

## Api, polline, radioattività e inquinamento ambientale

Brini C.<sup>(\*)</sup>, Sala L.<sup>(\*)</sup>, Miglietta E.<sup>(\*)</sup>, Detoma P.<sup>(#)</sup>, Magnoni M.<sup>(§)</sup>, Bellina L.<sup>(§)</sup>,  
Bertino S.<sup>(§)</sup>, Bellotto B.<sup>(§)</sup>, Garbarino G.<sup>(§)</sup>, Ghione M.<sup>(§)</sup>, Scrofani M.<sup>(§)</sup>

<sup>(\*)</sup> Dirigente Veterinario emerito – Socio AIRP- P.za M. Graziola 9, 13853 Lessona (Bi) carlo.brini@gmail.com

<sup>(\*)</sup> ASL BI - Biella - Via dei Ponderanesi, 2 13875 Ponderano (BI). luca.sala@aslbi.piemonte.it

<sup>(#)</sup> Associazione Biellese Apicoltori- C.so Risorgimento 14, 13900 Biella (Bi) p.detoma@gmail.com

<sup>(§)</sup> Arpa Piemonte, Via Jervis 30, 10015 Ivrea (TO) [radiazioni.ionizzanti@arpa.piemonte.it](mailto:radiazioni.ionizzanti@arpa.piemonte.it)

### RIASSUNTO

*Le api (Apis mellifera) e i loro prodotti (miele, polline, propoli, cera) sono bioindicatori di inquinamento ambientale. Tra gli indicatori utilizzabili per rilevare il livello di radioattività ambientale presente nell'atmosfera un ruolo particolarmente interessante è costituito dal corpo delle api e dal polline, su cui si raccolgono le sostanze inquinanti presenti nell'aria.*

*Con il presente studio si propone l'utilizzo di un bioindicatore scarsamente considerato, per verificare in questa matrice gli attuali livelli di radioattività e misurare la concentrazione integrata nel tempo della radioattività ambientale di un dato territorio. Ciò anche per comprendere se la radioattività nel materiale vegetale delle aree contaminate può essere influenzata da eventi che la mobilizzano, come ad esempio gli incendi boschivi. In particolare nel periodo novembre 2015 – gennaio 2016 anche a causa di una perdurante inversione termica, una ventina di focolai hanno prodotto un pesante inquinamento, accompagnato da dispersione di polveri e, presumibilmente, dal rimescolamento di ceneri e micro e nanoparticelle, provenienti dalle aree dove era già stata riscontrata la presenza al suolo di radionuclidi, in particolare*

<sup>137</sup>Cs dovuti alle ricadute di Chernobyl.

*Per quanto riguarda le tecniche di misura della radioattività, oltre alla spettrometria gamma con rivelatori HPGe, impiegata per la misura <sup>137</sup>Cs, sono state eseguite, limitatamente ad alcuni campioni, alcune analisi radiochimiche (<sup>90</sup>Sr, <sup>239+240</sup>Pu). I risultati preliminari di questo studio confermano l'estrema sensibilità della matrice polline per la misura di tracce anche molto deboli di radioattività atmosferica.*

