS3, BPS8	Annuale
Acqua superficiale	BF01, BF02, BF03	Scarico
Sedimenti fluviali	BF01, BF02, BF03	Scarico
Cereali di coltivazione locale	BC01, BC02, BC03, BC04	Annuale
Suolo	BS01, BS02, BS03, BS04	Annuale
Suolo coltivato	BC01, BC02, BC03, BC04	Annuale
Particolato atmosferico	BA01	Continua

Figura 1 Punti di campionamento del piano di monitoraggio ordinario del sito nucleare di Bosco Marengo.



ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

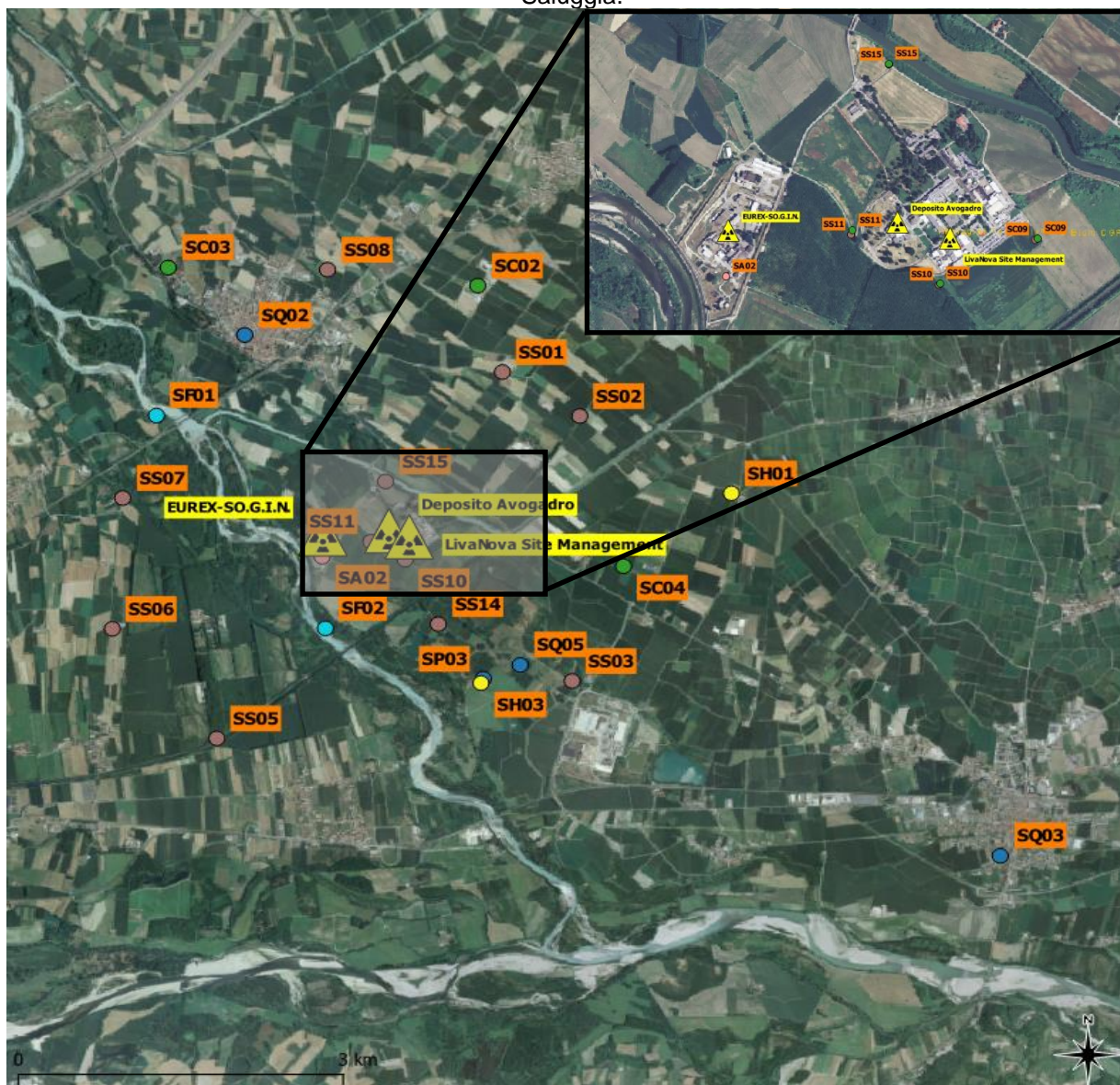
Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

Tabella 2 Piano di monitoraggio ordinario del sito nucleare di Saluggia.

Matrice	Punti di campionamento	Frequenza di campionamento
Acqua potabile	SQ02, SQ03, SQ05	Annuale/Mensile
Acqua di falda superficiale	SP03, S4.1/7	Quadrimestrale/Mensile
Acqua superficiale	SF01, SF02	Annuale
Cereali, fagioli, soia	SC01, SC02, SC03, SC09	Annuale
Latte	SC02, SC03, SC04	Semestrale
Sedimenti fluviali + DMOS	SF01, SF02	Semestrale
Ortaggi a foglia	SH01	Semestrale
Miele	SH01, SH03	Annuale
Erba	SS10, SS11, SS15	Semestrale
Suolo	SS01, SS02, SS03, SS05, SS06, SS07, SS08, SS10, SS11, SS15	Annuale
Suolo coltivato	SC01, SC02, SC03, SC09	Annuale
Particolato atmosferico	SA02	Continua

Figura 2 Punti di campionamento del piano di monitoraggio ordinario del sito nucleare di Saluggia.



ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

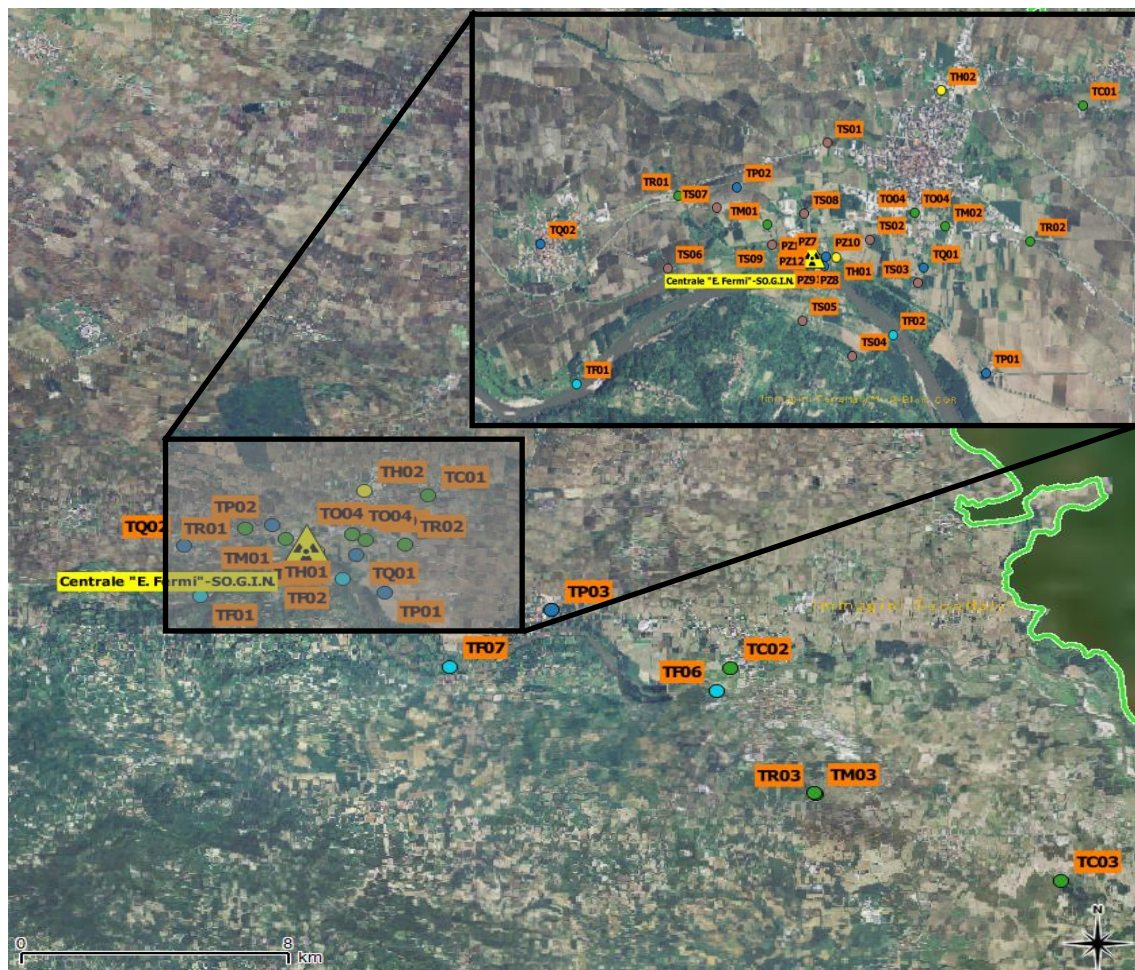
Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

Tabella 3 Piano di monitoraggio ordinario del sito nucleare di Trino.

