

G. TARRONI, P. BATTISTI, C. MELANDRI, C.M. CASTELANI, M. FORMIGNANI

VALUTAZIONE STATISTICA DEI DATI DI CONTAMINAZIONE INTERNA NELL'UOMO CONSEQUENTE L'INCIDENTE DI CHERNOBYL

178900547



COMITATO NAZIONALE PER LA RICERCA E PER LO SVILUPPO
DELL'ENERGIA NUCLEARE E DELLE ENERGIE ALTERNATIVE

VALUTAZIONE STATISTICA DEI DATI DI CONTAMINAZIONE INTERNA NELL'UOMO CONSEQUENTE L'INCIDENTE DI CHERNOBYL

G. TARRONI, P. BATTISTI, C. MELANDRI, C.M. CASTELLANI, M. FORMIGNANI
ENEA - Dipartimento Protezione Ambientale e Salute dell'Uomo,
Centro Ricerche Energia "Ezio Clementel", Bologna

RT/PAS/89/12

Testo pervenuto nel maggio 1989
Progetto ENEA: Studi sulla protezione dell'ambiente (EA)

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA
rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'ente.

RIASSUNTO

Vengono presentate le principali indicazioni di carattere generale desunte dall'analisi statistica delle misure dirette di contaminazione interna nell'uomo effettuate dall'ENEA-PAS di Bologna durante i due anni successivi all'incidente di Chernobyl.

Sono tra l'altro esaminati e discussi gli andamenti nel tempo del contenuto corporeo di Cs-137 dei vari individui appartenenti ad un gruppo omogeneo, la variabilità di tali andamenti rispetto a quello medio, la distribuzione statistica e la variabilità dei dati, la significatività dei valori medi di attività relativi a gruppi ristretti ma omogenei di persone, le differenze riscontrate tra soggetti adulti di diverso sesso e la loro dipendenza dal tempo. Viene infine messa in evidenza l'indipendenza dei valori individuali di equivalente di dose efficace impegnato complessivo dai valori ipotizzati per i parametri metabolici qualora il calcolo venga eseguito sulla base delle misure dirette con il Whole Body Counter.

ABSTRACT

The main implications of the general interest derived from the statistical analysis of the internal human contamination data obtained by ENEA-PAS with Whole Body Counter measurements performed in Bologna in consequence of the Chernobyl accident are presented.

In particular the trend with time of the individual body activity of members of a homogeneous group, the variability of individual contamination in relation to the mean contamination, the statistical distribution of the data, the significance of mean values concerning small, homogeneous groups of subjects, the difference between subjects of different sex and its trend with time, are examined. Finally, the substantial independence of the individual committed dose equivalent evaluation due to the Chernobyl contamination on the whole from the hypothesized values of the metabolic parameters is pointed out when the evaluation is performed on the basis of direct measurements with a Whole Body Counter.

**VALUTAZIONE STATISTICA DEI DATI DI CONTAMINAZIONE
INTERNA NELL'UOMO CONSEGUENTE L'INCIDENTE
DI CHERNOBYL**

**G. Tarroni, P. Battisti, C. Melandri, C.M. Castellani, M. Formignani
Laboratorio di Fisica e Tossicologia degli Aerosol
ENEA-PAS, Viale G.B. Ercolani 8, Bologna**

INTRODUZIONE

La contaminazione radioattiva determinata dall'incidente di Chernobyl il 26 aprile 1986 è stata caratterizzata da un tempo relativamente breve di diffusione seguito da una persistenza notevolmente più lunga nella catena alimentare. A conferma di ciò, si può sottolineare come le attività misurate in aria fossero ormai trascurabili sul territorio italiano un mese dopo l'incidente stesso (1).

L'incorporazione dei contaminanti ha pertanto avuto due fasi: inizialmente è stata predominante quella per via inalatoria, mentre a partire dal mese di giugno 1986 l'ingestione ha costituito l'unica via di introduzione significativa. Durante la prima fase lo I-131 è stato il radionuclide responsabile della maggior contaminazione sia in aria (non considerando i radioisotopi dei gas nobili) che in vivo. Nella seconda fase (dal mese di giugno 1986 in poi) gli isotopi del cesio (Cs-134 e Cs-137) hanno costituito invece la principale fonte di contaminazione della catena alimentare e quindi dell'uomo; poiché il rapporto tra le attività dei due isotopi del cesio si è modificata nel tempo solo in relazione ai differenti valori delle costanti di decadimento fisico, si è potuto assumere

il Cs-137 come radionuclide indicatore della contaminazione durante questa seconda fase.

Fin dai giorni immediatamente successivi all'incidente, presso il Centre ENEA di Bologna sono state eseguite numerose misure dirette di attività in vivo che permettono, ora, di ricavare utili indicazioni sulla distribuzione nella popolazione di una contaminazione diffusa su vasta scala.

Il Whole Body Counter (WBC) utilizzato per tali misure (2) (3) è costituito da una schermatura di 15 cm di ferro rivestita all'interno da lastre di 3 mm di piombo, da un rivelatore di NaI(Tl) di 9"x4" con guida di luce di 3" di spessore e da un sistema computerizzato di acquisizione ed analisi degli spettri. Tutti i materiali della schermatura e quelli comunque inseriti nella camera schermata sono stati scelti a basso contenuto di impurezze radioattive. Per le misure è stata adottata la geometria della sedia standard.

I dati individuali di attività corporea e le valutazioni dosimetriche relative sia a singole persone che a gruppi omogenei sono pubblicati in alcuni Rapporti Tecnici ENEA (3+5).

In questo lavoro vengono presentate le principali indicazioni di carattere generale ottenute dall'attività di dosimetria interna svolta dal maggio 1986 in poi. Tali indicazioni rivestono notevole utilità nel caso in cui una contaminazione coinvolga un numero considerevole di individui professionalmente esposti o della popolazione. In tale eventualità, infatti, il controllo individuale di tutti i soggetti può non essere praticabile e può quindi rendersi necessaria l'adozione di una procedura di campionamento delle persone da sottoporre a misura. A questo proposito, le analisi effettuate hanno permesso, tra l'altro, di verificare la possibilità di seguire una generica contaminazione diffusa in modo sufficientemente dettagliato attraverso il controllo di un numero ristretto di individui che rispondano ad opportuni criteri di omogeneità e siano quindi riferibili ad una precisa popolazione statistica.

1. ANDAMENTO TEMPORALE DELL' ATTIVITA' CORPOREA DOVUTA AD INGESTIONE DI Cs-137 E RELAZIONE TRA CONTAMINAZIONE INDIVIDUALE E CONTAMINAZIONE MEDIA

Sulla base dell'esperienza acquisita negli anni '60 con i controlli della contaminazione diffusa su vasta scala dalle esplosioni nucleari in atmosfera (6), all'inizio del mese di maggio 1986 è stato scelto un gruppo di 9 volontari adulti (8 uomini ed 1 donna) sui quali seguire l'andamento temporale dell'attività in vivo. I volontari non presentavano patologie metaboliche evidenti né sostanziali particolarità nella dieta, risiedevano nell'area di Bologna e svolgevano normale attività lavorativa di laboratorio o di ufficio.

Le misure per la determinazione dell'attività di Cs-137 da ingestione sono state eseguite, dal mese di giugno 1986, con frequenza prima mensile poi una volta ogni due mesi.

Come si può osservare dalla figura 1, gli andamenti nel tempo dei valori individuali del contenuto corporeo di Cs-137 si presentano molto simili tra loro ad eccezione di quello relativo al soggetto indicato con la sigla BO8 per il quale, dagli ultimi mesi del 1986, si sono osservati dapprima un accumulo percentualmente sempre minore e successivamente un decremento di attività molto più rapido. Alla suddetta persona è stata poi clinicamente riscontrata la presenza di patologie con forti ripercussioni metaboliche non nota nel maggio 1986 .

Un'indagine più accurata di quanto qualitativamente messo in evidenza dalla figura 1 è stata eseguita analizzando i rapporti R_m tra le attività corporee riscontrate ad ogni data di misura nei singoli individui e la corrispondente attività media relativa agli 8 adulti di sesso maschile. L'esame (condotto non considerando le prime misure in quanto, come esposto al §2, affette da elevata variabilità) ha permesso di evidenziare una stretta correlazione tra R_m ed il tempo per i soli volontari codificati con le sigle BO8 e BO9*, indice di un comportamento metabolico nettamente differenziato da quello degli altri volontari. Nel primo caso, come già sottolineato, ciò è da mettere in relazione alle

particolari patologie insorte, nel secondo al fatto che il soggetto BO9*, in quanto persona di sesso femminile, presenta un metabolismo diverso da quello dei volontari maschi, come indicato nel Rapporto 52 del NCRP (7). Allo scopo di eliminare l'incidenza del comportamento anomalo del soggetto BO8 e quindi ottenere informazioni più attendibili sull'andamento nel tempo dei valori di R_m , i rapporti sono stati poi ricalcolati utilizzando i valori medi di attività relativi alle rimanenti 7 persone di sesso maschile.

I nuovi valori confermano quanto emerso dalla prima analisi. Per i 5 volontari codificati con le sigle da BO2 a BO6 non è stata infatti riscontrata alcuna correlazione statisticamente significativa ($P=0.05$) con il tempo dei valori di R_m che possono quindi essere considerati costanti, seppur soggetti a piccole fluttuazioni casuali attorno ad un valore tipico che caratterizza il comportamento di ogni individuo. Un esempio è dato dalla figura 2 in cui è graficato l'andamento nel tempo di R_m per il soggetto BO3.

Per i volontari indicati con le sigle BO1 e BO7) è stata invece messa in evidenza una possibile correlazione tra R_m ed il tempo (coefficiente di correlazione lineare pari rispettivamente a 0.72 e 0.64); tuttavia le variazioni percentuali di R_m risultano assai limitate (inferiori al 10% per anno). Per i soggetti BO8 e BO9*, infine, l'andamento di R_m mostra ancora una stretta correlazione col tempo (coefficiente di correlazione lineare pari a 0.95), come chiaramente evidenziato nelle figure 3 e 4.