### INTRODUZIONE

Le api sono degli ottimi indicatori biologici perché manifestano il danno chimico dell'ambiente in cui vivono con due segnali: l'alta mortalità nel caso dei pesticidi e i residui che si possono individuare nel loro corpo o nei prodotti dell'alveare, nel caso degli antiparassitari e di altri agenti inquinanti come i metalli pesanti e i radionuclidi, rilevati tramite analisi di laboratorio (NRC 1991 – Porrini et al. 2002). Molte caratteristiche etologiche e morfologiche fanno dell'ape un buon rivelatore ecologico: è facile da allevare; è un organismo quasi ubiquitario; non ha grandi esigenze alimentari; ha il corpo relativamente coperto di peli che lo rendono particolarmente adatto a intercettare materiali e sostanze con cui entra in contatto; è altamente sensibile alla maggior parte dei prodotti antiparassitari che possono essere rilevati quando sono sparsi impropriamente nell'ambiente (per esempio durante la fioritura, in presenza di flora spontanea, in presenza di vento, ecc.); l'alto tasso di riproduzione e la durata della vita media, relativamente corta, causa una veloce e continua rigenerazione nell'alveare; ha un'elevata mobilità e un ampio raggio di volo (circa 3 km) che permette di controllare una vasta zona; effettua numerosi prelievi giornalieri; perlustra tutti i settori ambientali (terreno, vegetazione, acqua, aria); ha la capacità di riportare in alveare materiali esterni di varia natura e di immagazzinarli secondo criteri controllabili; ha necessità di costi di gestione estremamente contenuti, specialmente in rapporto al grande numero di campionamenti effettuabili. Come altri allevamenti animali soggetti a registrazione, anche gli apiari sono registrati presso i Servizi Veterinari delle AASSLL e georeferenziati. Tutti i dati confluiscono a livello centrale nella rete ARVET (Anagrafe Regionale Veterinaria), che è consultabile dagli Enti preposti in remoto, incrociando i dati con quelli di altre amministrazioni (Province, Protezione Civile, ecc.)

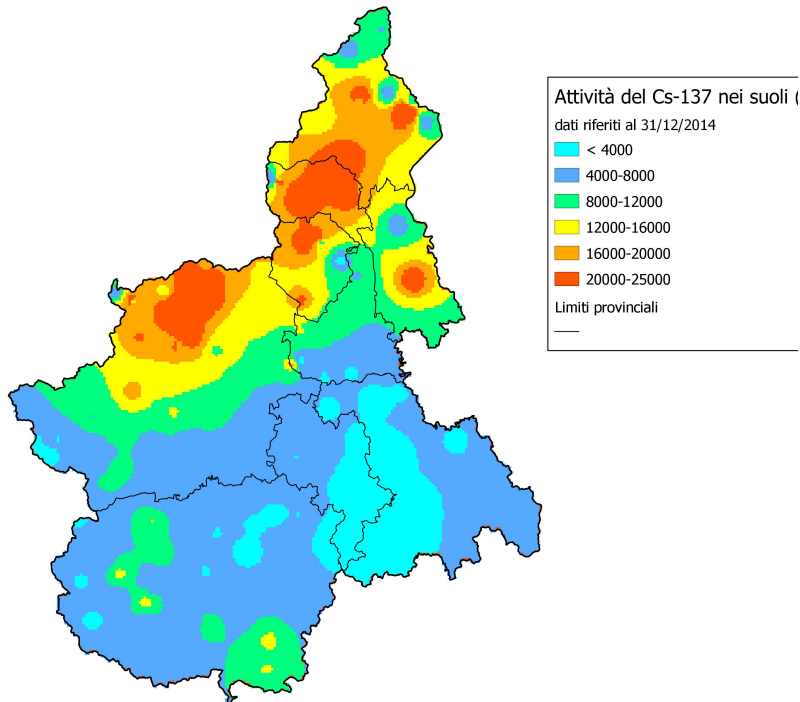
Numerosissime sono state, e continuano ad essere, le sperimentazioni condotte da molti autori con le api dopo Chernobyl, sia per quanto riguarda la valutazione degli elementi radioattivi contenuti nei prodotti dell'alveare e la loro dinamica di trasferimento, sia per l'impiego della colonia di api come indicatore biologico. Si è infatti potuto mettere in evidenza, analizzando campioni di miele, api, cera, polline, come quest'ultima matrice risulti la più adatta per indicare la contaminazione da radionuclidi in aria (Tonelli et al., 1990).

