

In Italia, così come nell'intera Europa, l'*evento Chernobyl* ha rappresentato un momento cruciale di riflessione sui temi connessi col ruolo che la tecnica e la scienza hanno assunto nella nostra società e con l'origine, la percezione ed il governo del rischio ad esse connesso.

In linea generale la principale fonte di contaminazione radioattiva è storicamente costituita dalle esplosioni di ordigni nucleari in atmosfera, sperimentazioni particolarmente frequenti fra gli anni '40 e '80 dello scorso secolo. La produzione di energia dal nucleare, la fabbricazione di armi nucleari e la produzione di radioisotopi sono invece attività che normalmente generano dosi per la popolazione estremamente basse e territorialmente circoscritte grazie alla rigorose norme di progettazione e di funzionamento delle strutture.

In Europa solo l'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl ha determinato dosi significative per la popolazione.

Radiazioni ionizzanti: vent'anni dopo Chernobyl

L'incidente di Chernobyl

Nella centrale nucleare di Chernobyl (Ucraina) – nella notte fra il 26 e il 27 aprile 1986, mentre era in corso un test di sicurezza – all'interno del reattore si verificò un improvviso aumento di potenza, impossibile da controllare a causa della programmata disattivazione dei sistemi di sicurezza durante il test; ciò innescò una serie di esplosioni che distrussero le strutture di contenimento e diedero luogo ad un violento incendio. Localmente la situazione si rivelò gravissima sia a causa dell'elevatissimo livello delle radiazioni alle quali furono esposti i lavoratori e gli abitanti della zona, sia a causa dell'enorme estensione territoriale della contaminazione radioattiva.

La nube radioattiva prodotta dall'incendio, inoltre, venne spinta dai venti e si spostò verso altre nazioni arrivando in Svezia, Germania, Austria, Romania, Svizzera e Italia. Nei giorni successivi all'incidente molte zone dell'Europa vennero quindi contaminate in maniera più o meno rilevante in funzione dei venti prevalenti e delle precipitazioni meteorologiche locali, che depositarono a terra le polveri radioattive.

Nelle zone europee interessate dalla contaminazione radioattiva – quali l'Italia – il principale motivo di preoccupazione fu quello degli *effetti stocastici* ovvero di quegli effetti sanitari (non certi) che

presentano una qualche probabilità di verificarsi in determinate condizioni d'esposizione.

In Lombardia, nel momento in cui scattò l'emergenza, la Regione poté avvalersi delle due strutture pubbliche di misure nucleari di Milano e Cremona (Presidi Multizonali di Igiene e Prevenzione), affiancate da numerose altre strutture tra cui il Centro Comune di Ricerca EURATOM di Ispra, il CISE e le Università di Milano e di Pavia nonché alcuni servizi di Fisica Sanitaria ospedalieri; la stessa centrale nucleare di Caorso rese disponibili le proprie rilevazioni.

Le misure di radiocontaminazione ambientale effettuate in Lombardia furono numerosissime – circa 600 al mese per circa dieci mesi – e la popolazione fu quotidianamente informata attraverso comunicati stampa; la gestione dell'emergenza vide coinvolte le istituzioni sanitarie locali, regionali e nazionali.

La contaminazione dell'atmosfera fu il primo segnale della dispersione nell'ambiente di radionuclidi dovuta all'incidente di Chernobyl: il monitoraggio dello stato di radiocontaminazione del particolato atmosferico e delle ricadute umide e secche (*fall-out*) consentì nei primi giorni del maggio 1986 una tempestiva conoscenza del fenomeno in atto e permise di procedere all'attuazione dei necessari provvedimenti sanitari.

Le prime misure effettuate a partire dal 30 aprile riguardarono innanzitutto alcune matrici ambientali quali l'aria, l'acqua piovana, il suolo; a queste furono subito affiancate misure relative ai vegetali, al latte e ad altre matrici alimentari; al fine di coordinare il piano dei prelievi sull'intero territorio regionale l'Assessorato regionale alla Sanità attivò le *Commissioni provinciali per la protezione sanitaria della popolazione contro i rischi dalle*

Figura 10.1 **Deposizioni in Italia – 1998**

I rilasci dei radioisotopi volatili radiologicamente più importanti sono stati stimati in 1.500 PBq di ^{131}I , 85 PBq di ^{137}Cs e 46 PBq di ^{134}Cs . Più di 140.000 km² del territorio dei tre Paesi più colpiti (Ucraina, Bielorussia e Federazione Russa) e più di 45.000 km² di altri Paesi europei sono stati contaminati con livelli di ^{137}Cs superiori a 40 kBq/m².

Fonte: Progetto Humus di *Mondo in cammino*



radiazioni ionizzanti previste dalla allora vigente normativa (D.P.R. 185/1964).

L'obiettivo dei primissimi giorni di rilevazione fu quello di individuare e quantificare la distribuzione della ricaduta radioattiva sul territorio lombardo mentre nel periodo immediatamente successivo l'attenzione si concentrò sui principali elementi della catena alimentare umana e sulle matrici che possedevano maggiore probabilità di accumulo e di trasferimento delle sostanze radioattive verso la popolazione: uno degli obiettivi principali delle misure era infatti quello di fornire supporto all'azione di regolamentazione dell'uso di determinati alimenti al fine di limitare la dose alla popolazione.