In tabella 1, per ognuno dei 9 individui periodicamente sottoposti a controllo, sono riportati il valor medio di R_m , la relativa deviazione standard percentuale (SD) e, limitatamente ai soggetti BO1, BO7, BO8 e BO9*, la deviazione standard residua (SD_1) intesa come scarto quadratico medio fra i dati sperimentali e la retta di interpolazione ed espressa in percentuale rispetto al valor medio di R_m . Per i primi 7 volontari i valori non elevati di SD indicano una variabilità assai ridotta di R_m rispetto al valore tipico individuale; anche per i soggetti BO1 e BO7 il considerare R_m costante nel tempo non porta a valori di SD sensibilmente superiori alle rispettive SD_1 , a conferma della modesta rilevanza di una pur possibile correlazione. Al contrario,

per i soggetti BO8 e BO9* il confronto tra i valori di SDI e di SD riafferma la variazione dei rapporti R_m col tempo, con fluttuazioni rispetto a tale andamento di entità paragonabile a quelle osservate per gli altri volontari.

Le differenze intersoggettuali mostrate sia dai grafici di figura 1 che dai valori dei rapporti R_m di tabella 1 sono da imputare sia ad un diverso metabolismo dell'elemento (tempo di dimezzamento biologico) che a differenze nelle abitudini alimentari (ingestione giornaliera). Una analisi sistematica degli andamenti individuali di attività, basata sul modello metabolico dell'ICRP 30 (8) e condotta al fine di ricavare i valori di tali parametri per ogni volontario, non ha tuttavia fornito i risultati sperati in quanto le fluttuazioni del comportamento individuale (e cioè del rapporto R_m) permettono di determinare i suddetti parametri solo con una variabilità associata troppo ampia per costituire una informazione utile. Non è stato possibile, in altri termini, disaccoppiare i parametri che governano l'andamento dell'ingestione dai tempi di dimezzamento biologico ipotizzati. L'analisi ha consentito soltanto di evidenziare che i tempi di dimezzamento della frazione a lungo termine di ritenzione relativi ai soggetti BO8 (affetto da particolare patologia metabolica) e BO9* (individuo di sesso femminile) sono sensibilmente inferiori a quelli dei restanti volontari sottoposti a misura. Si deve comunque sottolineare che l'andamento dell'attività corporea media calcolata su queste ultime 7 persone è ben interpolabile utilizzando il valore di tempo di dimezzamento biologico della frazione a lungo termine indicato dall'ICRP (8) per l'uomo standard (110 giorni). Tale interpolazione è stata eseguita calcolando innanzitutto (3) (5) i valori di ingestione media giornaliera tra due date di misura dai valori medi di attività corporea sulla base del modello metabolico suggerito nella pubblicazione 30 dell'ICRP. Si è quindi ricavato l'andamento temporale dell'ingestione giornaliera; esso ha presentato due fasi: una prima crescente, interpolabile con una retta fino al 350° giorno a partire dal 1/5/1986, una seconda (dal 350° al 680° giorno) decrescente, ben interpolabile con un

monoesponenziale caratterizzato da un tempo di dimezzamento pari a 93.2 giorni. Con le suddette funzioni di interpolazione è stato infine ricostruito l'andamento dell'attività media per il quale si è valutata la adattabilità ai punti sperimentali.

Sulla base di quanto esposto circa l'andamento nel tempo dei rapporti R_m e la corrispondenza dei parametri metabolici con quelli suggeriti dall'ICRP per l'uomo standard, i 7 volontari adulti di sesso maschile indicati con le sigle da BO1 a BO7 hanno assunto il ruolo di gruppo di riferimento per tutti i confronti di contaminazione interna da Cs-137 (gruppo codificato in seguito con la sigla RAM BO).

Per verificare se il gruppo RAM BO costituisse effettivamente un campione rappresentativo della popolazione adulta maschile residente nell'area di Bologna, a partire dalla primavera del 1987 è stato sistematicamente controllato un secondo gruppo (codificato PAS BO) composto da 5 volontari selezionati secondo gli stessi criteri. I valori medi di attività relativi ai due gruppi sono riportati in figura 5. L'analisi della varianza ha posto in rilievo uno scostamento tra i valori medi di attività del 9%, statisticamente significativo ($P=0.05$) e costante nel tempo, ma non ha evidenziato alcuna differenza dopo normalizzazione dei dati rispetto al contenuto corporeo di potassio. Ciò indica che la differenza principale tra i due gruppi di volontari, anche se limitata, è da imputare alla taglia fisica media e non al grado di contaminazione; il cesio ed il potassio hanno infatti distribuzione molto simile nella massa magra (9) e pertanto la suddetta normalizzazione permette di svincolare i dati di attività corporea dalla taglia dei singoli individui.

Una ulteriore conferma del buon grado di rappresentatività del gruppo RAM BO, si ottiene osservando le figure 6 e 7 ove sono riportati, assieme all'andamento dell'attività corporea media, A , di Cs-137 del gruppo (linea centrale), i dati relativi a soggetti maschi adulti residenti rispettivamente nell'area di Bologna (come gli individui del gruppo RAM BO) e nella regione Emilia-Romagna. Si può osservare come in entrambi i

casi circa il 70% dei dati individuali sia compreso entro l'intervallo $A \pm 1$ deviazione standard (linee superiore ed inferiore). L'attività corporea riscontrata in media nelle 7 persone del gruppo periodicamente sottoposto a controllo può quindi ritenersi rappresentativa di quella della intera popolazione adulta maschile residente in un'area geografica abbastanza estesa, ma omogenea per quanto riguarda la meteorologia locale, le consuetudini e le forniture alimentari.

Per evidenziare l'effetto sull'attività corporea delle diversità tra i due sessi nei parametri metabolici e di ingestione, a partire dall'autunno 1986 e contemporaneamente alle misure periodiche del gruppo RAM BO, sono stati eseguiti controlli a frequenza semestrale su un gruppo di volontari adulti di sesso femminile pure residenti a Bologna. I risultati, riportati in tabella 2, evidenziano significative differenze fra i valori medi di attività e che tali differenze aumentano col tempo, come meglio appare dalla tabella 3 dove i dati sono riportati sotto forma di rapporto. Si può notare che a 6 mesi dall'incidente il rapporto tra le attività medie di Cs-137 era pari a quello fra i contenuti corporei medi di potassio e che successivamente esso è diminuito raggiungendo un valore pari a circa 2/3.

Poiché i dati disponibili per le persone di sesso femminile non sono sufficientemente numerosi da permettere una descrizione dettagliata dell'andamento temporale dell'attività corporea, si è ritenuto opportuno ricostruire tale andamento in base ai valori dei parametri riportati in letteratura ed utilizzando i dati di ingestione media giornaliera ricavati per il gruppo RAM BO.

Come si può osservare dalla figura 8, in cui viene ricostruito anche l'andamento dell'attività corporea media per il gruppo RAM BO interpolata sulla base delle funzioni di ingestione precedentemente ricordate, i valori di attività corporea media per i soggetti di sesso femminile sono ben interpolati dalle curve ottenute assumendo:

- valori dell'ingestione media pari a quelli ricavati dalle citate funzioni di interpolazione per gli uomini ridotti di un fattore

- costante uguale a 0.7 (ciò significa ipotizzare, almeno in prima approssimazione, che l'andamento temporale dell'ingestione media negli uomini e nelle donne sia lo stesso e subisca per queste ultime solo una riduzione costante, come suggerito dal rapporto tra i consumi medi dei nutrienti fondamentali riportato nella pubblicazione 23 dell'ICRP (9));
- tempo di dimezzamento biologico della frazione a lungo termine di ritenzione pari ad 84 giorni (7) anziché 110 giorni.

2. VARIABILITA' DEI DATI DI CONTAMINAZIONE INTERNA DA INGESTIONE DI Cs-137

L'utilizzo di un criterio statistico nel controllo della contaminazione interna in una popolazione richiede la conoscenza dei parametri che governano la variabilità dei dati di attività corporea.

In tabella 4, per il gruppo RAM BO, vengono presentati, alle varie date di misura, il valor medio di contenuto corporeo di Cs-137 in Bq ed in Bq/g di potassio con le relative deviazioni standard percentuali, SD.

Si può notare che la variabilità del contenuto di Cs-137 è del 50+60% per le misure eseguite entro giugno 1986 e relative a valori medi inferiori a 500 Bq; la deviazione standard tende poi a scendere a valori compresi fra il 30% ed il 15%. L'alto indice di variabilità dei primi dati è imputabile sia ad un più elevato errore percentuale di misura, sia ad una maggior effettiva variabilità dovuta alla iniziale disomogeneità della contaminazione in alimenti anche dello stesso tipo. Trascurando i primi due punti, cioè le misure eseguite entro giugno 1986, si ottiene un valor medio di deviazione standard percentuale pari a 22.3 che indica la scarsa dispersione dei valori di attività dei singoli individui rispetto alla media.

Le deviazioni standard percentuali dei dati normalizzati al contenuto di potassio risultano significativamente inferiori a quelle relative ai dati non normalizzati: si ottiene, infatti, un valor

medio di deviazione standard percentuale pari a 16.2 (sempre escludendo le misure eseguite entro giugno 1986). La variabilità intersoggettuale risulta in questo caso significativamente ridotta; non si ha però una diminuzione delle già citate fluttuazioni del rapporto fra i dati del singolo individuo e quelli medi.

Una conferma di quanto osservato circa la limitata variabilità individuale rispetto al valor medio e la riduzione di tale variabilità previa normalizzazione al contenuto corporeo di potassio si ha esaminando le tabelle 5 e 6, analoghe alla tabella 4, ove vengono riportati, rispettivamente, i dati medi relativi al già citato gruppo PAS BO (maschi adulti) e quelli riguardanti la contaminazione interna da Cs-137 dovuta a fallout causato da esplosioni nucleari in atmosfera. Questi ultimi dati si riferiscono a misure eseguite negli anni 1963-66 su un gruppo di volontari maschi adulti sempre residenti nell'area di Bologna.

Una limitata dispersione dei valori individuali di attività rispetto alla media caratterizza anche la contaminazione riscontrata nelle persone di sesso femminile (deviazione standard percentuale media pari a 23.0, vedi tabella 2); in questo caso, però, non si è constatata la riduzione della variabilità intersoggettuale normalizzando i dati al contenuto corporeo di potassio. D'altra parte questa riduzione, statisticamente verificata per i volontari adulti di sesso maschile, non è di tale portata da modificare sostanzialmente la dispersione dei dati; inoltre, come già ricordato, la normalizzazione non attenua le fluttuazioni dei comportamenti individuali. Per questi motivi le analisi successive relative al contenuto corporeo di Cs-137 sono effettuate prescindendo da tale operazione.