Tra gli indicatori utilizzabili per rilevare il livello di radioattività ambientale presente nell'atmosfera un ruolo particolarmente interessante è costituito dal corpo delle api, sul quale si raccolgono le

sostanze inquinanti presenti nell'aria e dal polline (Porrini et al, 2003). La raccolta di questo indicatore si può fare in maniera semplice ed economica, raccogliendo poche decine di grammi di residui di fondo arnia, costituiti da polline, rosicchiatura di opercoli di cera, frammenti di bozzoli, api morte e parti del loro corpo. Le percentuali sono variabili in base alla stagione: in inverno sono principalmente cera, nei periodi di forte importazione nell'alveare prevalentemente polline (Brini et al, 2009, 2011).

Precedenti studi hanno dimostrato che l'area biellese è stata contaminata in maniera apprezzabile dalle ricadute di Chernobyl (figura 1) e che alcuni indicatori quali il residuo di fondo arnia e polline presentano livelli di contaminazioni contenuti ma apprezzabili. (Brini et al, cit.). Il prelievo di questo materiale, che non ha alcun valore economico, è semplice e non richiede l'impiego di dispositivi appositi (Underbasket) come invece quello utilizzato per l'esclusivo prelievo di api morte.

Figura 1 – Mappa di deposizione al suolo di Cs-137



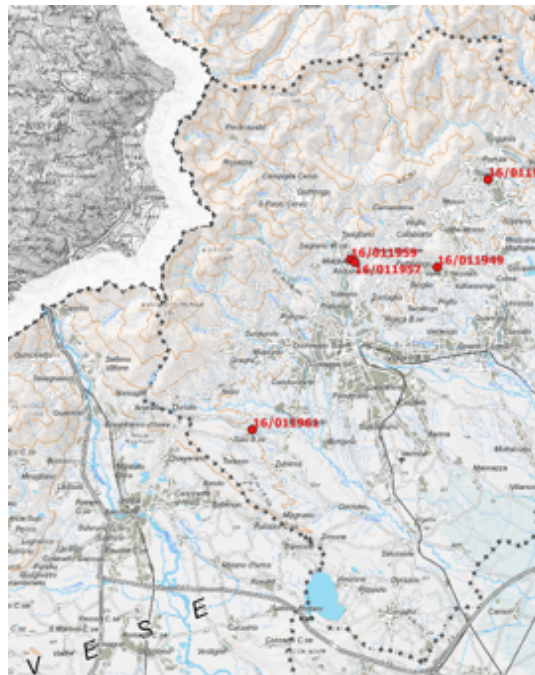
Con il presente studio si propone l'utilizzo di un bioindicatore scarsamente considerato per verificare gli attuali livelli di radioattività in questa matrice e misurare la concentrazione integrata nel tempo della radioattività ambientale in quel territorio anche per comprendere se la radioattività nel materiale vegetale delle aree contaminate può essere influenzata da eventi che la mobilitano, come ad esempio gli incendi boschivi. In particolare, anche a causa di una perdurante inversione termica, nel periodo novembre 2015 – gennaio 2016 circa una ventina di focolai hanno prodotto un pesante inquinamento, accompagnato da dispersione di polveri e, presumibilmente, dal rimescolamento di ceneri e micro e nanoparticelle, provenienti dalle aree dove era già stata riscontrata la presenza al suolo di radionuclidi dovuti alle ricadute di Chernobyl.

#### **MATERIALI E METODI**

Tra l'autunno 2015 e l'inverno 2016 sono stati prelevati in provincia di Biella 6 campioni di polline; i punti di campionamento sono riportati in figura 2. Grazie alle perduranti condizioni atmosferiche e alle temperature non particolarmente rigide, superiori in molte occasioni ai 16°C, temperatura al di sopra della quale gli insetti sono attivi, le api hanno bottinato il polline di erbe e piante che

fioriscono d'inverno: edera, avellano, graminacee spontanee, ecc. In questo modo il materiale prelevato per la presente ricerca è stato raccolto dalle api che uscivano in volo dopo la pausa invernale e non quello depositato l'anno precedente.