Matrice	Punti di campionamento	Frequenza di campionamento
Acqua potabile	TQ01, TQ02	Annuale
Acqua di falda superficiale – pozzi esterni alla Centrale	TO04, TP01, TP02, TP03	Annuale
Acqua di falda superficiale – pozzi interni alla Centrale	PZ7, PZ8, PZ9, PZ10, PZ11, PZ12	Trimestrale
Acqua superficiale	TF01, TF02, TF07	Semestrale
Acqua superficiale	TF06	Annuale
Cereali	TM01, TM02, TM03, TR01, TR02, TR03	Annuale
Latte	TC01, TC02, TC03	Semestrale
Sedimenti fluviali	TF01, TF02, TF06	Annuale
DMOS	TF01, TF07	Semestrale
Ortaggi a foglia	TO04	Semestrale
Miele	TH01, TH02	Annuale
Pesce siluro	TF07	Semestrale
Foglie di salice	TF02, TF07	Semestrale
Erba	TS09	Annuale
Suolo	TS01, TS02, TS03, TS04, TS05, TS06, TS07, TS08, TS09	Annuale
Suolo coltivato	TM01, TM02, TM03, TR01, TR02, TR03	Annuale
Particolato atmosferico	TA01, TA02	Continua
Trizio in aria	TA02	Continua

Figura 3 Distribuzione dei punti di campionamento del piano di monitoraggio per il sito nucleare di Trino.



ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

4. VALORI SOGLIA E VALORI DI SCREENING

La grandezza su cui la legislazione vigente pone dei valori limite è la dose efficace E , data dalla somma delle dosi efficaci ricevute per esposizione esterna e impegnate per inalazione e per ingestione a seguito dell'introduzione di radionuclidi verificatesi nel periodo di riferimento¹:

$$E = E_{\text{est}} + \sum_j h(g)_{j,\text{ing}} J_{j,\text{ing}} + \sum_j h(g)_{j,\text{ina}} J_{j,\text{ina}}$$

- dove E_{est} è la dose efficace derivante da esposizione esterna;
- $h(g)_{j,\text{ing}}$ e $h(g)_{j,\text{ina}}$ rappresentano la dose efficace impegnata per unità di introduzione del radionuclide j rispettivamente ingerito o inalato da un individuo appartenente al gruppo di età g pertinente (≤ 1 anno, 1 anno, 5 anni, 10 anni, 15 anni, adulto) – D. Lgs. 101/2020, all. XXIV, §4 e ICRP pubblicazione n.119;
- $J_{j,\text{ing}}$ e $J_{j,\text{ina}}$ rappresentano rispettivamente l'introduzione tramite ingestione o tramite inalazione del radionuclide j ;

la somma è estesa a tutti i radionuclidi con esclusione di quelli naturalmente presenti nel corpo umano e nella crosta terrestre non perturbata; è altresì escluso il contributo della radiazione cosmica, così come l'esposizione per scopi medici (diagnostici o terapeutici).

Il limite di dose efficace E per gli individui della popolazione è stabilito² in 1 mSv/anno, mentre il contributo dovuto al fondo naturale di radiazioni è pari in media³ a 2,4 mSv/anno, con la composizione media riportata in Tabella 4.

Tabella 4 Dose media dovuta al fondo naturale di radiazioni (mSv/anno).

Componente	Contributo	Frazione
Raggi cosmici	0,39	16,1%
Radionuclidi crosta terrestre - esposizione esterna	0,48	19,8%
Radionuclidi crosta terrestre - esposizione interna	0,29	12,0%
Radon e discendenti	1,26	52,1%
Totale	2,4	

L'esposizione medica a scopo diagnostico ha un valore medio di 0,6 mSv/anno mentre l'esposizione a sorgenti di radiazioni artificiali è pari in media a 0,01 mSv/anno – 10 μ Sv/anno – come riportato in Tabella .

Tabella 5 Dose media dovuta all'esposizione a sorgenti di radiazioni artificiali (mSv/anno).

Componente	Contributo	Frazione
Test nucleari in atmosfera	0,005	41,0%
Esposizione occupazionale	0,005	41,0%
Incidente di Chernobyl	0,002	16,4%
Ciclo del combustibile nucleare - esposizione del pubblico	0,0002	1,6%
Totale	0,01	

¹ Il periodo di riferimento è l'anno solare.

² D.Lgs. 101/2020

³ UNSCEAR Report 2008 vol. I. I dati riportati si riferiscono al valor medio sull'intero globo terrestre.

In conformità ai criteri di base di cui all'allegato I del decreto legislativo 31 luglio 2020 n. 101, una pratica si può considerare priva di rilevanza radiologica quando, in tutte le possibili situazioni realisticamente ipotizzabili, la dose efficace a cui si prevede sia esposta una qualsiasi persona del pubblico, a causa di detta pratica, sia pari o inferiore a 10 μ Sv all'anno. È importante notare che il valore del limite per la non rilevanza radiologica corrisponde al valor medio globale dell'esposizione a sorgenti di radiazioni artificiali (Tabella). Nell'ambito delle attività di monitoraggio e controllo dei siti nucleari, si è scelto, cautelativamente, come limite di dose efficace il valore di 10 μ Sv/anno corrispondente alla non rilevanza radiologica.

I limiti fissati dalla normativa non sono direttamente confrontabili con i risultati analitici, che forniscono dei valori di contaminazione, dal momento che si tratta di grandezze di natura diversa:

- la dose efficace E è la quantificazione del rischio dovuto all'esposizione a radiazioni ionizzanti;
- la concentrazione di un radionuclide in una matrice è un dato "grezzo", che può essere considerato soltanto come un punto di partenza per la valutazione della dose efficace, e quindi del rischio.

La stima della dose efficace deve necessariamente tenere conto di tutte le possibili vie di esposizione – dette vie critiche – per tutti gli individui della popolazione potenzialmente coinvolti. Soltanto uno studio radioecologico dedicato alla pratica in esame e all'ambiente, umano e naturale, nel quale tale pratica viene svolta può permettere di valutare correttamente la dose efficace attraverso la conoscenza dei dati di contaminazione di matrici ambientali e alimentari – che rappresentano la caratterizzazione dello stato radiologico del sito oggetto d'indagine.

A tal fine, conoscendo le specifiche degli impianti da monitorare, è possibile formulare le seguenti ipotesi:

- gli effluenti liquidi e gassosi, immessi nell'ambiente secondo le rispettive formule di scarico, sono responsabili della eventuale contaminazione delle matrici ambientali: acqua superficiale, sedimenti fluviali, suolo, acqua di falda, particolato atmosferico; possono inoltre essere responsabili in maniera diretta della contaminazione delle matrici alimentari (ad esempio attraverso la deposizione al suolo della contaminazione presente in aria);
- la contaminazione delle matrici ambientali può trasferirsi alle matrici alimentari di produzione locale: latte, cereali, ortaggi; può trasferirsi inoltre all'acqua potabile distribuita dagli acquedotti.

Le matrici ambientali contaminate sono responsabili della dose da esposizione esterna e da inalazione, mentre le matrici alimentari contaminate sono responsabili della dose da ingestione.

Utilizzando opportune ipotesi è possibile determinare dei valori soglia di concentrazione – nel seguito soglia di non rilevanza radiologica o più brevemente soglia – che comportano il raggiungimento del limite di 10 μ Sv/anno. Tali soglie non costituiscono dei limiti di legge ma dei livelli operativi di confronto per disporre di un efficace strumento di valutazione, valido esclusivamente nell'ambito delle assunzioni fatte.

È inoltre necessario puntualizzare che queste considerazioni, che non si applicano alle situazioni di emergenza, riguardano condizioni stazionarie di contaminazione delle matrici ambientali ed alimentari.