3. DISTRIBUZIONE STATISTICA DEI DATI DI CONTAMINAZIONE INTERNA DA INGESTIONE DI Cs-137

Nel settembre 1987 fu eseguita una campagna nazionale di misure di contaminazione interna da Cs-137 per verificare la distribuzione geografica della contaminazione stessa. L'indagine,



MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART
NATIONAL BUREAU OF STANDARDS
STANDARD REFERENCE MATERIAL 1010a
(ANSI and ISO TEST CHART No. 2)

effettuata congiuntamente dai gruppi di dosimetria interna dell'ENEA di Bologna e Casaccia previa intercalibrazione, fu svolta in un arco temporale di 9 giorni (4) selezionando in ogni Regione italiana un ristretto numero di volontari adulti maschi (normalmente 5) che rispondessero ai seguenti requisiti:

- residenza abituale nella medesima area,
- assenza di rilevanti particolarità nell'alimentazione,
- non essere soggetti a rischi di radiocontaminazione professionale,
- non essere stati sottoposti di recente ad esami diagnostici con radiofarmaci.

I valori medi di attività corporea di Cs-137 (riportati in tabella 7 con le rispettive deviazioni standard percentuali) sono risultati significativamente diversi da località a località. Il test di Bartlett di omogeneità della varianza (10) non ha, invece, evidenziato differenze significative (al livello 10%) fra le varianze percentuali che pertanto possono essere considerate come campionamenti casuali di una comune varianza della popolazione. La miglior stima della deviazione standard percentuale della popolazione statistica è risultata pari al 28.3% con intervallo fiduciale al 90% corrispondente a 25.1% + 32.6%.

Il test χ^2 sui valori singoli normalizzati alla media del gruppo di appartenenza non ha evidenziato scostamenti significativi (al livello 10%) né dalla distribuzione normale né da quella log-normale, anche se quest'ultima ha fornito un valore di χ^2 inferiore. A questo proposito in figura 9 viene mostrato il grafico cumulativo della distribuzione log-normale caratterizzata da una deviazione standard geometrica di 1.32: si può chiaramente notare la buona aderenza di tutti i singoli dati alla curva.

In tabella 8 vengono presentati i dati relativi ad altri gruppi omogenei nel senso detto sopra (gruppi composti da individui adulti di sesso maschile residenti in diverse località italiane e sottoposti a controllo negli anni 1986-88) che confermano le conclusioni raggiunte.

4. VARIABILITA' DELLA SINGOLA MISURA

I dati relativi a gruppi di persone per i quali erano stati effettuati controlli ripetuti con sistematicità sono stati trattati mediante analisi della varianza a due vie. Per alcuni gruppi (RAM BO e PAS BO) le misure, protratte per lunghi intervalli di tempo, si riferiscono a periodi caratterizzati da valori medi di contaminazione molto diversi. In questo caso i dati sono stati suddivisi in funzione del range di attività riscontrata, come mostrato dalla tabella 9 che riassume i parametri principali relativi a tale analisi.

Come indicatore della variabilità relativa alla singola misura è stata scelta la deviazione standard residua percentuale, SDR, riferita all'attività media generale del blocco di dati sul quale è stata eseguita l'analisi. La deviazione standard residua congloba le variabilità dovute sia alla misura (statistica di conteggio, imprecisione nella valutazione degli spettri, non rigorosa riproducibilità della geometria di misura ecc.), sia alle variazioni nella dieta ed alle fluttuazioni del comportamento metabolico del singolo individuo attorno al proprio comportamento medio.

I valori di deviazione standard residua percentuale, presentati in figura 10 in funzione del valor medio di attività, mostrano una riduzione della variabilità della singola misura al crescere dell'attività stessa: si passa infatti da circa il 15% per attività di 500÷1000 Bq a circa il 5% per valori superiori ai 2000 Bq.

5. EFFETTO DEL TEMPO DI DIMEZZAMENTO BIOLOGICO SUI VALORI DI INGESTIONE GIORNALIERA E DI EQUIVALENTE DI DOSE EFFICACE IMPEGNATO DA Cs-137 CALCOLATI DAI DATI DI ATTIVITA' CORPOREA

Come già osservato, i valori di contaminazione interna da Cs-137 si differenziano fra gli individui a causa delle diversità sia metaboliche (tempi di dimezzamento biologico) che di

alimentazione (ingestione giornaliera). Tuttavia l'analisi degli andamenti mostrati in figura 1 non ha permesso, come già ricordato, di separare i due effetti e, in particolare, di ricavare valori individuali sufficientemente precisi per i tempi di dimezzamento biologico.

Qualora si vogliano confrontare dati di contaminazione degli alimenti con quelli di contaminazione interna è necessario determinare da questi ultimi i valori individuali di ingestione giornaliera (3) (5), ma in tal caso l'incertezza sui tempi di dimezzamento biologico si ripercuote inevitabilmente sui valori calcolati. In figura 11 viene mostrato, a questo proposito, l'andamento dell'ingestione cumulativa ricavata dai valori sperimentali di attività corporea relativo ad un soggetto del gruppo RAM BO (soggetto BO1). I calcoli sono stati eseguiti sulla base del modello metabolico dell'ICRP 30 ipotizzando diversi tempi di dimezzamento per la frazione a lungo termine di ritenzione (da 80 a 140 giorni). Come si può osservare, i valori di ingestione cumulativa si differenziano sempre più con il passare del tempo fino a raggiungere uno scostamento pari ad oltre il 50% per variazioni del tempo di dimezzamento da 80 a 140 giorni ed a circa il 25% per variazioni da 95 a 125 giorni.

Ne consegue che i dati di contaminazione degli alimenti possono essere confrontati solamente con i valori di ingestione ricavati da valori medi di attività relativi ad un gruppo omogeneo di individui per il quale sussista una corrispondenza dei parametri metabolici con quelli riportati nella letteratura specializzata.

Anche il calcolo del valore individuale di equivalente di dose efficace impegnato, $H_{50,E}$, dipende dal tempo di dimezzamento biologico ipotizzato.

In figura 12 viene presentato, sempre per il soggetto BO1, l'andamento del valore accumulato di $H_{50,E}$ calcolato sulla base dei modelli suggeriti nell'ICRP 30 per diversi tempi di dimezzamento biologico della frazione a lungo termine di ritenzione. Per variazioni da 80 a 140 giorni si hanno scostamenti percentualmente decrescenti in funzione del tempo trascorso dall'inizio della contaminazione: da una differenza iniziale di circa

il 50% si passa al 25% a circa 300 giorni, al 10% a 600 giorni, al 2% a 900 giorni.

Si può pertanto concludere che, nel caso di contaminazioni da ingestione di Cs-137 con andamento temporale analogo a quello verificatosi in seguito all'evento Chernobyl, il calcolo dei valori individuali di $H_{50,E}$ effettuato utilizzando i dati ottenuti tramite WBC risulta influenzato dal tempo di dimezzamento biologico ipotizzato solamente per valutazioni eseguite a tempi intermedi rispetto alla durata complessiva della contaminazione stessa.

6. VARIBILITA' DEI DATI DI CONTAMINAZIONE INTERNA DA INALAZIONE

I dati disponibili di contaminazione interna dovuta esclusivamente ad inalazione sono non molto numerosi e assai meno diversificati di quelli connessi all'ingestione; tra essi i soli analizzabili statisticamente si riferiscono a misure eseguite entro il 15.5.1986 su individui residenti nell'area di Bologna o che lavoravano in cantieri italiani ubicati in Unione Sovietica.

I valori medi di attività corporea di I-131, assunto come indicatore della contaminazione per via inalatoria, vengono presentati in tabella 10 relativamente a gruppi omogenei per sesso, area di residenza, modalità di esposizione.

L'analisi dei dati riguardanti il gruppo di persone adulte di sesso maschile della zona di Bologna, sottoposte a ripetuti controlli in date successive, ha evidenziato una limitata variabilità (25-35%) che tende a crescere al diminuire della contaminazione. La variabilità della singola misura, ottenuta con l'analisi della varianza a due vie su questo insieme di dati (nel senso già indicato al § 4), è risultata del 9% per un valor medio di attività pari a 280 Bq.

Per i connazionali temporaneamente residenti in località dell'URSS investite direttamente dalla nube radioattiva (Shlobin e Gatovo) si sono riscontrate contaminazioni da I-131 molto più

elevate e strettamente dipendenti dalle modalità di esposizione. L'attività corporea è risultata, infatti, significativamente maggiore in chi espletava il proprio lavoro all'esterno di edifici rispetto a quella misurata in chi eseguiva il proprio compito prevalentemente in ambiente chiuso (rapporto delle attività medie pari a circa 1.8).

La variabilità dei dati è risultata anche in questi casi crescente al diminuire dell'attività, ma non ha mostrato particolari dipendenze dalle suddette modalità di esposizione.