Figura 2 – Punti di campionamento dei pollini in provincia di Biella



I campioni sono stati analizzati in laboratorio con la tecnica della spettrometria gamma per determinare la concentrazione di attività dei principali radionuclidi gamma emettitori, in particolare il  $^{137}\text{Cs}$ . Su tre campioni, aventi concentrazioni di attività di  $^{137}\text{Cs}$  più alte, sono state eseguite analisi radiochimiche di approfondimento per la determinazione dell'eventuale presenza degli isotopi del plutonio e di stronzio.

Le analisi di spettrometria gamma sono state eseguite mediante due catene gamma-spettrometriche al germanio iperpuro tipo p – efficienza relativa maggiore al 90% – e tipo n – efficienza relativa del 40% (campo di misura 50 keV – 2,5 MeV), in pozzetto in piombo con spessore di 10 cm, analizzatori multicanale e software di analisi “Gamma – Vision” ORTEC.

Il metodo utilizzato per le separazioni radiochimiche permette, con gli opportuni accorgimenti, la determinazione degli isotopi del plutonio (Pu) e dello stronzio-90 a partire dallo stesso campione. Il metodo si basa sulla distruzione del campione calcinato mediante lisciviazione acida con acido nitrico e fluoridrico, portando i radioisotopi del Pu e lo  $^{90}\text{Sr}$  in soluzione. Successivamente si opera la riduzione del Pu con l'aggiunta di sodio nitrito; il Pu viene fissato su una resina anionica, mentre radionuclidi interferenti quali U, Th, Am, Fe vengono eluiti e scartati. Su questa soluzione di scarto può essere determinato lo  $^{90}\text{Sr}$ . Il Pu viene eluito con una soluzione di acido cloridrico e acido iodidrico; si effettua un ulteriore passaggio in colonna cromatografica utilizzando un letto di polietilene in polvere su cui viene fissato triottilfosfina ossido (TOPO), al fine di eliminare ulteriori tracce di uranio e altri radionuclidi. Il plutonio, isolato chimicamente, viene elettrodeposto e messo a contare.

La determinazione degli isotopi del Pu avviene mediante conteggio in condizione di vuoto spinto con la tecnica della spettrometria alfa ad alta risoluzione e rivelazione delle emissioni alfa principali degli isotopi del plutonio:  $^{238}\text{Pu}$  a 5499 keV,  $^{239}\text{Pu}$  a 5156 keV e  $^{240}\text{Pu}$  a 5168 keV (aventi rispettivamente la probabilità di emissione alfa pari a 71.6%, 73.2% e 73.5%).

La catena di misura alfa è composta da rivelatori al silicio ORTEC posizionati all'interno di camere

a vuoto, un amplificatore, un convertitore analogico digitale (ADC), una memoria multicanale (MCB) e il software di analisi AlphaVision.

La determinazione dello  $^{90}\text{Sr}$  viene eseguita indirettamente attraverso l' $^{90}\text{Y}$ , supponendo già raggiunta, in questa tipologia di campioni, la condizione di equilibrio secolare. La separazione dell' $^{90}\text{Y}$  nei campioni viene effettuata utilizzando un derivato organico dell'acido fosforico (HDEHP) che complessa selettivamente l' $^{90}\text{Y}$  in un determinato intervallo di pH e viene fissato su una fase solida. Mediante eluizioni e l'aggiunta di acido ossalico l'ittrio viene recuperato e poi fatto precipitare sotto forma di ossalato, filtrato e messo a contare.

La determinazione dello  $^{90}\text{Sr}$  avviene mediante conteggio dell' $^{90}\text{Y}$  utilizzando un contatore a basso fondo a flusso di gas dotato di dispositivo di anticoincidenza e di sottrazione del fondo. Viene effettuato un numero di cicli di misura sufficiente per seguire il decadimento dell'ittrio e si verifica che il decadimento sperimentale ottenuto sia compatibile con il decadimento teorico del solo  $^{90}\text{Y}$  confrontando i rispettivi tempi di dimezzamento.