Le soglie sono confrontabili con le concentrazioni medie osservate – intese sia come medie spaziali sia come medie temporali – e l'occasionale superamento delle stesse non comporta necessariamente il raggiungimento del limite di dose. Ciò nonostante, il

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

superamento delle soglie costituisce una condizione sufficiente, ma non necessaria, ad indagini più approfondite per individuarne le cause e proporre, eventualmente, azioni volte alla minimizzazione del rischio.

I radionuclidi riportati sono stati scelti, a titolo esemplificativo, in funzione della radiotossicità, della via critica di esposizione e dell'inventario di radioattività degli impianti.

Dose da esposizione esterna

Per la valutazione della dose da esposizione esterna è necessario formulare alcune ipotesi:

- per i suoli non coltivati si assume che l'eventuale contaminazione sia confinata nello strato superficiale (0-5 cm);
- per i suoli coltivati si assume che l'eventuale contaminazione sia uniformemente distribuita in profondità per effetto delle operazioni di aratura;
- il fattore di occupazione⁴ è di 1 ora/giorno.

Utilizzando i coefficienti di dose adeguati⁵ è possibile ricavare le soglie di non rilevanza radiologica per suoli non coltivati e suoli coltivati riportate in Tabella 6 e Tabella 7 rispettivamente.

Tabella 6 Soglia di non rilevanza radiologica per i suoli non coltivati (Bq/kg).

Nuclide	Soglia
Co-60	110
Cs-134	170
Cs-137	460
Am-241	22000

Tabella 7 Soglia di non rilevanza radiologica per i suoli coltivati (Bq/kg).

Nuclide	Soglia
Co-60	55
Cs-134	94
Cs-137	260
Am-241	20000

⁴ Il fattore di occupazione è il tempo medio di permanenza su un suolo contaminato nell'arco delle 24 ore.

⁵ EPA-402-R-93-081.

Dose da ingestione

Per la valutazione della dose da ingestione è necessario formulare alcune ipotesi:

- gli individui della popolazione residente nei pressi degli impianti⁶ consumano alimenti esclusivamente di produzione locale;
- la dieta media dell'individuo di riferimento è ben rappresentata dalla dieta media⁷ riportata in Tabella 8.

Tabella 8 Consumi medi dei principali alimenti della dieta italiana (kg/anno).
CEVaD – Emergenze nucleari e radiologiche – Manuale per le Valutazioni Dosimetriche e le Misure Ambientali – marzo 2010.

Alimento	Lattanti	Bambini	Adulti
Cereali	18	88	110
Carni bovine	7	20	24
Carni suine	0	11	22
Carni ovine	0	1	1
Pollame	7	11	13
Pesce	7	9	11
Latte	256	91	80
Derivati del latte	4	11	15
Uova	5	9	11
Vegetali a foglia	9	37	55
Altri vegetali	9	91	124
Frutta	18	73	95
Olio	4	15	18
Vino	0	0	91
Acqua potabile	256	365	548

Per quanto riguarda l'acqua potabile, le cui soglie di non rilevanza radiologica sono riportate in Tabella , il D. Lgs. 15 febbraio 2016 n. 28 "Attuazione della direttiva 2013/51/EURATOM del Consiglio, del 22 ottobre 2013, che stabilisce requisiti per la tutela della salute della popolazione relativamente alle sostanze radioattive presenti nelle acque destinate al consumo umano" fissa in 100 Bq/l il valore limite per radon e trizio ed in 0,1 mSv/anno la dose totale indicativa – dose efficace impegnata per un anno d'ingestione risultante da tutti i radionuclidi, di origine naturale e artificiale, presenti nelle acque destinate al consumo umano, ad eccezione di trizio, K-40, radon e prodotti di decadimento del radon a vita breve (Tabella 9).

Tabella 9 Limiti per l'acqua potabile ex D. Lgs. 28/2016

Nuclide	Screening
H-3	100 Bq/l
Radon	100 Bq/l
Dose totale indicativa	0,1 mSv/anno

⁶ Tipicamente si considerano distanze dell'ordine di 5-10 km.

⁷ CEVaD – Emergenze nucleari e radiologiche – Manuale per le Valutazioni Dosimetriche e le Misure Ambientali – marzo 2010.

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip.rischi.fisici.tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

Il calcolo della dose indicativa può essere effettuato attraverso due strategie differenti.

1. Strategia di screening basata sulla misura dell'attività alfa totale e beta totale.
Il rispetto dei valori di screening per l'attività alfa totale e beta totale riportati in Tabella 10 generalmente garantisce il rispetto della dose indicativa. In caso contrario sono necessarie misure di approfondimento. È necessario notare che alle attività alfa totale e beta totale contribuiscono tutti i radionuclidi naturalmente presenti nell'acqua, in particolare le famiglie dell'U-238, del Th-232 e dell'U-235 nonché il K-40, il cui contributo non deve essere considerato.

Tabella 10 Valori di screening per l'acqua potabile ex D. Lgs. 28/2016 (Bq/l).

Nuclide	Screening
Alfa totale	0,1
Beta totale	0,5

2. Strategia di screening basata sull'analisi della concentrazione dei singoli nuclidi.
Vengono preliminarmente determinati i radionuclidi da misurare in relazione alle possibili fonti di rilascio. Il calcolo della dose indicativa viene poi effettuato tenendo conto di tutti i contributi. Il D. Lgs. 28/2016 riporta inoltre i valori di concentrazioni di attività derivate per i principali radionuclidi di origine naturale ed artificiale (Tabella 11 Tabella) assumendo un consumo annuo di 730 l di acqua: utilizzando le concentrazioni di attività derivate la dose indicativa è data da:

$$DI = \sum_{i=1}^n \frac{C_i(\text{misurata})}{C_i(\text{derivata})} \cdot 0,1 \text{ mSv/anno}$$

Tabella 11 Soglie di non rilevanza radiologica e concentrazioni derivate ex D. Lgs. 28/2016 per l'acqua potabile (Bq/l).

Nuclide	Lattanti	Bambini	Adulti	Soglia	Concentrazione derivata ex D. Lgs. 28/2016
H-3	610	1191	1014	610	-
Co-60	0,72	2,5	5,4	0,72	40
Sr-90	0,17	0,46	0,65	0,17	4,9
Cs-134	1,5	2,0	0,96	0,96	7,2
Cs-137	1,9	2,7	1,4	1,4	11
U-234	0,11	0,37	0,37	0,11	2,8
U-235	0,11	0,39	0,39	0,11	2,9*
U-238	0,11	0,40	0,41	0,11	3,0
Pu-238	0,010	0,11	0,079	0,010	0,6*
Pu-239/240	0,0093	0,10	0,073	0,0093	0,6
Am-241	0,011	0,12	0,091	0,0117	0,7

* Valore non riportato dal D.Lgs. 28/2016 e calcolato con le stesse ipotesi

Pur continuando ad effettuare le misure di screening di attività alfa totale e beta totale allo scopo di evidenziare tempestivamente anomalie rispetto alle serie storiche (si veda il successivo paragrafo), si è scelto di utilizzare la strategia di screening basata sull'analisi della concentrazione dei singoli nuclidi di cui al punto 2.

Inoltre, visto lo specifico contesto che vede la presenza di impianti nucleari come possibile fonte di rilascio, si ritiene opportuno continuare ad utilizzare come livello operativo il valore soglia per la non rilevanza radiologica, dal momento che il limite di

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

10 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ ai sensi del D. Lgs. 101/2020 ed il limite di 0,1 mSv/anno ai sensi del D. Lgs. 28/2016 devono essere contemporaneamente rispettati: per quanto riguarda i radionuclidi di origine artificiale correlabili ai siti nucleari deve quindi sempre essere rispettato il limite di 10 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ ai sensi del D. Lgs. 101/2020.

La Raccomandazione 2000/473/Euratom fissa i livelli notificabili per H-3, Cs-137 e Sr-90 nell'acqua potabile, che sono stati scelti come valori di screening (Tabella 12). Il valore fissato per H-3 coincide con il limite ex D. Lgs. 28/2016.

Tabella 12 Valori di screening per l'acqua potabile dai livelli notificabili secondo la Raccomandazione 2000/473/Euratom (Bq/l).