CONCLUSIONI

L'analisi dei dati ottenuti tramite il Whole Body Counter in seguito all'incidente di Chernobyl ha permesso di puntualizzare alcuni importanti aspetti riguardanti la contaminazione interna da Cs-137 nell'uomo connessa ad una contaminazione diffusa su tutta la catena alimentare e prolungata nel tempo.

a - L'analisi può essere effettuata solamente confrontando dati individuali relativi a soggetti appartenenti alla medesima popolazione statistica o dati medi relativi a gruppi omogenei. L'omogeneità deve essere definita con un criterio che prevede, oltre al sesso e l'età, anche la residenza abituale in un'area caratterizzata da forniture alimentari di provenienza comune.

b - Gli andamenti nel tempo dell'attività corporea dei singoli individui appartenenti ad un gruppo omogeneo di adulti ed esenti da patologie che provochino alterazioni del metabolismo, dopo una fase iniziale caratterizzata da maggiori errori percentuali di misura e sensibilmente influenzata da una più elevata disomogeneità di contaminazione negli alimenti anche dello stesso tipo, possono considerarsi in rapporto costante rispetto all'andamento medio del gruppo con una variabilità compresa tra il 6% ed il 12%. Il comportamento individuale risulta pertanto una caratteristica sistematica definita dai valori di ingestione media giornaliera e dai tempi di dimezzamento biologico.

c - Le fluttuazioni dei dati rispetto al comportamento tipico individuale, imputabili in parte anche agli errori sperimentali di misura, non permettono di ricavare, per i singoli soggetti, i valori dell'ingestione giornaliera e della costante di eliminazione biologica della componente a lungo termine di ritenzione con sufficiente precisione; non è cioè possibile scindere il reciproco effetto delle variazioni dei singoli parametri. Si è tuttavia potuta constatare la buona corrispondenza dei parametri metabolici medi

relativi ad un gruppo omogeneo di persone adulte di sesso maschile con quelli riportati nella pubblicazione 30 dell'ICRP.

d - Poiché i valori di ingestione giornaliera che si ricavano dalle misure di attività corporea dipendono dal tempo di dimezzamento biologico ipotizzato per la componente a lungo termine di ritenzione, non è possibile comparare valori di contaminazione degli alimenti con i dati individuali di attività; il confronto può essere effettuato solo con dati medi relativi ad un campione rappresentativo di una popolazione omogenea cui le matrici alimentari si riferiscano e per il quale siano disponibili valori medi attendibili dei parametri metabolici.

e - Il valore individuale di equivalente di dose efficace impegnato accumulato per tutta la durata dell'incorporazione del contaminante non dipende sensibilmente dai valori dei parametri metabolici qualora il calcolo venga eseguito utilizzando i dati ottenuti con misure dirette di attività corporea.

f - La variabilità del singolo dato di attività, che include sia gli errori dovuti alle tecniche di misura e di analisi degli spettri, sia le fluttuazioni del comportamento metabolico individuale e le variazioni della dieta, risulta decrescente all'aumentare dell'attività stessa. Per quanto riguarda il WBC dell'ENEA-PAS di Bologna essa è dell'ordine di $4+10\%$ per attività superiori ai 1000 Bq.

g - La variabilità intersoggettuale dell'attività corporea in un gruppo omogeneo dipende dal valor medio dell'attività stessa. In particolare è risultata del $50+60\%$ durante la fase iniziale di contaminazione (valori medi inferiori a 500 Bq), sia per una maggiore variabilità delle singole misure, sia probabilmente per una disomogenea diffusione del contaminante nella catena alimentare, mentre successivamente essa si è stabilizzata attorno al $15+30\%$ del valor medio.

h - L'analisi dei dati relativi a 20 gruppi omogenei selezionati sull'intero territorio nazionale ha permesso di stabilire che la distribuzione dell'attività corporea individuale è ben rappresentata da una distribuzione normale e ancor meglio da una log-normale con deviazione standard geometrica pari a 1.32.

i - L'esame della distribuzione delle attività corporee in relazione ai citati criteri di omogeneità ha consentito di mettere in evidenza che un numero ristretto di persone, 5-10, costituisce un campione sufficientemente significativo per valutare la contaminazione di gruppi omogenei di individui o di popolazioni statistiche omogenee.

l - L'attività corporea nei soggetti adulti di sesso femminile ha mostrato una notevole diversità da quella riscontrata negli adulti di sesso maschile sia come entità che come andamento nel tempo. Il valor medio del rapporto donne/uomini tra le attività di Cs-137 normalizzate al contenuto corporeo di potassio è risultato, infatti, pari all'unità a 6 mesi dall'incidente ed è poi diminuito fino a raggiungere nel 1988 un valore pari a circa 2/3. L'attività media nelle persone di sesso femminile, inoltre, ha presentato un andamento temporale compatibile con un tempo di dimezzamento biologico della componente a lungo termine di ritenzione di 84 giorni e con una ingestione media giornaliera costantemente pari al 70% di quella relativa ai soggetti di sesso maschile.

I dati di contaminazione interna ascrivibile ad incorporazione per via inalatoria sembrano confermare quanto esposto nel caso di ingestione circa la variabilità dei dati e la loro distribuzione. In caso di inalazione la definizione di gruppi omogenei comporta, però, anche una attenta considerazione dei fattori legati alle modalità di esposizione.

BIBLIOGRAFIA

- (1) ENEA. L'incidente di Chernobyl - Fatti e considerazioni. I dati raccolti dalla rete ENEA. Notiziario dell'ENEA/Energia e innovazione, n. 5-6, maggio-giugno 1986.
- (2) C. Melandri. Metodi diretti per la determinazione della contaminazione interna. ENEA, RT/PAS/85/14, ENEA, Roma, 1985.
- (3) C. Melandri, C.M. Castellani, M. Calamosca, G. Tarroni, M. Formignani, T. De Zaiacomo. Misure di contaminazione interna mediante Whole Body Counter e di contaminazione atmosferica eseguite fino al 31.12.1986 dall'ENEA-PAS di Bologna in seguito all'incidente di Chernobyl. ENEA, RT/PAS/87/7, ENEA, Roma, 1987.
- (4) C. Melandri, C.M. Castellani, G. Tarroni, M. Formignani, E. Rampa, G. Santori, S. Di Pietro. Determinazione dell'attività corporea di Cs-137 e Cs-134 nella popolazione adulta di sesso maschile residente nelle diverse regioni italiane. ENEA, RT/PAS/88/3, ENEA, Roma, 1988.
- (5) C. Melandri, C.M. Castellani, G. Tarroni, M. Formignani. Misure di contaminazione interna da Cs-137 e Cs-134 eseguite nello anno 1987 mediante il Whole Body Counter dell'ENEA-PAS di Bologna. ENEA, RT/PAS/88/21, ENEA, Roma, 1988.
- (6) C. Melandri, O. Rimondi, G. Tarroni. Contaminazione interna da Cs-137 derivante da fallout nella popolazione maschile residente a Bologna. Minerva Fisiconucleare, 9, 83, 1966.
- (7) National Council on Radiation Protection and Measurements. Cesium-137 from the Environment to Man: Metabolism and Dose. NCRP Report No 52, Washington D.C., 1977.

- (8) ICRP Publication 30. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Part 1, Annals of the ICRP, 2,N. 3/4, 1979.
- (9) ICRP Publication 23. Report of the Task Group on Reference Man. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- (10) G.W. Snedecor, W.G. Cochran. Statistical Methods. The Iowa State Univ. Press, 6th ed., Iowa, USA, 1969.

Tabella 1: Valor medio individuale del rapporto R_m , con relative deviazione standard SD e deviazione standard residua SD_r, per le persone periodicamente controllate residenti a Bologna.

Soggetto	Valor medio del rapporto R_m	SD (%)	SD _r (%)
BO1	1.33	6.5	4.7
BO2	1.15	8.0	--
BO3	0.95	6.4	--
BO4	1.00	7.6	--
BO5	1.01	6.7	--
BO6	0.67	6.4	--
BO7	0.89	9.3	7.4
BO8	0.84	32.0	9.6
BO9*	0.37	32.7	11.5

Tabella 2: Confronto tra contenuto corporeo medio di Cs-137 e di Cs-137/K nelle persone adulte di sesso femminile e maschile residenti a Bologna.

Data di misura	FEMMINE					MASCHI				
	N. sogg.	Cs-137		Cs-137/K		N. sogg.	Cs-137		Cs-137/K	
		Val. medio (Bq)	SD (%)	Val. medio (Bq/g)	SD (%)		Val. medio (Bq)	SD (%)	Val. medio (Bq/g)	SD (%)
13-16/10/86	13	950	18.8	10.3	21.5	7	1380	22.6	10.0	16.0
8-11/6/87	12	1650	18.3	17.4	21.1	7	2920	18.3	19.7	11.4
11-14/i/88	14	640	24.2	6.8	24.9	7	1510	17.8	10.5	10.7
9-11/5/88	13	410	23.4	4.5	30.4	7	980	17.0	7.0	15.2
20-22/9/88	13	280	30.3	3.0	29.4	7	640	15.0	4.5	15.0

Tabella 3: Rapporto tra le attività corporee medie di Cs-137 e di Cs-137/K riscontrate nelle persone adulte di sesso femminile e maschile residenti a Bologna.

Periodo di misura	$\frac{\text{Cs-137 (donne)}}{\text{Cs-137 (uomini)}}$	$\frac{\text{Cs-137/K (donne)}}{\text{Cs-137/K (uomini)}}$
13-16 ottobre 1986	0.69	1.03
8-11 giugno 1987	0.56	0.88
11-14 gennaio 1988	0.42	0.65
9-11 maggio 1988	0.42	0.64
20-23 settembre 1988	0.43	0.66

Tabella 4: Contenuto corporeo medio di Cs-137 e di Cs-137/K nelle persone adulte di sesso maschile appartenenti al gruppo RAM BO.

Data di misura	N. sogg.	Cs-137		Cs-137/K	
		Valor medio (Bq)	SD (%)	Valor medio (Bq/g)	SD (%)
3-6/6/86	7	190	47.4	1.3	41.2
23-25/6/86	6	330	59.6	2.3	52.8
11/7/86	5	540	30.9	3.8	26.7
2-3/9/86	7	1070	29.2	7.4	23.0
25-29/9/86	7	1270	28.1	9.0	22.3
13/10/86	7	1380	22.6	10.0	16.0
10-12/11/86	7	1660	24.8	11.3	19.8
10-16/12/86	7	1800	24.6	12.1	18.3
14-15/1/87	7	2130	23.3	14.4	15.9
17/2/87	7	2320	25.1	15.1	15.4
17-19/3/87	7	2570	24.2	17.0	13.1
5/5/87	7	2880	20.3	19.2	11.2
8-9/6/87	7	2920	18.3	19.7	11.4
2-6/7/87	7	2840	19.0	19.7	11.2
2-4/9/87	6	2520	23.2	17.2	19.4
28-29/9/87	7	2240	18.9	16.0	14.7
3-4/11/87	7	1990	19.3	13.8	16.0
9-10/12/87	7	1780	22.0	12.3	14.3
11-14/1/88	7	1510	17.8	10.5	10.7
7-8/3/88	7	1210	23.3	8.4	17.5
9-10/5/88	7	980	17.0	7.0	15.2
27/6-4/7/88	7	850	20.8	6.0	13.7
20-22/9/88	7	640	15.0	4.5	15.0

Tabella 5: Contenuto corporeo medio di Cs-137 e di Cs-137/K nelle persone adulte di sesso maschile appartenenti al gruppo PAS BO.