È tuttora in corso l'attività di controllo radiometrico di quegli elementi ambientali e alimentari che permettono la valutazione dell'evoluzione della radiocontaminazione a lungo termine.

I rilievi allora effettuati evidenziarono una contaminazione disomogenea del territorio regionale, più consistente nella parte nord-ovest della regione ed in particolare nella zona compresa tra Como e Lecco – chiamata Triangolo Lariano – e nella zona del Lago Ceresio, tra le province di Como e Varese.

I controlli effettuati sui vegetali commestibili (ortaggi e foraggi), sul latte e sulla carne evidenziarono una situazione tale da richiedere di evitare l'assunzione di alimenti contaminati per limitare l'esposizione interna della popolazione interessata. Nel mese di maggio il Consiglio delle Comunità Europee adottò il Regolamento 1707/1986 in cui stabilì le tolleranze massime (come radioattività

cumulata di ^{134}Cs e ^{137}Cs) per l'immissione in libera pratica dei prodotti agricoli originari dei Paesi terzi; il Ministero della Sanità ampliò l'applicazione anche a prodotti di produzione nazionale e – dato che le concentrazioni di cesio nel latte bovino e caprino nonché nelle carni di coniglio, di pecora e di capra prodotti nella zona del Triangolo Lariano superavano questi limiti – la Regione Lombardia adottò provvedimenti cautelativi concernenti il consumo di tali alimenti nel territorio interessato nonché ordinanze riguardanti lo smaltimento dei conigli abbattuti, dell'erba tagliata e del foraggio contaminati.

La contaminazione dell'ambiente e delle matrici alimentari

La presenza nel particolato atmosferico di alcuni radionuclidi artificiali prodotti dall'incidente (come ^{131}I e ^{132}Te) fu ben visibile nei giorni immediatamente successivi all'incidente di Chernobyl ma la concentrazione diminuì molto rapidamente in poche settimane grazie alla breve vita media di tali radioisotopi.

Il ^{137}Cs invece ha vita media pari a circa trent'anni e la sua presenza è stata rilevabile nel particolato atmosferico per parecchi anni pur mostrando un costante decremento, evidenza che testimonia l'inesistenza di ulteriori rilevanti immissioni di tale elemento radioattivo in atmosfera.

Il monitoraggio giornaliero del particolato in

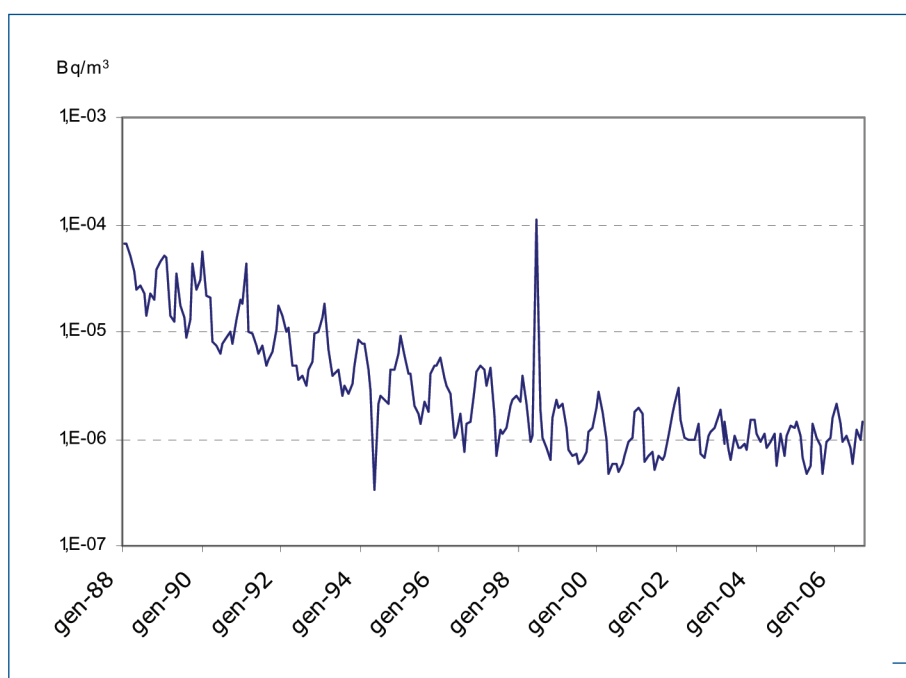


Figura 10.2 ^{137}Cs nel particolato atmosferico - Milano

Le misure della concentrazione media mensile di ^{137}Cs in aria dopo l'incidente di Chernobyl mostrano una decrescita sovrapposta ad una marcata periodicità, con massimi raggiunti durante il periodo invernale e minimi nei mesi estivi; tale andamento stagionale è verosimilmente dovuto alle condizioni meteorologiche tipiche dei differenti periodi dell'anno (come stabilità atmosferica, spessore dello strato di rimescolamento) che influenzano i fenomeni di dispersione ambientale. Fonte: ARPA Lombardia

atmosfera ha avuto la funzione di sistema d'allarme in tempo quasi reale mentre il monitoraggio della deposizione umida e secca al suolo (*fall-out*) è stato utile per caratterizzare la contaminazione dovuta all'incidente.