Nuclide	Screening
H-3	100
Sr-90	0,06
Cs-137	0,1

Per quanto riguarda la tossicità chimica dell'uranio, World Health Organization fissa in 30 $\mu\text{g}/\text{l}$ il valore guida per l'uranio totale nell'acqua potabile. Dal momento che l'uranio naturale è costituito da una miscela dei tre isotopi U-234, U-235 e U-238 che contribuiscono, rispettivamente, allo 0,0053%, 0,711% e 99,284% della massa di uranio totale⁸, si può facilmente convertire il valore guida di 30 $\mu\text{g}/\text{l}$ di uranio totale in 0,74 Bq/l. E' utile osservare che, dal momento che l'arricchimento⁹ massimo consentito per usi civili è pari al 5%, dal punto di vista della tossicità chimica l'unico isotopo rilevante è U-238. Come si può notare dalla Tabella la soglia di non rilevanza radiologica per U-238 è 0,11 Bq/l, per cui il rispetto del criterio dosimetrico per U-238 comporta necessariamente il rispetto del valore guida per la tossicità chimica dell'uranio totale.

Si è comunque scelto di assumere il valore di 0,74 Bq/l come valore di screening per l'uranio totale come riportato in Tabella 13.

Tabella 13 Valori di screening per la tossicità chimica dell'uranio totale nell'acqua potabile secondo World Health Organization (Bq/l).

Nuclide	Screening
Uranio totale	0,74

Tutte le considerazioni precedenti valgono, cautelativamente, anche per l'acqua di falda superficiale.

La Raccomandazione 2000/473/Euratom fissa inoltre i livelli notificabili per l'attività beta totale residua e per il Cs-137 nell'acqua superficiale – anche se l'acqua superficiale non fornisce un contributo alla dose efficace, ma rappresenta un utile indicatore ambientale. Tali livelli sono stati scelti come valori di screening per l'attività beta totale e per il Cs-137 in questa matrice (Tabella 14).

⁸ In termine di attività i contributi di U-234, U-235 e U-238 per l'uranio naturale sono, rispettivamente, 48,9%, 2,2% e 48,9%.

⁹ L'arricchimento è definito come il rapporto tra la massa di U-235 e la massa di uranio totale. Per l'uranio naturale l'arricchimento è pari a 0,711%.

Tabella 14 Valori di screening per l'acqua superficiale dai livelli notificabili secondo la Raccomandazione 2000/473/Euratom (Bq/l).

Nuclide	Screening
Beta totale	0,6
Cs-137	1

Di seguito sono riportate le soglie di non rilevanza radiologica per le classi di alimenti prodotti localmente – cereali in Tabella 15, latte in Tabella 16, vegetali a foglia in Tabella 17 e gli altri vegetali in Tabella 18 – che compongono la dieta media. Le altre classi di alimenti non sono considerate nel seguito in quanto non di produzione locale per i siti oggetto di indagine.

Tabella 15 Soglie di non rilevanza radiologica per i cereali (Bq/kg).

Nuclide	Lattanti	Bambini	Adulti	Soglia
Co-60	10	10	27	10
Sr-90	2,4	1,9	3,2	1,9
Cs-134	21	8,1	4,8	4,8
Cs-137	26	11	7,0	7,0
U-234	1,5	1,5	1,9	1,5
U-235	1,6	1,6	1,9	1,6
U-238	1,6	1,7	2,0	1,6
Pu-238	0,14	0,47	0,40	0,14
Pu-239/240	0,13	0,42	0,36	0,13
Am-241	0,15	0,52	0,45	0,15

Tabella 16 Soglie di non rilevanza radiologica per il latte (Bq/l).

Nuclide	Lattanti	Bambini	Adulti	Soglia
Co-60	0,72	10	37	0,72
Sr-90	0,17	1,8	4,5	0,17
Cs-134	1,5	7,8	6,6	1,5
Cs-137	1,9	11	9,6	1,9
U-234	0,11	1,5	2,6	0,11
U-235	0,11	1,5	2,7	0,11
U-238	0,11	1,6	2,8	0,11
Pu-238	0,010	0,46	0,54	0,010
Pu-239/240	0,0093	0,41	0,50	0,0093
Am-241	0,011	0,50	0,63	0,011

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

Tabella 17 Soglie di non rilevanza radiologica per i vegetali a foglia (Bq/kg).

Nuclide	Lattanti	Bambini	Adulti	Soglia
Co-60	21	25	53	21
Sr-90	4,8	4,5	6,5	4,5
Cs-134	43	19	9,6	9,6
Cs-137	53	27	14	14
U-234	3,0	3,7	3,7	3,0
U-235	3,2	3,8	3,9	3,2
U-238	3,3	4,0	4,0	3,3
Pu-238	0,28	1,1	0,79	0,28
Pu-239/240	0,26	1,0	0,73	0,26
Am-241	0,30	1,2	0,91	0,30

Tabella 18 Soglie di non rilevanza radiologica per gli altri vegetali (Bq/kg).

Nuclide	Lattanti	Bambini	Adulti	Soglia
Co-60	21	10	24	10
Sr-90	4,83	1,83	2,88	1,8
Cs-134	42,7	7,8	4,2	4,2
Cs-137	53	11	6,2	6,2
U-234	3,0	1,5	1,6	1,5
U-235	3,2	1,5	1,7	1,5
U-238	3,3	1,6	1,8	1,6
Pu-238	0,28	0,46	0,35	0,28
Pu-239/240	0,26	0,41	0,32	0,26
Am-241	0,30	0,50	0,40	0,30

Per quanto riguarda la tossicità chimica dell'Uranio, World Health Organization fissa il rateo di introduzione giornaliero (TDI – *Tolerable Daily Intake*) in 60 µg/giorno. In generale, per tutte le matrici alimentari, il rispetto del criterio dosimetrico per U-238 comporta necessariamente il rispetto dei criteri per la tossicità chimica dell'uranio totale.

Per il latte la Raccomandazione 2000/473/Euratom fissa i livelli notificabili per Sr-90 e Cs-137, che sono stati scelti come valori di screening.

Tabella 19 Valori di screening per il latte dai livelli notificabili secondo la Raccomandazione 2000/473/Euratom (Bq/m³).

Nuclide	Screening
Sr-90	0,2
Cs-137	0,5

Dose da inalazione

Per la valutazione della dose da inalazione è necessario formulare l'ipotesi che i volumi medi inalati dall'individuo di riferimento siano ben rappresentati dai dati in Tabella 20.

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip.rischi.fisici.tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

Tabella 20 Volumi medi inalati (m³/h).
CEVaD – Emergenze nucleari e radiologiche – Manuale per le Valutazioni Dosimetriche e le Misure Ambientali – marzo 2010.

	Lattanti	Bambini	Adulti
Volume inalato	0,12	0,64	0,93

Utilizzando i coefficienti di dose appropriati, per la modalità di assorbimento polmonare raccomandata, è possibile ricavare le soglie di non rilevanza radiologica per il particolato atmosferico riportate in Tabella 21.

Tabella 21 Soglia di non rilevanza radiologica per il particolato atmosferico (Bq/m³).

Nuclide	Lattanti	Bambini	Adulti	Soglia
H-3	28	22	27	22
Co-60	0,23	0,12	0,12	0,12
Sr-90	0,063	0,035	0,034	0,034
I-131	0,13	0,094	0,17	0,094
Cs-134	0,86	0,34	0,19	0,19
Cs-137	1,1	0,48	0,27	0,27
U-234	0,00063	0,00037	0,00035	0,00035
U-235	0,00073	0,00041	0,00040	0,00040
U-238	0,00079	0,00045	0,00042	0,00042
Pu-238	0,00012	0,000041	0,000027	0,000027
Pu-239/240	0,00012	0,000037	0,000025	0,000025
Am-241	0,00013	0,000045	0,000029	0,000029

Per il particolato atmosferico la Raccomandazione 2000/473/Euratom fissa i livelli notificabili per l'attività beta totale ritardata e Cs-137, che sono stati scelti come valori di screening.

Tabella 22 Valori di screening per il particolato atmosferico dai livelli notificabili secondo la Raccomandazione 2000/473/Euratom (Bq/m³).

Nuclide	Screening
Beta totale ritardata	0,005
Cs-137	0,03

5. ANALISI STATISTICA DEI DATI

Indipendentemente dal rispetto delle soglie di non rilevanza radiologica, ai fini del monitoraggio ambientale è di notevole interesse individuare dati anomali rispetto alle serie storiche o andamenti temporali significativi. Inoltre, per molte matrici ambientali non è possibile definire né soglie di non rilevanza radiologica – dal momento che non contribuiscono alla dose efficace – né valori di screening, per cui l'approccio statistico è l'unico possibile.