Data di misura	N. sogg.	Cs-137		Cs-137/K	
		Valor medio (Bq)	SD (%)	Valor medio (Bq/g)	SD (%)
6/5/87	5	3140	19.2	19.1	15.9
8-11/6/87	5	3100	16.5	19.1	12.9
2-6/7/87	5	2920	14.4	18.3	13.5
2-3/9/87	5	2680	17.2	16.5	17.0
4/11/87	5	2220	15.5	13.7	14.1
10-11/12/87	5	1880	12.0	11.9	10.8
11-12/1/88	5	1710	14.4	10.8	13.9
7-8/3/88	5	1350	14.1	8.6	12.2
9-10/5/88	5	1150	19.0	7.3	14.6
27/6-4/7/88	5	970	13.7	6.3	16.1
		Valor medio	15.6		14.1

Tabella 6: Contenuto corporeo medio di Cs-137 e di Cs-137/K riscontrato negli anni 1963-1966 nelle persone adulte di sesso maschile residenti a Bologna.

Data di misura	N. sogg.	Cs-137		Cs-137/K	
		Valor medio (Bq)	SD (%)	Valor medio (Bq/g)	SD (%)
20-21/3/63	13	390	19.6	2.7	16.9
26/6-2/7/63	13	440	20.7	3.0	19.0
11-12/9/63	13	650	25.2	4.6	24.1
12-13/12/63	13	790	14.7	5.6	14.1
8-9/4/64	15	920	19.5	6.5	19.4
21-22/7/64	13	920	15.4	6.7	14.7
28-29/10/64	15	830	17.5	6.0	15.3
20-21/1/65	15	780	21.1	5.9	16.8
20-21/5/65	13	710	23.7	5.2	21.7
22-23/9/65	14	650	24.5	4.7	23.2
15-16/6/66	14	490	21.8	3.6	19.8
19-20/10/66	15	340	23.7	2.5	20.1
20-22/12/66	14	320	27.0	2.3	24.8
		Valor medio	21.1	19.2	

Tabella 7: Contenuto corporeo medio di Cs-137 nelle persone adulte di sesso maschile residenti nelle diverse regioni italiane.

Regione	Data di misura	N. sogg.	Cs-137	
			Valor medio (Bq)	SD (%)
Trent. Alto Adige	24/9/87	5	2530	30.4
Friuli Ven. Giulia 1	30/9/87	5	1990	25.6
Friuli Ven. Giulia 2	25/9/87	5	1990	48.7
Piemonte	22/9/87	5	2810	23.1
Lombardia	29/9/87	5	1730	14.5
Veneto	22/9/87	5	1750	15.4
Liguria	23/9/87	5	1670	29.3
Emilia Romagna	28-29/9/87	8	2180	19.7
Toscana	23/9/87	5	1500	25.3
Umbria	29/9/87	5	2730	30.8
Marche	24/9/87	5	1220	31.1
Lazio	21-28/9/87	12	1630	23.3
Abruzzi	23/9/87	5	1730	27.7
Molise	24/9/87	5	1480	44.6
Campania	23/9/87	5	1210	39.7
Basilicata	22/9/87	5	1770	18.6
Puglie	24/9/87	5	1500	22.0
Calabria	25/9/87	5	1500	31.3
Sicilia	28/9/87	5	1740	28.2
Sardegna	22/9/87	5	1070	24.3

Tabella 8: Contenuto corporeo medio di Cs-137 in persone adulte di sesso maschile appartenenti ad altri gruppi controllati negli anni 1986-88.

Gruppo	Data di misura	N. sogg.	Cs-137	
			Valor medio (Bq)	SD (%)
Test Maschi BO	14-16/10/86	11	1370	23.6
Trisaia	3/12/87	8	1300	27.4
Valdarno 1	17/3/87	5	1700	23.7
Valdarno 2	5/8/87	5	1980	27.2
Valdarno 3	16/10/87	5	1950	20.6
Valdarno 4	22/12/87	5	1440	34.5
Valdarno 5	24/2/88	4	1050	25.8

Tabella 9: Parametri principali relativi all'analisi della varianza della singola misura.

Gruppo	Intervallo attività (Bq)	Attività media generale (Bq)	Gradi di libertà	SDR (Bq)	Gradi di libertà	$\frac{\text{SDR}}{\text{Att. med. gen. (\%)}}$
RAMBO	100-1500	1010	62	125	48	12.4
RAMBO	1500-2500	1990	48	142	36	7.1
RAMBO	2500-4000	2800	27	113	18	4.0
PASBO	800-1500	1160	14	75	8	6.5
PASBO	1500-2500	1940	14	70	8	3.6
PASBO	2500-4000	2960	19	168	12	5.7
Femmine BO	100-1750	730	29	125	20	17.3
Maschi BO (1963-67)	200-1200	650	80	91	64	14.1

Tabella 10: Contenuto corporeo medio di I-131 da inalazione nelle persone adulte di sesso maschile residenti a Bologna o in varie località dell'URSS nei giorni immediatamente seguenti l'incidente di Chernobyl.

Località	Tipo di lavoro	Data di misura	N. sogg.	I-131	
				Val.medio (Bq)	SD (%)
Bologna		2/5/86 h12	6	400	25.3
Bologna		4/5/86 h12	6	330	24.9
Bologna		7/5/86 h12	6	270	31.0
Bologna		10/5/86 h12	6	220	34.8
Shlobin	Interno	30/4/86 h12	4	12860	9.6
Shlobin	Esterno	30/4/86 h12	4	23020	6.8
Sumy		3/5/86 h12	7	640	33.1
Sumy		5/5/86 h12	8	590	41.0
Gatovo	Interno	11/5/86 h12	5	2240	8.8
Gatovo	Esterno	11/5/86 h12	6	4120	15.1
Gatovo	Esterno	11/5/86 h12	11	3820	20.6

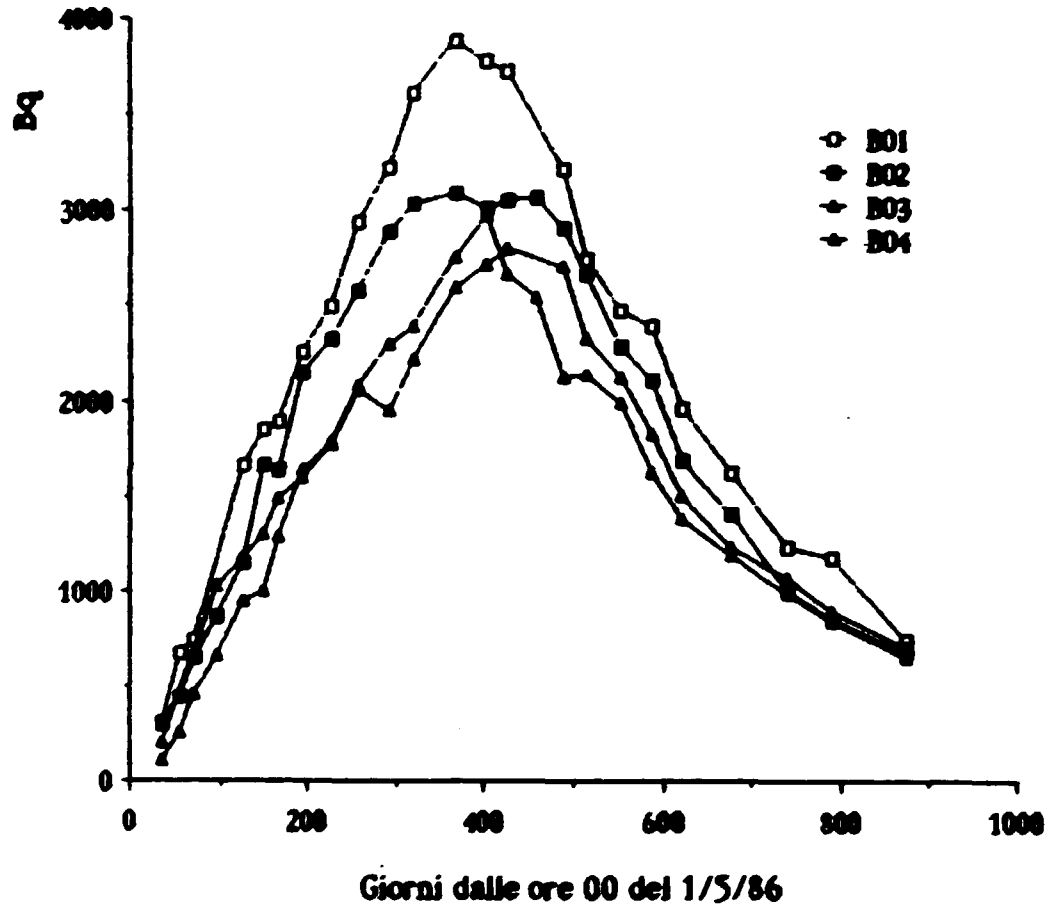


Figura 1a: Andamento nel tempo dell'attività corporea di Cs-137 in volontari adulti residenti a Bologna e periodicamente controllati dopo l'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl.

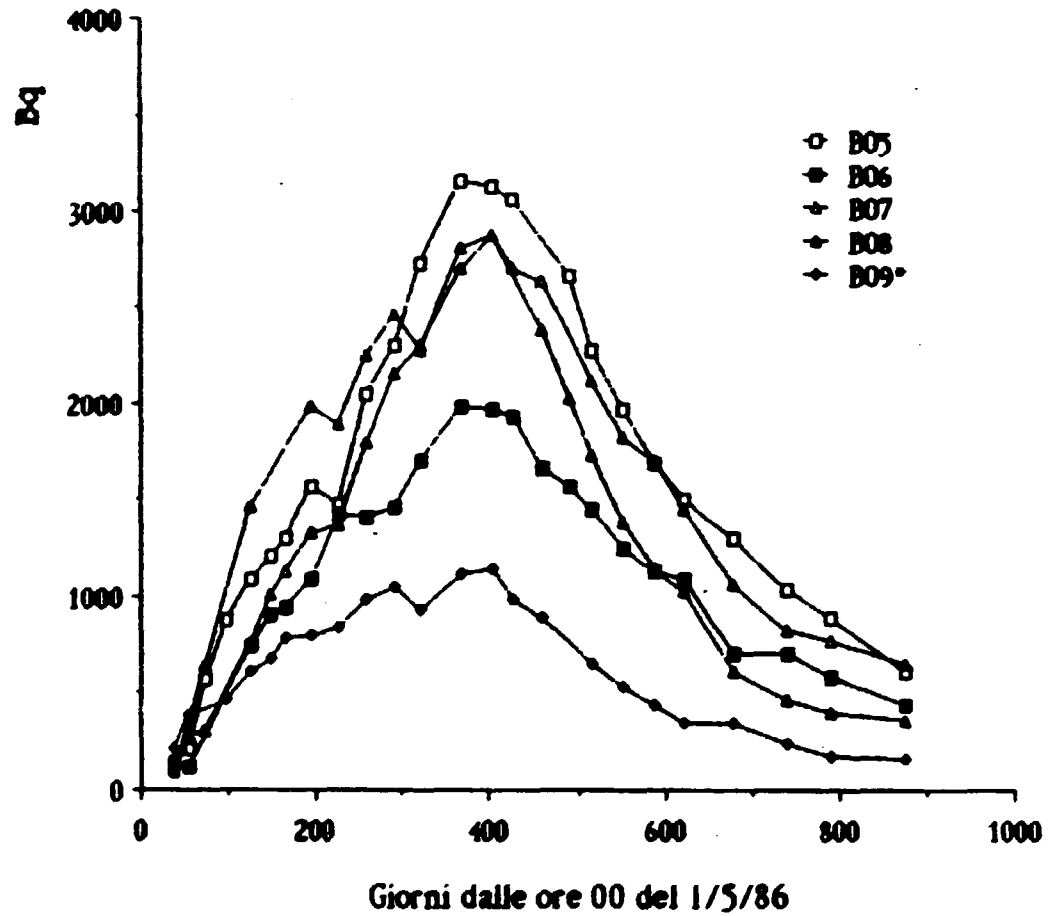


Figura 1b: Andamento nel tempo dell'attività corporea di Cs-137 in volontari adulti residenti a Bologna e periodicamente controllati dopo l'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl.