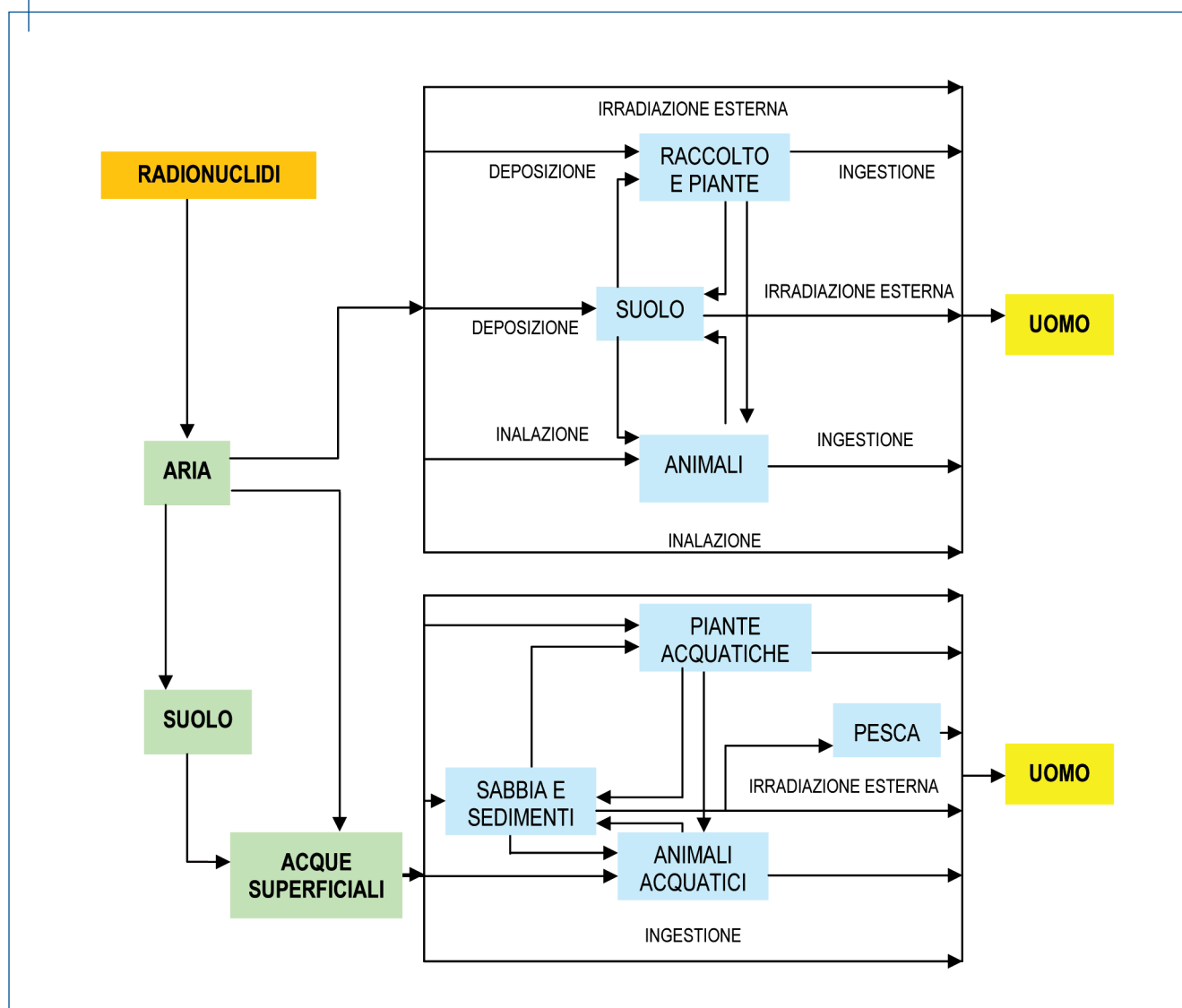
I radionuclidi immessi artificialmente nell'ambiente entrano a far parte di processi chimici, fisici e biologici che determinano la loro dispersione – o la loro concentrazione – in particolari componenti ambientali, alcune delle quali interessano l'uomo; possono venire concentrati negli organismi viventi e lungo le catene alimentari, e i radionuclidi che entrano nelle catene alimentari acquatiche sono diversi da quelli che entrano nelle catene alimentari terrestri.

Subito dopo l'incidente di Chernobyl la principale preoccupazione derivò dalla presenza di ^{131}I , radionuclide con tempo di dimezzamento di circa 8 giorni ed assorbito con facilità dai vegetali e dagli animali. Lo ^{131}I nel 1986 era particolarmente

Figura 10.3 **Percorsi seguiti dai radionuclidi rilasciati in atmosfera per raggiungere l'uomo**

In caso di rilascio dei radionuclidi in atmosfera le principali vie di esposizione sono l'irradiazione esterna alla nube radioattiva, l'inalazione diretta, l'inalazione di materiale risospeso, l'irradiazione causata dalla radioattività depositata al suolo, l'ingestione attraverso gli alimenti.