Si è scelto di effettuare l'analisi statistica dei dati di misura utilizzando l'approccio ai controlli interni della qualità di un laboratorio analitico tramite carte di controllo¹⁰.

Una carta di controllo è basata sulle caratteristiche statistiche delle variazioni casuali di un valore misurato, definite dalla funzione di distribuzione normale. Nelle applicazioni ai controlli interni della qualità di un laboratorio analitico si definiscono generalmente:

1. una linea centrale (LC) , che rappresenta la media dei valori di controllo o il valore nominale di un materiale di riferimento;
2. due linee, ad una distanza di \pm due volte lo scarto tipo dalla linea centrale ($LC \pm 2s$), denominate limiti di allarme; purché i risultati siano distribuiti normalmente, approssimativamente il 95% dei risultati stessi dovrebbe trovarsi all'interno di questi limiti;
3. due linee, ad una distanza di \pm tre volte lo scarto tipo dalla linea centrale ($LC \pm 3s$), denominate limiti di azione; il 99,7% dei dati normalmente distribuiti dovrebbe trovarsi all'interno di questi limiti.

Perciò, statisticamente, solo tre misurazioni su mille possono trovarsi al di fuori dei limiti di azione. Se il valore si trova fuori dei limiti di azione, c'è un'alta probabilità che il processo sia fuori controllo statistico.

Nell'applicare tale approccio all'analisi statistica dei dati ambientali si è scelto di mantenere – con le stesse definizioni – i limiti di allarme ($LC \pm 2s$) ed i limiti di azione ($LC \pm 3s$).

I limiti di allarme e di azione sono ricalcolati ogni anno utilizzando i dati fino all'anno precedente, dopo averli sottoposti ad un controllo preliminare per la verifica della normalità delle distribuzioni. Per i valori inferiori al limite di rivelabilità si è assunta una distribuzione rettangolare tra zero ed il limite di rivelabilità stesso.

I limiti così calcolati sono caratteristici per ogni punto di campionamento, ogni matrice e parametro e dipendono dal numero di dati disponibili. Sono riportati in calce alle relazioni.

L'interpretazione dei dati porta a tre casi possibili, di seguito descritti.

1. *La contaminazione è stazionaria e la variabilità osservata è dovuta alla natura aleatoria del fenomeno.*

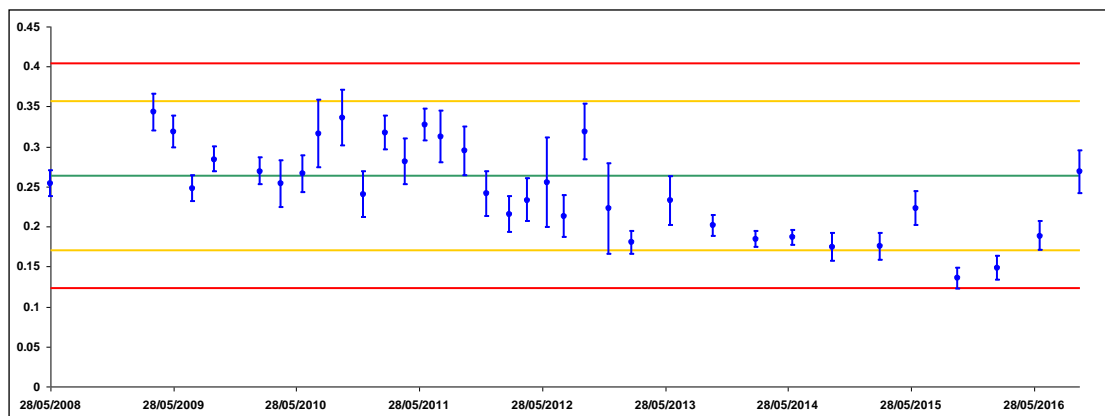
Ciò accade se il dato è compreso tra il limite di allarme inferiore ed il limite di allarme superiore oppure se si trova tra il limite di allarme ed il limite di azione ma i due dati precedenti sono compresi tra il limite di allarme inferiore ed il limite di allarme superiore.

Un esempio di caso stazionario – riportato in Figura 4 – è dato dalla contaminazione da Sr-90 dell'acqua di falda superficiale nel pozzo di controllo A9 a valle del Complesso LivaNova Site Management s.r.l. di Saluggia. Tale pozzo si trova ad una distanza sufficiente dalle possibili fonti di contaminazione da non

¹⁰ Rapporti ISTISAN 12/29, Controllo della qualità interno: manuale per i laboratori di analisi chimiche. Quarta edizione (2011) del Nordtest Report TR 569, Traduzione italiana.

risentire della soggiacenza della falda acquifera. L'interpretazione dei dati consente di ipotizzare che nel periodo di osservazione il fenomeno non ha subito variazioni significative.

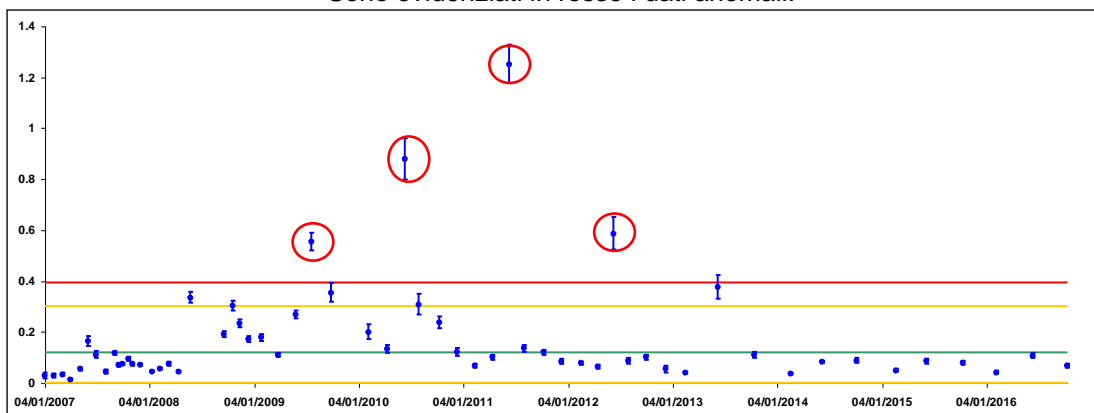
Figura 4 Andamento della concentrazione di Sr-90 nell'acqua di falda superficiale prelevata nel pozzo di controllo A9 a valle del Complesso LivaNova Site Management s.r.l. di Saluggia (Bq/l).



2. *La contaminazione presenta un andamento temporale significativo dal punto di vista statistico.* Ciò accade se sette dati in ordine consecutivo aumentano o diminuiscono. Non sono stati riscontrati casi di questo tipo.
3. *La contaminazione presenta dati anomali non giustificati dalla natura aleatoria del fenomeno.* Ciò accade se il dato è al di sotto del limite di azione inferiore o al di sopra del limite di azione superiore oppure se si trova tra il limite di allarme ed il limite di azione e almeno uno dei due dati precedenti è anch'esso tra il limite di allarme ed il limite di azione.

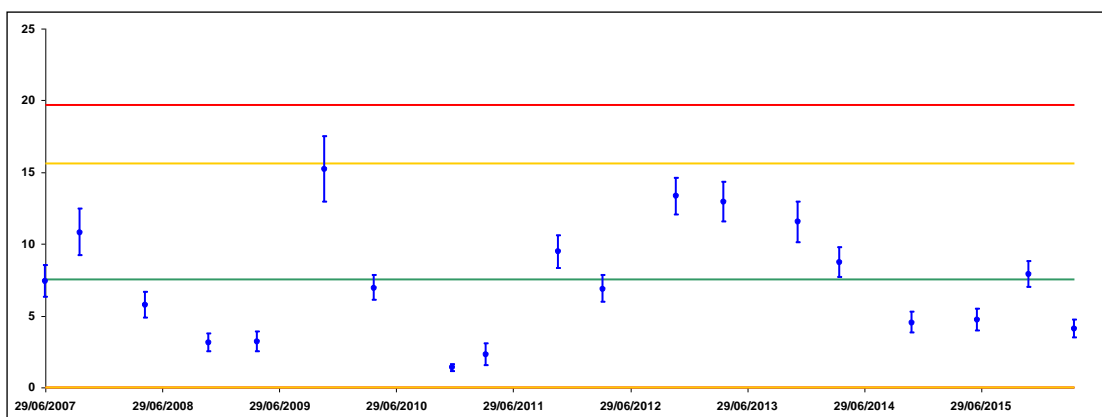
In Figura 5 è riportato l'andamento della contaminazione da Sr-90 dell'acqua di falda superficiale nel pozzo di controllo SPB dell'impianto EUREX-SO.G.I.N. di Saluggia (VC) dove è evidente la presenza di numerosi dati anomali. Tale pozzo si trova a pochi metri dalla piscina del combustibile nucleare irraggiato – ormai svuotata e bonificata – per cui risente della soggiacenza della falda acquifera. I dati anomali, ricorrenti dal 2008 con periodicità annuale in corrispondenza dei massimi livelli di falda, sono in realtà spiegati da un incremento della contaminazione del suolo sottostante la piscina a seguito dei lavori di svuotamento e bonifica, mentre i dati al di sotto del limite di allarme sono riferibili ad una contaminazione ormai cronica.