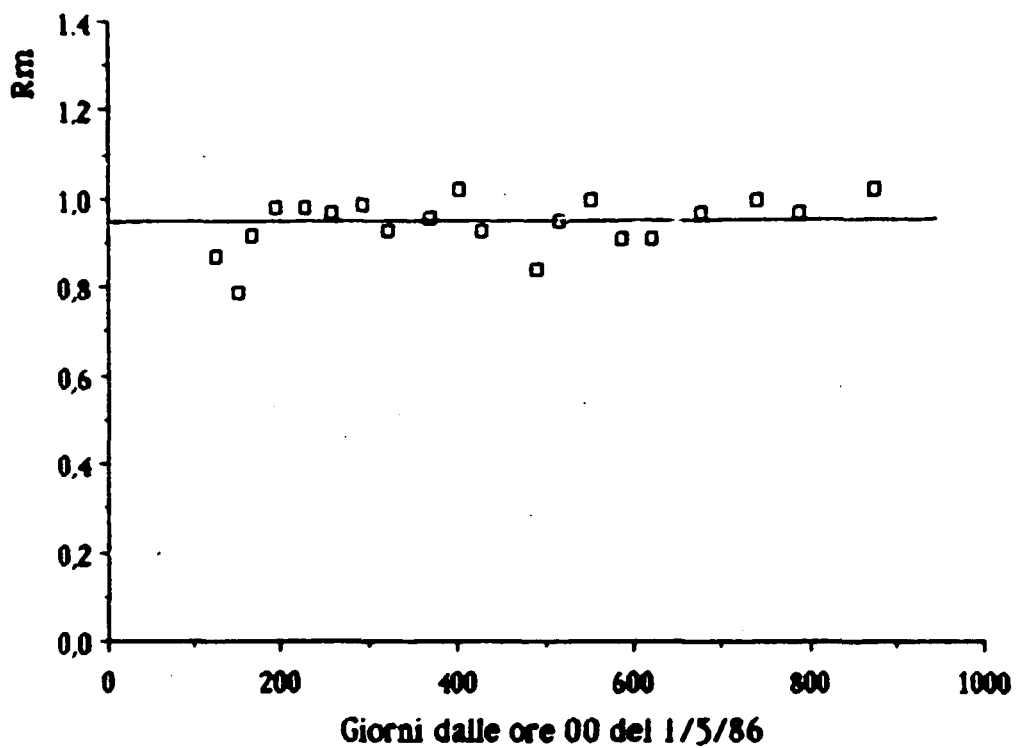


Figura 2: Andamento nel tempo del rapporto R_m relativo al soggetto BO3.

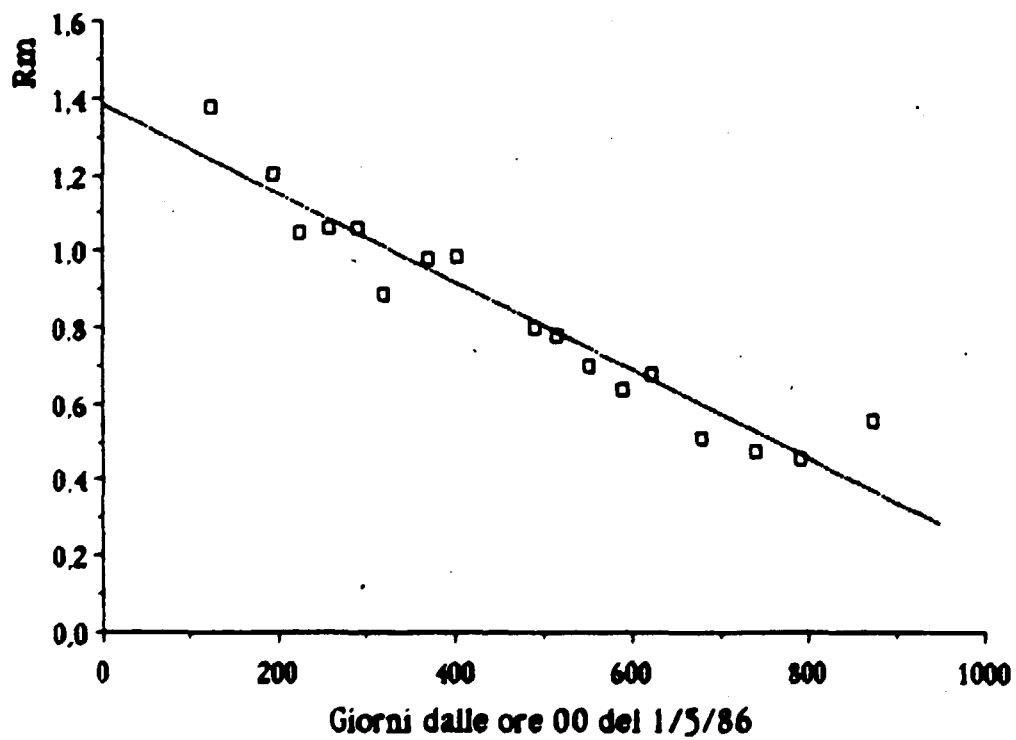


Figura 3: Andamento nel tempo del rapporto R_m relativo al soggetto BO8.

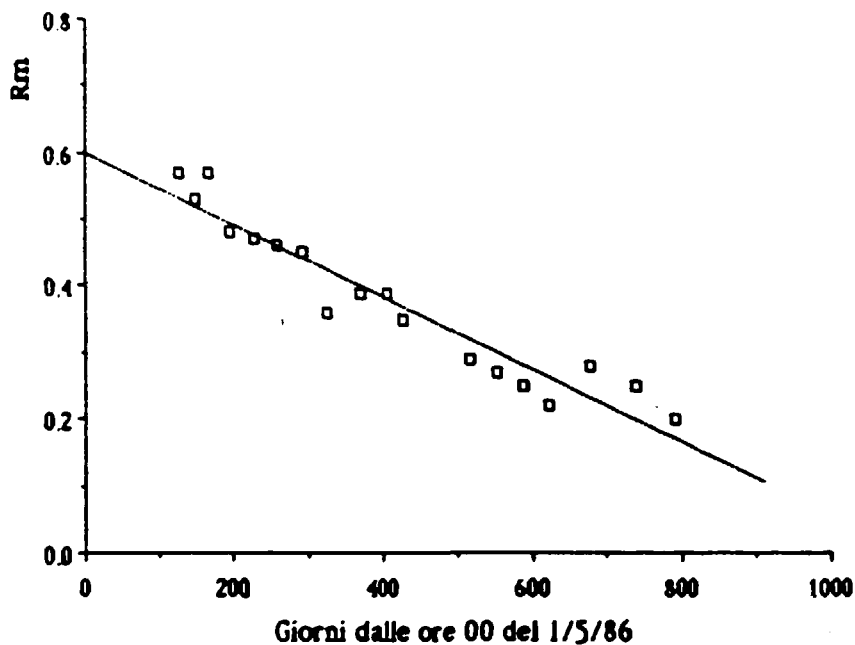


Figura 4: Andamento nel tempo del rapporto R_m relativo al soggetto BO9*.

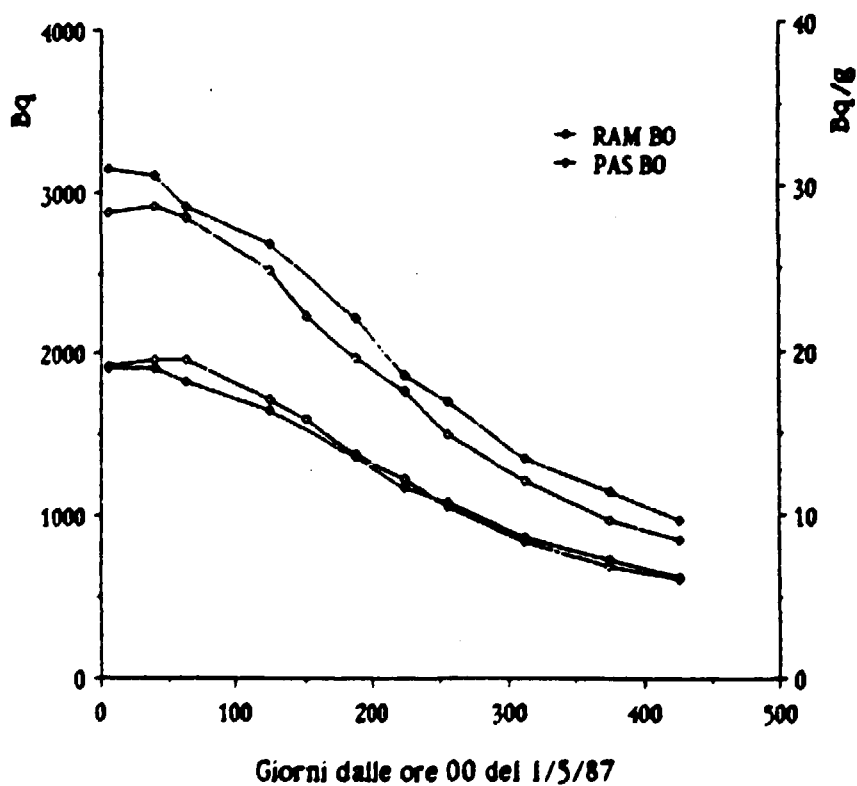


Figura 5: Andamento dell'attività corporea media di Cs-137, espressa in Bq (curve superiori) ed in Bq/g di potassio (curve inferiori), relativa ai gruppi RAM BO e PAS BO a partire dal maggio 1987.