Fonte: ICRP (modificato)



abbondante e fu considerato l'isotopo guida per i controlli nei primi giorni; successivamente l'attenzione si concentrò sulla contaminazione da ^{137}Cs – che viene assorbito da piante e funghi quando disperso sul suolo – e sulla contaminazione da ^{90}Sr , che presenta tempo di emivita di circa trent'anni e tende a sostituirsi al calcio; questi radionuclidi hanno grande significato per il controllo della catena trofica terrestre.

I corpi idrici superficiali sono stati – direttamente o indirettamente – interessati dal fenomeno della contaminazione radioattiva proveniente da Chernobyl. Anche se i pesci di acqua dolce compaiono in posizione del tutto secondaria fra gli alimenti che costituiscono la dieta tipo della popolazione, la fauna ittica è stata ritenuta una matrice di interesse a causa della grande consistenza di acque superficiali presenti in Lombardia ed è stata quindi individuata come bioindicatore della condizione radioecologica di fiumi e laghi.

La contaminazione di tali acque è avvenuta sostanzialmente secondo due meccanismi: tramite ricaduta atmosferica diretta ed attraverso il dilavamento del terreno contaminato. I meccanismi che regolano il destino degli isotopi radioattivi negli ambienti acquatici è piuttosto differente a seconda che si tratti di sistemi fluviali o lacustri; questi ultimi infatti – essendo caratterizzati da un minor ricambio della massa d'acqua – fanno registrare maggiori accumuli di radiocontaminanti sia nei sedimenti che lungo le catene alimentari.

Nei laghi viene determinata la radioattività presente in specie ittiche che vivono in habitat diver-

si: zone litorali, zone pelagiche e fondali. La contaminazione delle acque dei principali laghi lombardi è diminuita rapidamente – passando da 3 Bq/l di ^{137}Cs dei primi giorni di maggio del 1986 a 0,02 Bq/l dopo poche settimane – a causa dell'assorbimento planctonico, della diluizione e della sedimentazione delle particelle sospese. Nelle specie ittiche che si nutrono di plancton, come l'arborella e il cavedano, il ^{137}Cs ha raggiunto concentrazioni massime fra l'estate e l'autunno del 1986 mentre nelle specie carnivore, come il pesce persico, ha raggiunto concentrazioni superiori a quelle presenti delle specie planctofaghe fra il mese di febbraio e quello di maggio del 1987. Col passare degli anni si è registrata una graduale decontaminazione delle popolazioni ittiche, con una diversa evoluzione temporale per le specie erbivore rispetto alle specie carnivore; anche il tempo di ricambio idrico, che caratterizza ogni lago, incide sui livelli di contaminazione residua.

Nella maggior parte dell'Europa la contaminazione delle acque di superficie è diminuita rapidamente grazie alla diluizione, al decadimento fisico e all'assorbimento dei radionuclidi nei sedimenti dei fondali e nel fondo dei bacini; a causa del bioaccumulo nella catena alimentare acquatica in passato sono state trovate concentrazioni significative di radiocesio nei pesci di laghi della Germania o della Scandinavia: fatta eccezione per i laghi chiusi senza emissari, attualmente i livelli di ^{137}Cs nei pesci e nelle acque sono bassi.

In considerazione del fatto che in ambiente acquatico parte della radioattività viene rimossa

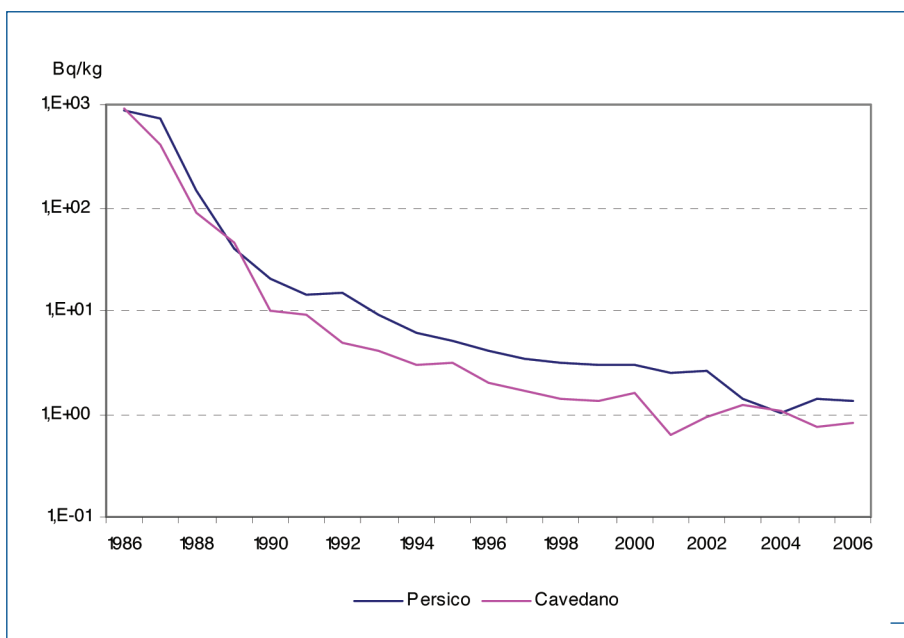


Figura 10.4 ^{137}Cs nella fauna ittica del Lario

Viene rappresentata la concentrazione media annuale.