Figura 5 Andamento della contaminazione da Sr-90 nell'acqua di falda superficiale prelevata nel pozzo di controllo SPB all'interno dell'impianto EUREX-SO.G.I.N. di Saluggia (Bq/l). Sono evidenziati in rosso i dati anomali.



Nei grafici di Figura 6 e Figura 7 è riportato l'andamento della contaminazione da Cs-137 nei sedimenti della Dora Baltea, rispettivamente, a monte e a valle del sito nucleare di Saluggia. La Figura 6 è un esempio di fondo ambientale locale stazionario, mentre in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si evidenziano tre dati anomali attribuibili, il primo, allo scarico dell'acqua trattata della piscina del combustibile nucleare irraggiato dell'impianto EUREX-SO.G.I.N. ed il secondo ed il terzo a due scarichi di effluenti radioattivi liquidi del Deposito Avogadro.

Figura 6 Andamento della contaminazione da Cs-137 nei sedimenti della Dora Baltea a monte del sito nucleare di Saluggia (Bq/kg). Non sono presenti dati anomali.



ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

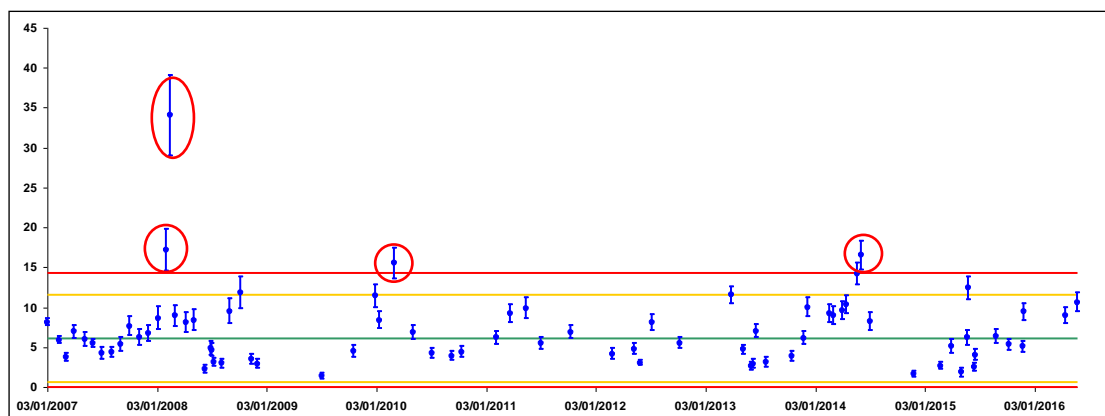
Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

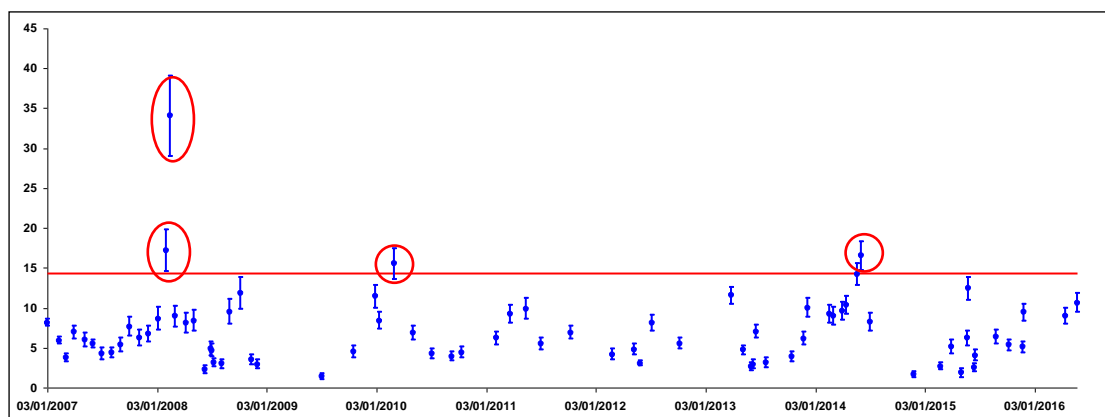
Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

Figura 7 Andamento della contaminazione da Cs-137 nei sedimenti della Dora Baltea a valle del sito nucleare di Saluggia (Bq/kg). Sono evidenziati in rosso i dati anomali.



Al fine di rendere più semplice ed immediata la lettura e l'interpretazione dei grafici riportati nelle relazioni si è scelto di visualizzare il solo limite di allarme superiore – il più utile per individuare eventuali dati anomali – come riportato a titolo esemplificativo in Figura 8 per gli stessi dati di Figura 7.

Figura 8 Andamento della contaminazione da Cs-137 nei sedimenti della Dora Baltea a valle del sito nucleare di Saluggia (Bq/kg). Sono evidenziati in rosso i dati anomali. Visualizzazione del solo limite di allarme superiore.



Nella relazioni di monitoraggio dei siti nucleari di Bosco Marengo (AL), Saluggia (VC) e Trino (VC) sono riportati, per ogni punto, matrice e parametro di ciascuna rete, tutti i Limiti statistici, le Soglie di non rilevanza radiologica, le Concentrazioni derivate ex D. Lgs. 28/2016 ed i valori di Screening.

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

6. STIMA DELLA DOSE

Alla dose efficace possono contribuire, attraverso differenti vie critiche, sia matrici alimentari¹¹ sia ambientali, come riassunto in Tabella 23

Tabella 23 Matrici alimentari e ambientali che possono contribuire alla dose efficace.

Via critica	Matrice
Ingestione	Acqua potabile
	Acqua di falda superficiale
	Cereali
	Latte
	Vegetali a foglia
	Altri vegetali
Inalazione	Particolato atmosferico
Irraggiamento	Suolo
	Suolo coltivato

Le matrici e i radionuclidi di riferimento sono stati individuati, per ogni sito, in funzione delle informazioni disponibili sulle caratteristiche degli impianti, sui punti di campionamento, sulla radiotossicità e sul comportamento chimico dei radionuclidi stessi. Nelle tabelle seguenti sono riportate le matrici e i radionuclidi di riferimento individuati per ogni sito. I cereali, il latte ed i vegetali di produzione locale fanno parte integrante della dieta, così come l'acqua potabile e l'acqua di falda superficiale, assimilata cautelativamente all'acqua potabile stessa.

Per il sito di Bosco Marengo (Tabella 24) i radionuclidi di riferimento sono i soli isotopi dell'uranio, che cautelativamente viene tutto attribuito alle attività dell'impianto, compresa la componente di uranio naturale che è ubiquitaria. I contributi del suolo non coltivato e del suolo coltivato non sono considerati, dal momento che si può trascurare il contributo dell'uranio alla dose da irraggiamento.

Tabella 24 Matrici e radionuclidi di riferimento per il sito di Bosco Marengo.

Via critica	Matrice	Radionuclide
Ingestione	Acqua potabile	U-234
	Acqua di falda superficiale	U-235
	Cereali	U-238

Per i siti di Saluggia (Tabella 25) e Trino (Tabella 26) i radionuclidi di riferimento sono H-3, i principali prodotti di fissione – Sr-90 e Cs-137 – di attivazione – Co-60 – ed i transuranici per il solo sito di Saluggia – Pu-238, Pu-239/240 e Am-241 – considerati nelle diverse matrici in funzione del loro comportamento chimico.

¹¹ Si può ritenere trascurabile il contributo alla dose da ingestione di pesce per l'individuo di riferimento.