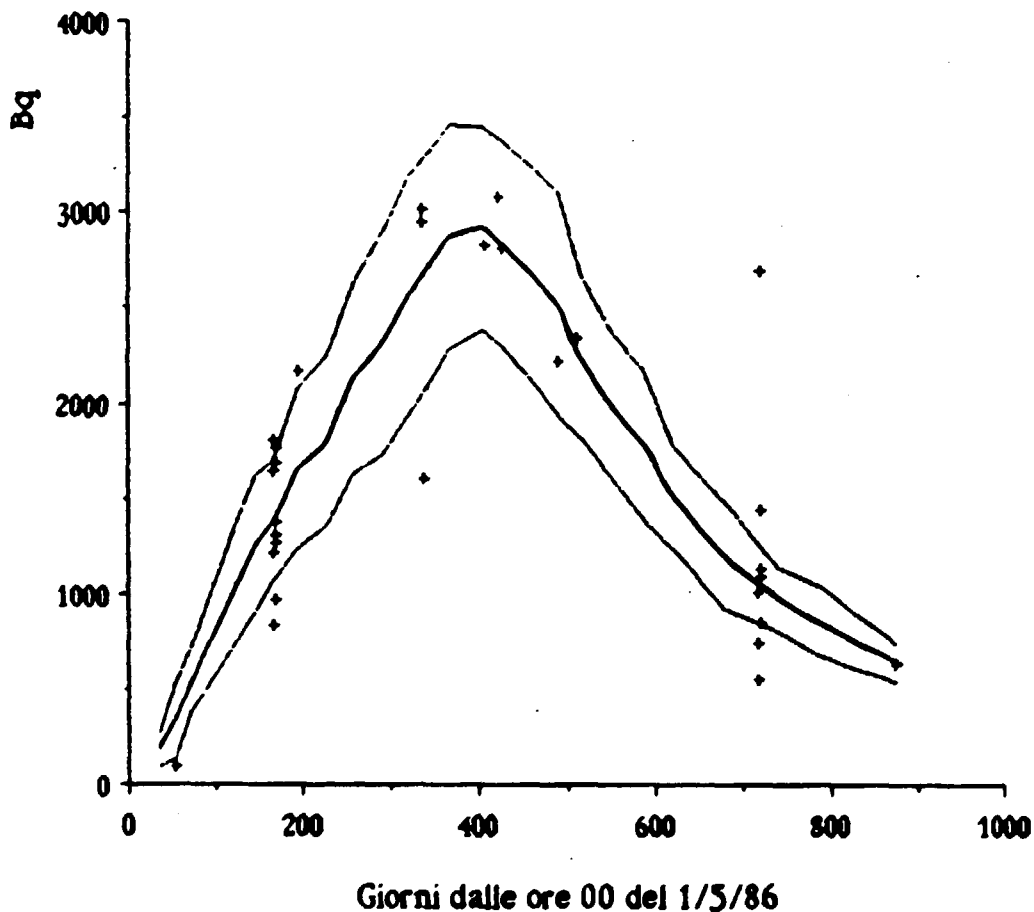


Figura 6: Andamento dei valori medi di attività corporea di Cs-137 relativi al gruppo RAM BO (linea centrale) e valori riscontrati in adulti di sesso maschile residenti a Bologna. Le linee superiore ed inferiore indicano uno scostamento di 1 deviazione standard in più od in meno.

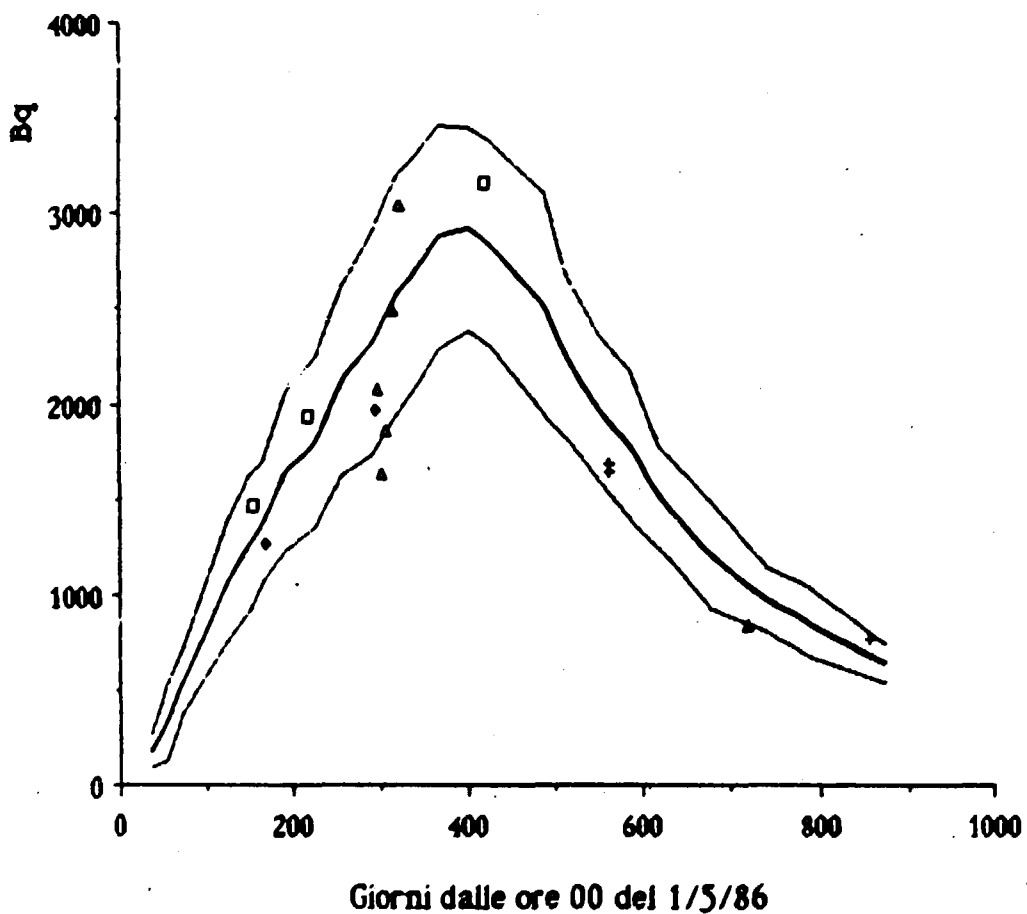


Figura 7: Andamento dei valori medi di attività corporea di Cs-137 relativi al gruppo RAM BO (linea centrale) e valori riscontrati in adulti di sesso maschile residenti in Emilia-Romagna: Forlì (♦), Modena (▲), Ferrara (□), Ravenna (+), Reggio Emilia (Δ). Le linee superiore ed inferiore indicano uno scostamento di 1 deviazione standard in più od in meno.

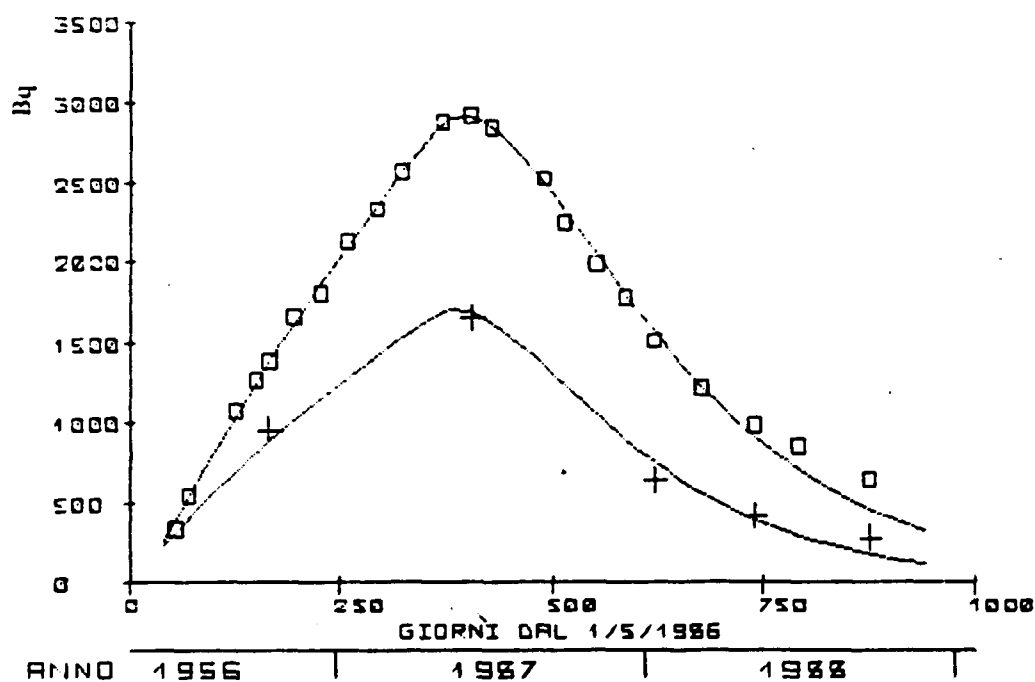


Figura 8: Andamento nel tempo dell'attività corporea media di Cs-137 nelle persone adulte di sesso femminile (curva inferiore) e di sesso maschile (curva superiore) residenti a Bologna.