Il monitoraggio radiometrico della fauna ittica viene effettuato nei principali laghi lombardi, in alcuni fiumi e – per confronto – in alcuni bacini di allevamento. Fonte: ARPA Lombardia

attraverso l'assorbimento sul particolato sospeso o mediante sedimentazione, da alcuni anni il monitoraggio radiologico dei fiumi viene effettuato attraverso l'analisi del detrito minerale organico (DMO): tale matrice ambientale presenta caratteristiche di lento accumulo dei radionuclidi ed è costituita dal deposito del materiale trascinato dalla corrente. L'analisi del DMO ha consentito di rilevare lungo l'asta del Po – dagli anni successivi all'incidente di Chernobyl – l'andamento della concentrazione di ^{137}Cs , radioisotopo ancora oggi rilevabile anche se in concentrazioni bassissime.

Dal 1988 vengono inoltre eseguiti controlli periodici delle acque potabili delle principali città lombarde con lo scopo di verificare l'eventuale contaminazione e di misurare i livelli di radioattività naturale; nei primi anni dopo l'incidente di Chernobyl tali controlli hanno rilevato la presenza di tracce sporadiche di ^{137}Cs , oggi praticamente scomparso.

Per quanto riguarda le acque profonde, infatti, non si sono sostanzialmente mai riscontrate concentrazioni significative di radionuclidi poiché il terreno, attraverso cui filtrano le acque meteoriche contaminate, svolge azione protettiva di filtro.

Il suolo è tra i primi comparti ambientali interessati dai fenomeni di ricaduta dei radionuclidi: il monitoraggio della radiocontaminazione del terreno – valutando l'entità dei fenomeni di deposizio-

ne – fornisce indicazioni circa l'esposizione della popolazione.

I radionuclidi, una volta depositati al suolo, seguono diverse vie di dispersione quali la migrazione lungo il profilo verticale del terreno o l'assorbimento da parte dell'apparato radicale delle piante; gli elementi radioattivi assorbiti dalla vegetazione possono essere successivamente asportati con il raccolto e in parte ritornare al suolo attraverso le deiezioni degli animali alimentati con vegetali contaminati.

Per costruire la mappa delle ricadute radioattive derivate dall'incidente di Chernobyl nel periodo successivo alla fase acuta di *fall-out*, sono state individuate quelle località lombarde ove le precipitazioni meteoriche erano state particolarmente abbondanti nei giorni successivi all'evento. Tali località si trovano in un'area che all'incirca va dalla Valsassina alla Brianza, comprendendo la zona lariana; come prevedibile, si è evidenziata una notevole variabilità geografica delle deposizioni, riscontrata dai valori di contaminazione del terreno.

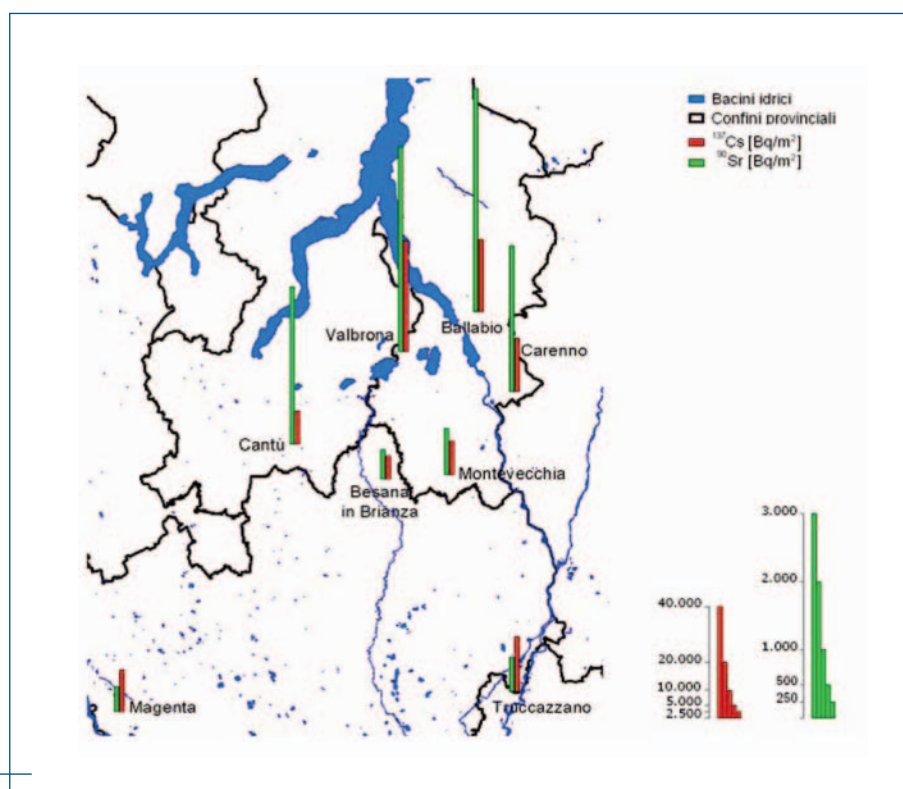
Ancora oggi la radioattività artificiale presente nei suoli della Lombardia è imputabile per lo più all'incidente di Chernobyl: essa è dovuta a prodotti di fissione a emivita lunga, come il ^{137}Cs e lo ^{90}Sr , ma i valori misurati non danno comunque luogo a esposizione interna ed esterna significativa.