La catena di misura beta è costituita da un contatore proporzionale a flusso di gas Berthold Technologies GMBH che permette il conteggio dello  $^{90}\text{Sr}$  opportunamente separato per via radiochimica.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

In tabella 1 sono riportati i risultati delle analisi di spettrometria gamma e delle determinazioni radiochimiche.

Tabella 1 – Risultati delle misure radiometriche

Id campione	Cs-137 (Bq/kg)	Incertezza Cs-137 (Bq/kg)	Pu-239/240 (Bq/kg)	Incertezza Pu-239/240 (Bq/kg)	Pu-238 (Bq/kg)	Incertezza Pu-238 (Bq/kg)	Sr-90 (Bq/kg)	Incertezza Sr-90 (Bq/kg)
16/011949	2,78	2,38	-	-	-	-	-	-
16/011952	< 14,82	-	-	-	-	-	-	-
16/011955	18,77	3,56	-	-	-	-	< 0,89	-
16/011957	5,13	1,87	0,00717	0,00425	< 0,0064	-	< 0,29	-
16/011959	6,57	1,53	< 0,0148	-	< 0,0148	-	< 0,39	-
16/011961	3,864	1,46	-	-	-	-	-	-

I valori di concentrazione di attività del  $^{137}\text{Cs}$  sono in linea con quelli tipici di aree contaminate dalle ricadute radioattive di Chernobyl e hanno lo stesso ordine di grandezza di altre matrici analoghe, come ad esempio il miele (La radioattività ambientale in Piemonte, Rapporto ARPA anni 2013 - 2014).

Più interessante è il risultato riguardante il plutonio: infatti, in un campione (numero 16/011957) sono state riscontrate deboli tracce di  $^{239+240}\text{Pu}$  (7,17 mBq/kg). Tale dato conferma in modo chiaro che la via di trasferimento più probabile della radioattività al polline sia effettivamente l'atmosfera. Infatti, i fattori di trasferimento FT suolo-vegetali per i radioisotopi del plutonio riportati in letteratura variano tipicamente tra i valori  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  e non sono compatibili con il dato osservato. Tenendo conto che la concentrazione di  $^{239+240}\text{Pu}$  nel suolo superficiale (0-5 cm) in Piemonte raggiunge valori attorno a 0,2-0,5 Bq/kg, ipotizzando per il polline un trasferimento del plutonio per via radicale si otterrebbe un range di valori di FT pari a  $1,4 \cdot 10^{-2}$  -  $3,6 \cdot 10^{-2}$ , del tutto irrealistici (2-3 ordini di grandezza superiori ai dati riportati in letteratura).

La presenza di queste deboli tracce di  $^{239+240}\text{Pu}$  nel campione di polline può essere spiegata più verosimilmente con fenomeni di risospensione delle particelle di suolo contaminate con i radioisotopi del plutonio derivanti dal global fallout (esplosioni nucleari in atmosfera durante la Guerra Fredda).

Tenendo conto che il fattore di risospensione dei radionuclidi artificiali presenti a livello territoriale è dato da:

$$K = \frac{C_{\text{aria}}}{I_{\text{suolo}}}$$

dove  $C_{\text{aria}}$  è la concentrazione in aria e  $I_{\text{suolo}}$  è la deposizione al suolo di un dato radionuclide.

La concentrazione di radioattività nel polline si può esprimere tramite la seguente relazione:

$$C_{\text{polline}} = \alpha \cdot K \cdot I_{\text{suolo}}$$

dove  $\alpha$  è un opportuno fattore che tiene conto della capacità del polline di intercettare la concentrazione di radioattività in atmosfera.