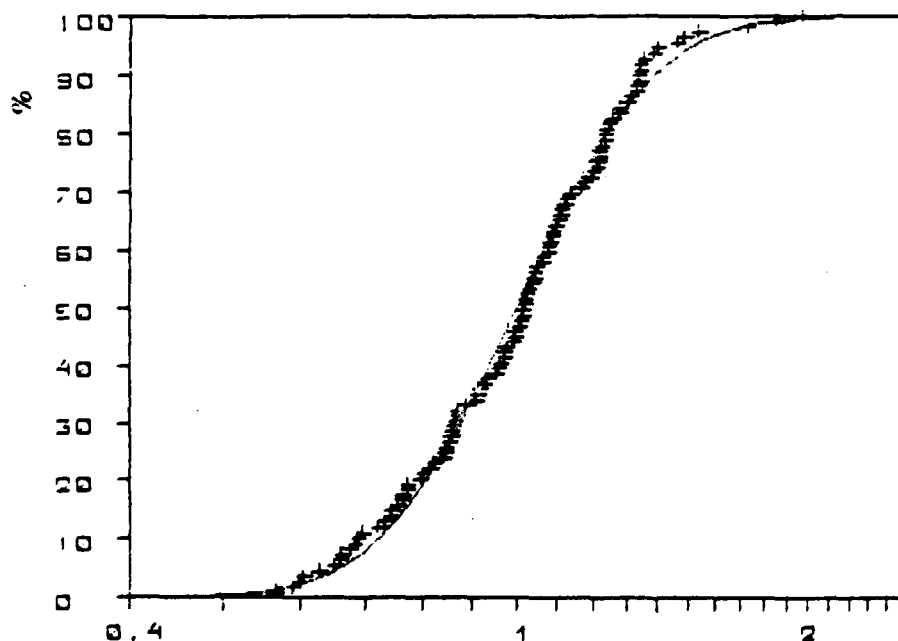


Figura 9: Distribuzione log-normale cumulativa dei dati individuali di attività, normalizzati al valor medio del gruppo di appartenenza, ottenuti nella campagna nazionale di dosimetria interna (settembre 1987).

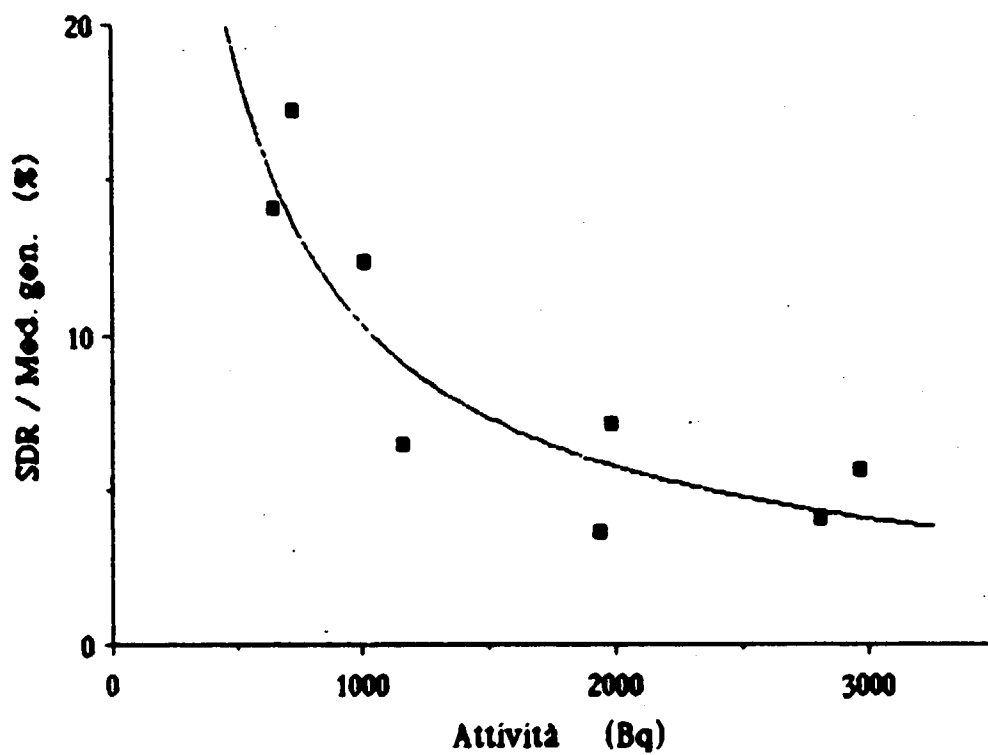


Figura 10: Andamento della deviazione standard residua percentuale della singola misura, SDR, in funzione dell'attività media.

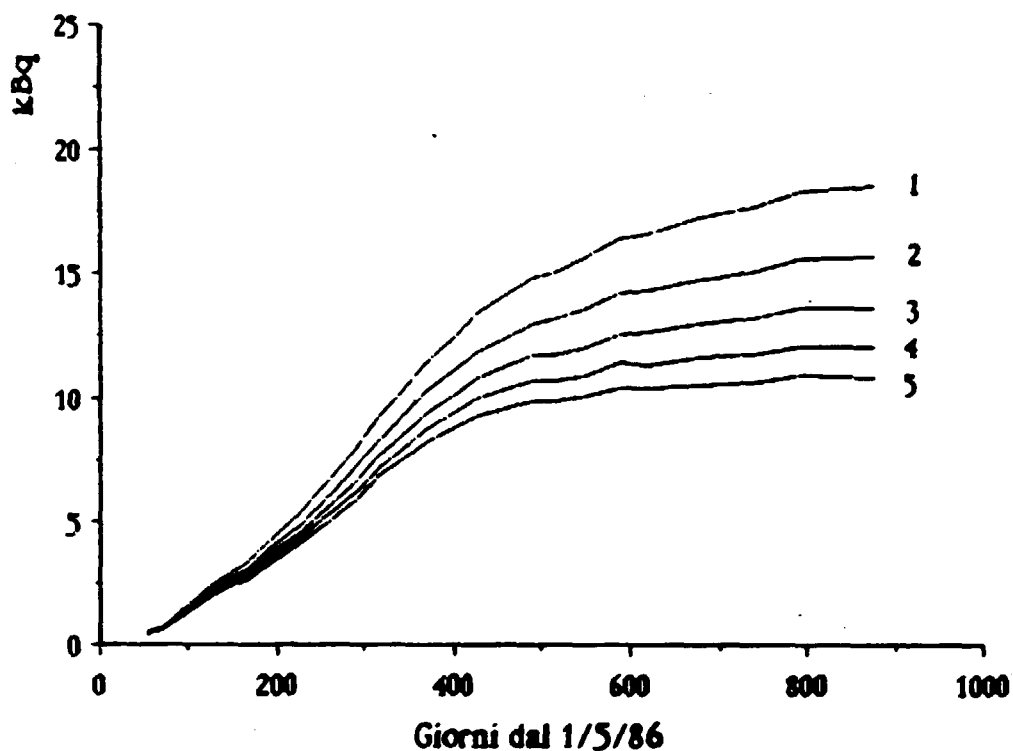


Figura 11: Andamento temporale dei valori degli integrali, dall'inizio della contaminazione al giorno t , della ingestione media giornaliera di Cs-137 in seguito all'incidente di Chernobyl da parte del soggetto BO1, in relazione a 5 tempi di dimezzamento biologico per la frazione a lungo tempo di ritenzione.

Tempi di dimezzamento biologico :

- 1 = 80 giorni
- 2 = 95 giorni
- 3 = 110 giorni
- 4 = 125 giorni
- 5 = 140 giorni

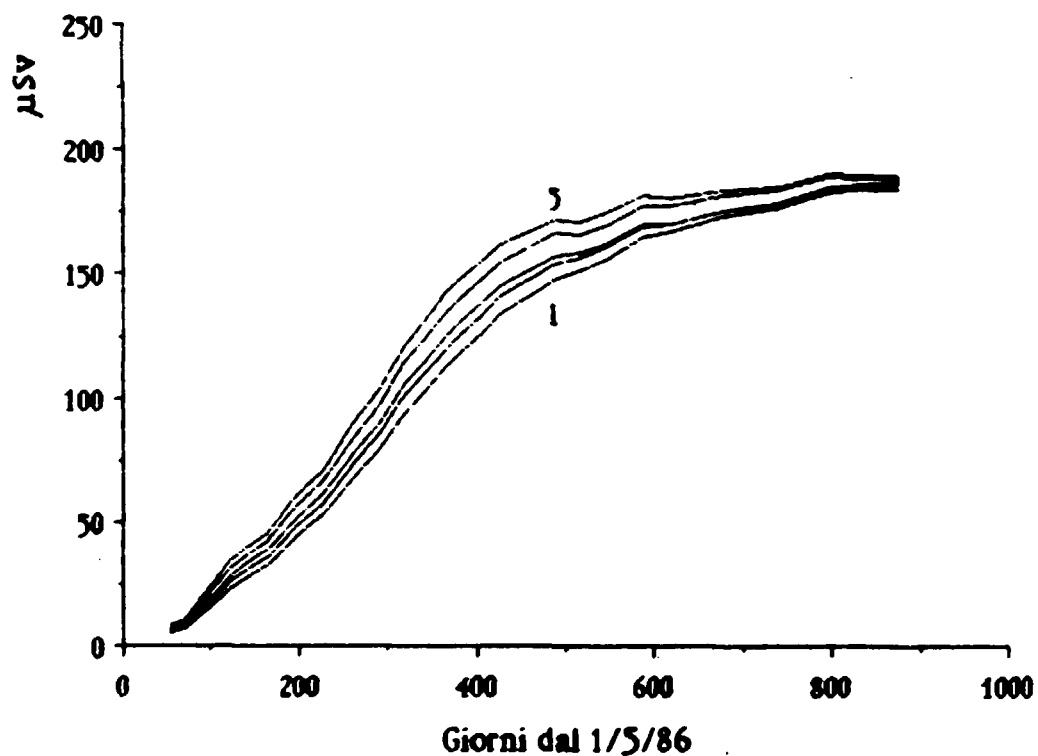


Figura 12: Andamento temporale dei valori di equivalenti di dose efficaci impegnati da Cs-137 accumulati dall'inizio della contaminazione al giorno t per il soggetto BO1, in relazione a 5 tempi di dimezzamento biologico per la frazione a lungo tempo di ritenzione.

Tempi di dimezzamento biologico :

- 1 = 80 giorni
- 2 = 95 giorni
- 3 = 110 giorni
- 4 = 125 giorni
- 5 = 140 giorni

Edito a cura dell'ENEA, Direzione Centrale Relazioni.
Viale Regina Margherita, 125 - Roma
Finito di stampare nel mese di giugno 1989

Fotoriproduzione e stampa
a cura della Sped S.p.A.
Via del Pago Tricipo, 39 - Roma

Questo fascicolo è stato stampato su carta riciclata