Figura 10.5 **Valori di deposizione totale di ^{137}Cs e ^{90}Sr misurati nel 1996**

I risultati delle analisi nel terreno 10 anni dopo l'evento di Chernobyl hanno confermato una notevole variabilità geografica della contaminazione, in dipendenza dalla differente abbondanza di precipitazioni meteoriche avute nei giorni successivi all'evento.

I valori di ^{137}Cs e ^{90}Sr in Bq/m^2 sono stati ottenuti sommando il contenuto di radionuclidi di diverse sezioni di suolo da 0 a 40 cm di profondità. I due contaminanti sono rappresentati con scale differenti a causa della diversa entità del livello di contaminazione.

Fonte: ARPA Lombardia



La radiocontaminazione del terreno è piuttosto superficiale: circa l'80% del ^{137}Cs è contenuto nei primi 20 cm di terreno e le concentrazioni massime si rilevano in genere nello strato che va dai 5 ai 10 cm in profondità.

A livello europeo si ritiene che a seguito dell'incidente di Chernobyl gli animali e la vegetazione delle foreste e delle zone montagnose dei Paesi più pesantemente colpiti dalle ricadute radioattive abbiano assorbito grandi quantità di radiocesonio; attualmente i livelli di radioattività sono rimasti elevati nei funghi, nelle bacche e nella selvaggina; ad esempio, in Paesi quali la Finlandia, la Norvegia, la Russia e la Svezia è stato osservato un significativo trasferimento di radiocesonio dai licheni alla carne di renna, evidenza che ha indotto i rispettivi Governi ad imporre restrizioni alla caccia.

Negli ecosistemi naturali e semi-naturali – quali le foreste e le superfici boschive – il suolo è costituito per la maggior parte da materiale organico che tende ad aumentare la disponibilità biologica del cesio radioattivo, il quale tende ad essere trattenuto in uno scambio ciclico tra gli strati superiori del suolo, i batteri, la microfauna, la microflora e la vegetazione; per tale motivo nel 2003 la Commissione Europea ha emesso la Raccomandazione C(2003) 510 sulla protezione e l'informazione del pubblico circa l'esposizione risultante dal consumo di prodotti spontanei.

Una delle prime misure di protezione della popolazione adottate in Italia in relazione all'incidente di Chernobyl è stata quella di invitare la popolazione a non consumare alimenti contaminati, individuandoli con specifiche ordinanze.

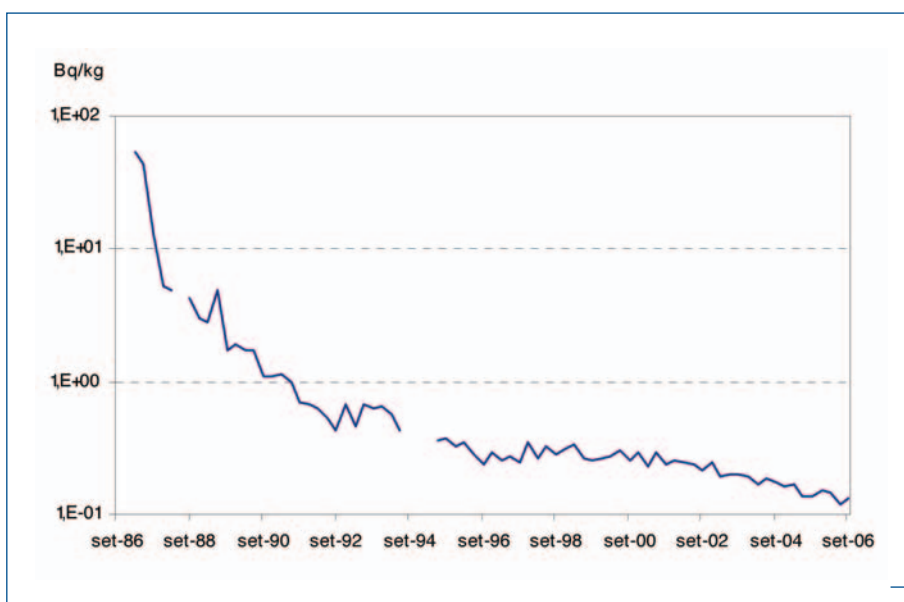


Figura 10.6 ^{137}Cs nel latte vaccino fresco di centrale – Varese

Viene rappresentata la concentrazione media trimestrale.