Tabella 25 Matrici e radionuclidi di riferimento per il sito di Saluggia.

Via critica	Matrice	Radionuclide	
Ingestione	Acqua potabile	H-3	
		Co-60	
	Acqua di falda superficiale	Sr-90	
		Cs-137	
		Pu-238	
		Pu-239/240	
		Am-241	
		Cs-137	
	Cereali Vegetali a foglia	Cereali	Cs-137
			Cs-137
Latte		Sr-90	
Irraggiamento	Suolo non coltivato	Co-60	
		Cs-137	
	Suolo coltivato	Co-60	
		Cs-137	
		Cs-137	
		Cs-137	

Tabella 26 Matrici e radionuclidi di riferimento per il sito di Trino.

Via critica	Matrice	Radionuclide	
Ingestione	Acqua potabile	H-3	
		Co-60	
	Acqua di falda superficiale	Sr-90	
		Cs-137	
		Cs-137	
	Cereali Vegetali a foglia	Cereali	Cs-137
			Cs-137
Latte		Sr-90	
Inalazione	Particolato atmosferico	Cs-137	
	Trizio in aria	H-3	
Irraggiamento	Suolo non coltivato	Co-60	
		Cs-137	
	Suolo coltivato	Co-60	
		Cs-137	

Non è considerato il contributo del particolato atmosferico per i punti di campionamento posti all'interno degli impianti, dal momento che i dati relativi non possono essere utilizzati per valutazioni di dose alla popolazione.

La stima della dose avviene secondo i seguenti passaggi:

- calcolo della media annuale della concentrazione dei radionuclidi di riferimento per ogni punto e ogni matrice;
- calcolo della media spaziale della concentrazione dei radionuclidi di riferimento per ogni matrice;
- calcolo del contributo alla dose per ogni radionuclide ed ogni matrice, secondo quanto esposto al paragrafo 4;
- somma dei contributi alla dose dei radionuclidi di riferimento per ogni matrice;
- somma dei contributi delle matrici di riferimento per ottenere la dose totale.

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

La dose totale così ottenuta deve essere confrontata con il limite per la non rilevanza radiologica di 10 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$.

Per i valori inferiori al limite di rivelabilità si è assunta una distribuzione rettangolare tra zero ed il limite di rivelabilità stesso: in questo modo anche se non è stata rilevata la presenza di uno dei radionuclidi di riferimento il suo contributo alla dose non sarà zero. Si sottolinea che questo approccio, notevolmente cautelativo, può portare all'apparente paradosso di matrici in cui non è mai stata rivelata la presenza di radionuclidi che forniscono, però, un contributo alla dose non nullo.

7. REQUISITI PRESTAZIONALI

Limite di rivelabilità

Al fine della valutazione di idoneità di un metodo di prova si è scelto di fissare il valore massimo per il limite di rivelabilità nel più piccolo tra il 10% della soglia di non rilevanza radiologica e il 40% del valore di screening, così come indicato dal D. Lgs. 28/2016 per alfa totale e beta totale. Per completezza si riportano anche i limiti di rivelabilità fissati dal D. Lgs. 28/2016 per la strategia di screening basata sull'analisi della concentrazione dei singoli nuclidi (Paragrafo 4): si può facilmente osservare che i limiti di rivelabilità scelti per rispettare la non rilevanza radiologica sono più restrittivi rispetto a quelli fissati dal D. Lgs. 28/2016 (Tabella 27 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Se la contaminazione di una matrice da parte di un radionuclide risulta inferiore al limite di rivelabilità non solo è automaticamente garantita la non rilevanza radiologica – corrispondente ad una dose all'individuo di riferimento di 10 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ – ma è anche garantita una dose all'individuo di riferimento inferiore a 1 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$.

Tabella 27 Limiti di rivelabilità massimi per la determinazione dei radionuclidi di riferimento nelle matrici di riferimento per i siti oggetto di indagine.

Via critica	Matrice	Radionuclide	Soglia	Screening	Limite di rivelabilità	Concentrazione derivata ex D. Lgs. 28/2016	Limite di rivelabilità ex D. Lgs. 28/2016
Ingestione	Acqua potabile Acqua di falda superficiale (Bq/l)	Alfa totale	-	-	-	0,1	0,04
		Beta totale	-	-	-	0,5	0,2
		H-3	610	100	10	100	10
		Co-60	0,72	-	0,07	40	0,5
		Sr-90	0,17	0,06	0,01	4,9	0,4
		Cs-137	1,4	0,1	0,04	11	0,5
		U-234	0,11	-	0,01	2,8	0,02
		U-235	0,11	-	0,01	2,9	-
		U-238	0,11	-	0,01	3,0	0,02
		Pu-238	0,010	-	0,001	0,6	-
		Pu-239/240	0,0093	-	0,001	0,6	0,04
		Am-241	0,011	-	0,001	0,7	0,06
		Uranio totale	-	0,74	0,03	-	-
	Cereali (Bq/kg)	Cs-137	7,0	-	1	-	-
		U-234	1,5	-	0,2	-	-
		U-235	1,6	-	0,2	-	-
		U-238	1,6	-	0,2	-	-
	Vegetali a foglia (Bq/kg)	Cs-137	14	-	1	-	-
	Altri vegetali (Bq/kg)	Cs-137	6,2	-	1	-	-
		U-234	1,5	-	0,2	-	-
		U-235	1,5	-	0,2	-	-
		U-238	1,6	-	0,2	-	-
	Latte (Bq/l)	Sr-90	0,17	0,2	0,02	-	-
Cs-137		1,9	0,5	0,2	-	-	
Inalazione	Particolato atmosferico (Bq/m ³)	Beta totale	-	0,005	0,001	-	-
		Cs-137	0,27	0,03	0,003	-	-
	Trizio in aria (Bq/m ³)	H-3	22	-	0,3	-	-
Irraggiamento	Suolo non coltivato (Bq/kg)	Co-60	110	-	10	-	-
		Cs-137	460	-	50	-	-
	Suolo coltivato (Bq/kg)	Co-60	55	-	10	-	-
		Cs-137	260	-	30	-	-

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

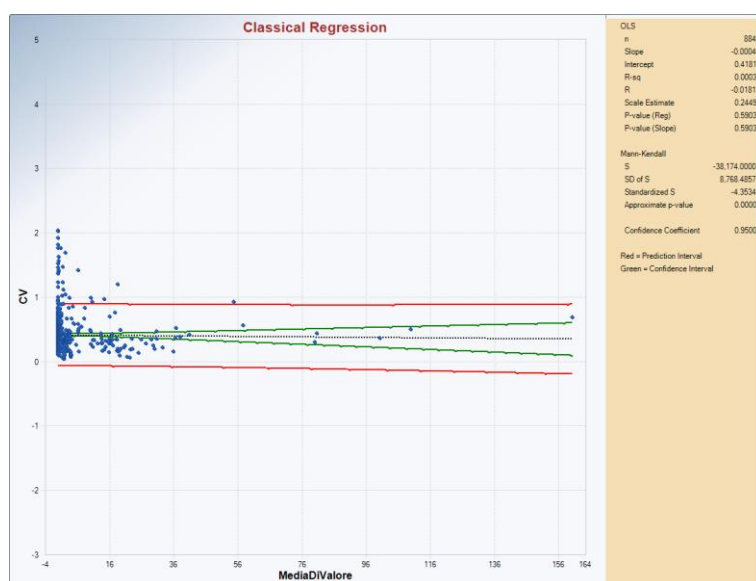
Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

Incertezza

Sulla base dei dati e delle analisi statistiche riportate al paragrafo 5 è possibile estrapolare i coefficienti di variazione (CV) per ogni punto, matrice e parametro delle reti di monitoraggio per i siti oggetto di indagine. L'analisi rappresentata è stata effettuata sui dati fino al 2015 – non si sono osservati cambiamenti significativi nel corso degli anni successivi – e riguarda tutte le matrici e tutti i parametri, non solo quelli di riferimento. I CV non mostrano correlazioni significative con matrici, parametri o livelli di concentrazione (Figura 9).

Per la totalità dei dati – 884 – la distribuzione risulta marcatamente asimmetrica, con una coda destra che si estende sino a CV vicini a 2 (Figura 10).

Figura 9 Regressione Valore-CV, non c'è evidenza di correlazione – Tutti i dati.



ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

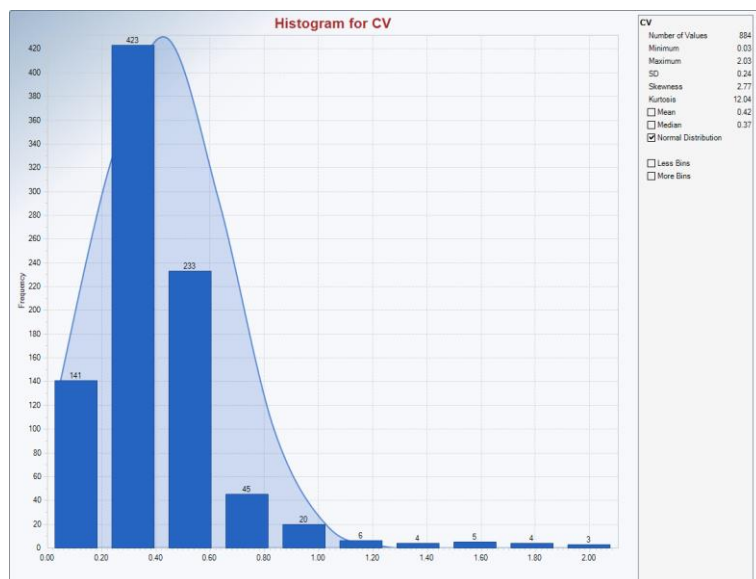
Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

Figura 10 Istogramma della serie dei CV – Tutti i dati.



La serie è stata ridotta a 813 dati tenendo conto delle seguenti considerazioni:

- CV maggiori di 1 hanno scarso significato da un punto di vista fisico;
- i CV più elevati si osservano in corrispondenza di parametri sempre inferiori ai limiti di rivelabilità, per cui poco significativi;
- i CV più elevati sono outlier dal punto di vista statistico.

La distribuzione della serie ridotta appare normale al livello di significatività del 5%, con i parametri riportati in Tabella 28. In Figura 11, Figura 12 e Figura 13 sono riportate alcune rappresentazioni grafiche dei test statistici effettuati. I test sono stati effettuati con ProUCL 5.1.

Tabella 28 Parametri delle distribuzione dei CV.

Numero dati	Media	Scarto tipo	5%ile	10%ile	20%ile	25%ile	50%ile	75%ile	80%ile	90%ile	95%ile
813	0,363	0,132	0,138	0,180	0,252	0,281	0,356	0,461	0,483	0,538	0,581

Al fine della valutazione di idoneità di un metodo di prova si è scelto di fissare il valore massimo dell'incertezza tipo relativa tra il 5%ile e il 50%ile della distribuzione dei CV, in funzione del livello di concentrazione (Tabella 29). Tale scelta è dovuta alla necessità di distinguere la variabilità dovuta alla determinazione – ovvero l'incertezza di misura – dalla variabilità della distribuzione ambientale dei contaminanti.

Tabella 29 Incertezze massime in funzione del livello di concentrazione.

Livello di concentrazione	Incetezza tipo relativa massima	Incetezza estesa (k=2) relativa massima
Valori misurati prossimi al limite di rivelabilità	40%	80%
Valori misurati molto maggiori del limite di rivelabilità (almeno 10 volte) Valori misurati prossimi alla soglia di non rilevanza radiologica, al valore di screening o ai limiti statistici	15%	30%

ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it

Per i parametri alfa totale e beta totale – vista la natura di tali determinazioni – può valere solo il primo requisito.

Figura 11 Istogramma della serie dei CV – Serie ridotta.

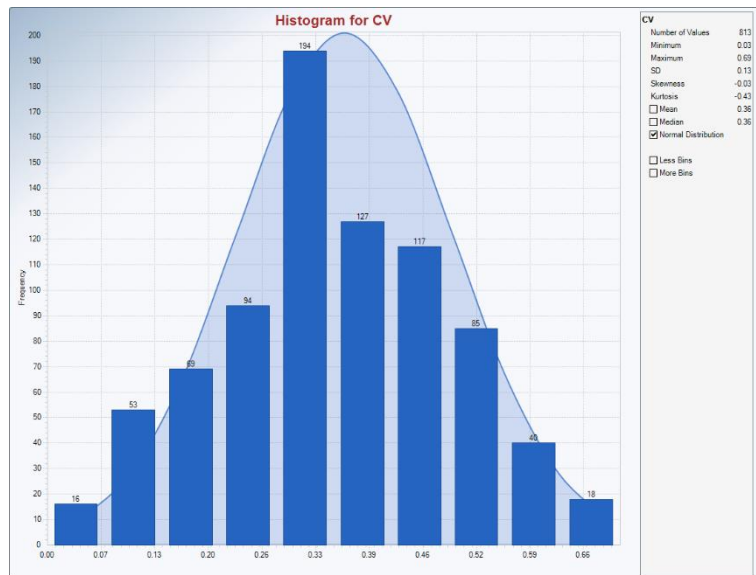


Figura 12 Box Plot della serie dei CV – Serie ridotta.

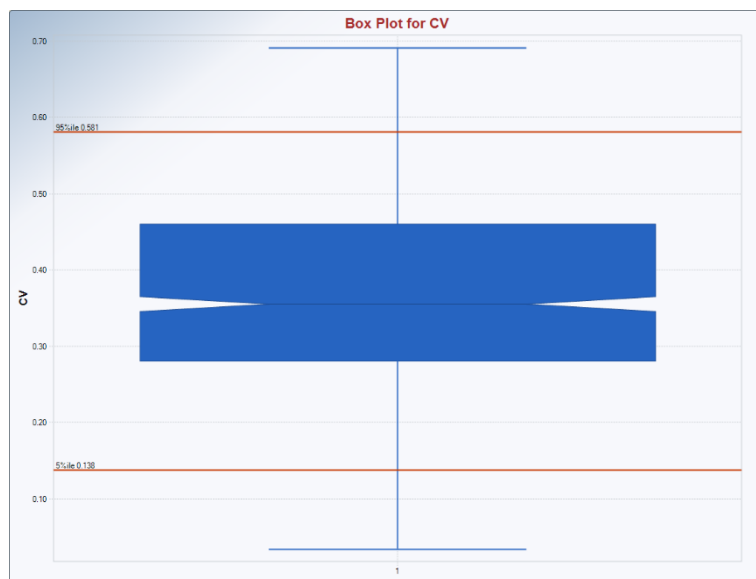
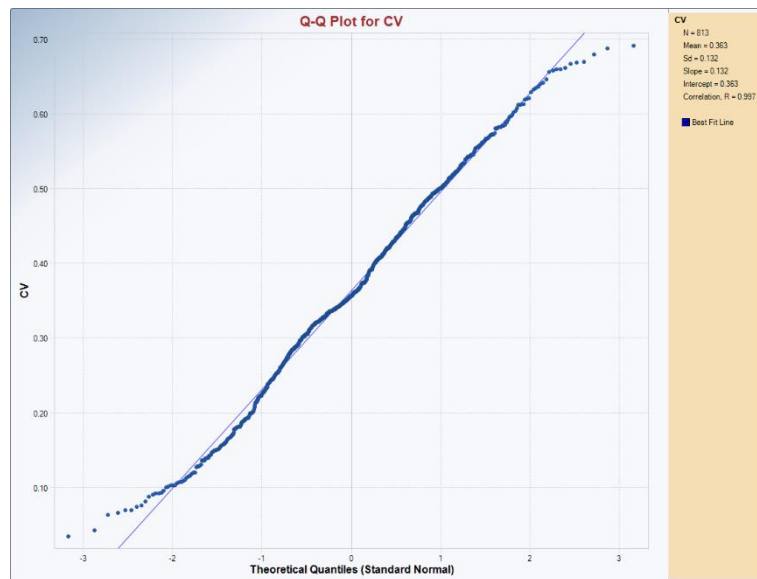


Figura 13 Q-Q Plot della serie dei CV – Serie ridotta.



ARPA Ente di diritto pubblico – Dipartimento Rischi fisici e tecnologici

Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO) - Tel. 012564511 - fax 0125645358 - Codice Fiscale - Partita IVA 07176380017

Pec: radiazioni@pec.arpa.piemonte.it E-mail: dip_rischi_fisici_tecnologici@arpa.piemonte.it

Struttura Semplice Radiazioni ionizzanti e Siti nucleari

Via Trino, 89 – 13100 Vercelli – Tel. 0161269884 – fax 0161269850 - E-mail: ionizzanti.siti.nucleari@arpa.piemonte.it