La centrale del latte di Varese è rappresentativa della realtà produttiva della fascia prealpina. L'evoluzione nel tempo della radiocontaminazione derivata dall'incidente di Chernobyl vede una marcata contaminazione iniziale, dovuta ad intense ricadute che interessarono il Nord Italia nei primi giorni di maggio 1986. La concentrazione di ^{137}Cs allora misurata in campioni di fieno della zona prealpina era di circa 10 volte maggiore di quella misurata nei campioni della zona padana a causa del fatto che il fieno prealpino proviene da prato stabile ovvero caratterizzato da maggiori tempi di residenza, maggiore apparato radicale e diverso fattore di uptake dal terreno, dal quale assorbe anche il ^{137}Cs .

Fonte: ARPA Lombardia

Gli alimenti possono contaminarsi direttamente, rimanendo esposti alla ricaduta radioattiva, o indirettamente attraverso la catena alimentare ed in questo secondo caso la contaminazione è strettamente correlata alla radioattività ambientale; ciò giustifica gli eventuali divieti di pascolo, di macellazione, di caccia e di pesca che vengono emessi.

Fin dai primi momenti dopo la consapevolezza dell'incidente nucleare, è stata posta particolare attenzione al controllo del latte in quanto esso rappresenta una componente importante nell'alimentazione umana (in particolare dei bambini) ed è un valido indicatore della radiocontaminazione ambientale a causa dello stretto legame con l'alimentazione animale.

Il Cesio radioattivo ricaduto al suolo nel maggio del 1986 si presentava in due forme isotopiche: ^{134}Cs (emivita di circa 2 anni) e ^{137}Cs (emivita di 30 anni). Il ^{134}Cs nel latte è stato rilevabile fino a 5 anni dopo l'incidente mentre attualmente sono ancora rilevabili solamente minime tracce di ^{137}Cs .

Produzione di energia dal nucleare in Europa dopo Chernobyl

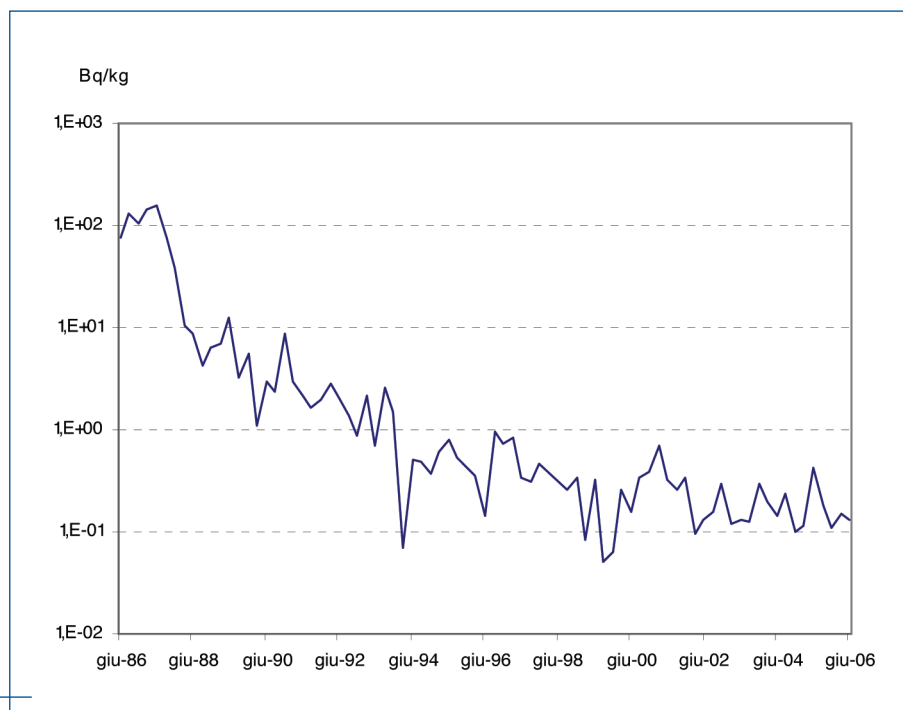
In Italia, così come in molti Paesi occidentali, l'eco dell'incidente di Chernobyl ebbe pesanti ripercussioni socio-politiche sfociate nel Referendum relativo all'uso civile del nucleare: gli elettori italiani furono chiamati ad esprimersi sul-

Figura 10.7 ^{137}Cs nella carne bovina - Milano

Viene rappresentata la concentrazione media trimestrale.

La carne bovina ha quasi sempre presentato valori più elevati di concentrazione di ^{137}Cs rispetto al pollame ed alla carne suina; la contaminazione da radiocesio è inoltre diminuita negli anni più lentamente rispetto a quella delle altre carni. Anche in questo caso è l'utilizzo dei foraggi per l'alimentazione del bestiame a determinare l'evoluzione della contaminazione.

Fonte: ARPA Lombardia



l'abrogazione di disposizioni di legge atte ad agevolare l'insediamento delle centrali sul territorio nazionale e la partecipazione dell'ENEL alla costruzione e gestione di centrali nucleari all'estero. Visto l'esito del Referendum, il Governo Italiano chiuse la centrale di Latina, sospese i lavori della centrale di Trino 2 (Vercelli), dispose la verifica della sicurezza delle centrali di Caorso e Trino 1 e promosse lo studio di fattibilità per riconvertire la centrale di Montalto di Castro.

Di fatto l'Italia quindi scelse di rinunciare alla produzione di energia dal nucleare, mentre tutti i Paesi dell'Europa (tranne la Finlandia) congelarono qualsiasi piano di sviluppo del nucleare, pur lasciando attive le centrali già in funzione.

Le centrali nucleari attualmente in attività in Europa sono oltre 200; la Francia, che è il Paese con il maggior numero di impianti, ha registrato negli anni solamente pochi incidenti di minor conto mentre la Federazione Russa, che in termini numerici possiede circa la metà degli impianti della Francia, ha vissuto numerosi incidenti: il quadro generale suggerisce quindi una differenza significativa fra i livelli di sicurezza presenti

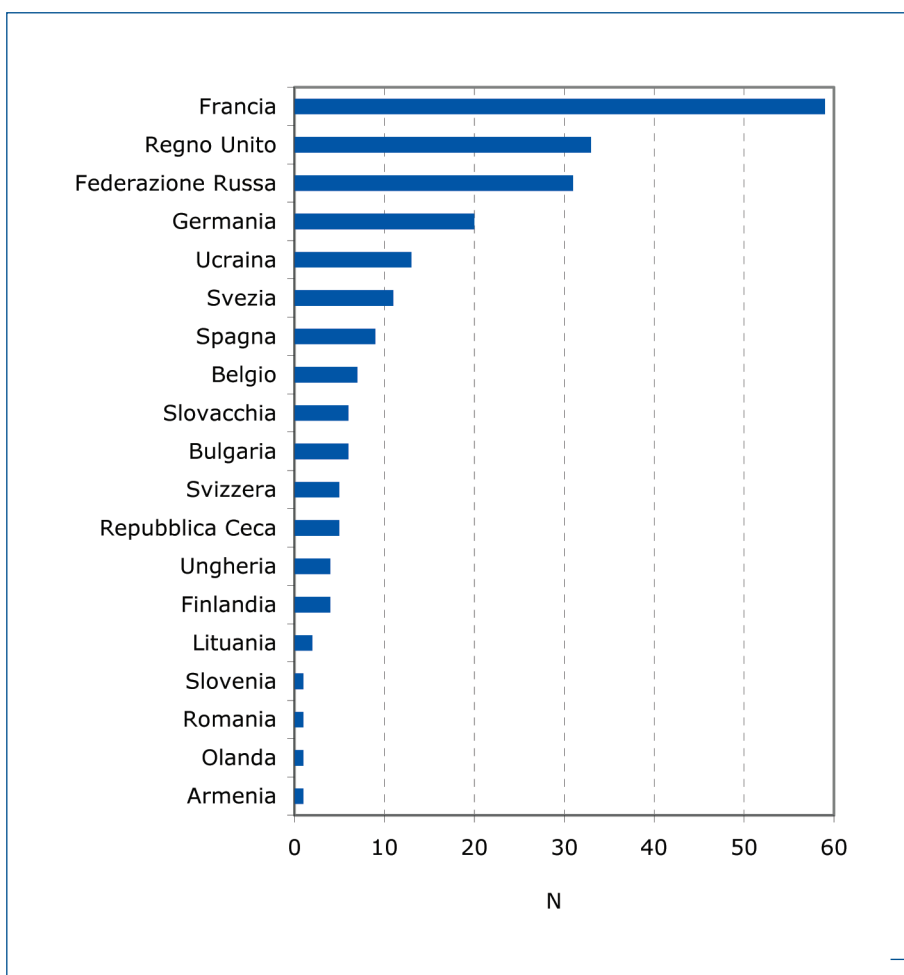


Figura 10.8 **Centrali nucleari di potenza in Europa – 2002**

Attualmente nel mondo sono attivi 435 impianti nucleari, con una capacità netta di potenza installata di 368.201 GW(e); altri 30 impianti sono in costruzione e 6 sono in via di dismissione. Gli acceleratori dedicati alla ricerca scientifica sono esclusi dal conteggio. Fonte: IAEA

nell'Europa orientale rispetto a quella occidentale.

In anni recenti la sicurezza delle centrali nucleari dell'Europa orientale è stata incrementata sicuramente grazie allo sviluppo di una specifica cultura, incoraggiato dalla collaborazione con gli scienziati dell'Europa occidentale.

Poiché lo sviluppo del nucleare per la produzione energetica in Europa è iniziato intorno agli anni '70, sta oggi emergendo il problema della presenza – in molti Paesi – di impianti giunti al limite della loro operatività per obsolescenza.

Il reattore numero 3 della centrale nucleare di Chernobyl – l'ultimo ancora in funzione – è stato spento nel 2000.

Figura 10.9 **Distribuzione per età delle centrali nucleari di potenza europee – 2002**

Nel periodo 2003-2006 in Europa si sono registrate 22 dismissioni di reattori – mirate agli impianti a più elevata obsolescenza – con una netta prevalenza di quelli operanti nel Regno Unito (14).

Informazioni strutturali ed operazionali sulle centrali nucleari di potenza di tutto il mondo sono riportate nel database PRIS (Power Reactor Information System) della International Atomic Energy Agency (IAEA).

Fonte: IAEA