Dai dati sperimentali si può calcolare, a meno del fattore K che è una costante e che, in prima approssimazione, si può ritenere indipendente dal radioisotopo considerato, il valore di  $\alpha$  per il  $^{137}\text{Cs}$  e per il  $^{239+240}\text{Pu}$ . Assegnando quindi a K un valore pari a  $10^{-10} \text{ m}^{-1}$  (Magnoni et al, 2012) e supponendo allora un valore di  $I_{\text{suolo}}$  tipico per l'area in esame pari a  $15000 \text{ Bq/m}^2$  per il  $^{137}\text{Cs}$

(Facchinelli et al., 2001) e pari a circa  $15 \text{ Bq/m}^2$  per il  $^{239+240}\text{Pu}$ , si ottiene un valore  $\alpha_{\text{Cs-137}}$  pari a  $4,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{kg}$  (valore medio sui 5 dati del  $^{137}\text{Cs}$ ) e  $\alpha_{\text{Pu-239/240}}$  pari a  $4,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{kg}$ , sorprendentemente vicini tra loro. Si tratta ovviamente di stime affette da un grande incertezza, poiché si basano su estrapolazioni all'area in esame, in particolare per quanto riguarda il plutonio, di valori di deposizione misurati in aree adiacenti al biellese. Bisogna inoltre sottolineare il fatto dell'estrema esiguità dei dati a nostra disposizione. Tuttavia, anche tenendo conto di tutte queste importanti limitazioni, si può affermare che i risultati ottenuti sembrano confermare in modo consistente che la risospensione di particelle di suolo contaminate è la modalità con cui avviene la contaminazione del polline.

Lo scarso numero di dati a disposizione e soprattutto la mancanza di un confronto con altre aree impedisce al momento di affermare se la misura delle concentrazioni di  $^{137}\text{Cs}$  e per il  $^{239+240}\text{Pu}$  nei pollini possa essere fatta risalire ad alcuni episodi di incendi boschivi che per molti giorni, tra l'autunno 2015 e l'inverno 2016, hanno interessato aree alpine e collinari del Biellese (Osservatorio Meteorologico di Oropa, 2016) oppure se sia semplicemente riconducibile ad un normale processo di risospensione che agisce su una più vasta scala. In ogni caso, questo studio preliminare fornisce dati molto promettenti per il proficuo utilizzo di questa metodica nello studio dei bassi e bassissimi livelli di inquinanti radioattivi in atmosfera, molto difficilmente analizzabili con altre tecniche. La schematizzazione teorica proposta, che fa dipendere in maniera esplicita la concentrazione osservata nel polline dal fattore di risospensione, unitamente alla raccolta di nuovi dati potranno fornire sicuramente importanti elementi aggiuntivi.

## CONCLUSIONI

I campioni di polline analizzati si sono dimostrati una matrice interessante per effettuare alcune valutazioni sulla mobilitazione dal suolo, tramite risospensione, dei radionuclidi artificiali.

I valori di concentrazione di attività del  $^{137}\text{Cs}$  sono dello stesso ordine di grandezza di altre matrici analoghe (ad esempio miele) e sono tipici di aree contaminate dalle ricadute radioattive di Chernobyl. Su alcuni campioni di polline sono state fatte alcune analisi radiochimiche di approfondimento per la determinazione di radioisotopi del plutonio e  $^{90}\text{Sr}$ . In uno di questi campioni è stato possibile misurare deboli tracce di  $^{239+240}\text{Pu}$  e questo ha permesso di fare alcune considerazioni molto generali per spiegarne la presenza nel campione. Si ritiene, infatti, che la via di contaminazione non sia stato il trasferimento suolo-pianta mediante assorbimento radicale, ma la risospensione di particelle di suolo contaminate, che sono state intercettate dalle api durante le operazioni di raccolta del polline.

Al momento attuale questo studio, considerando il numero ridotto di dati analitici disponibili, è preliminare e in futuro necessita di ulteriori approfondimenti; è stato comunque possibile fare alcune considerazioni interessanti sui fenomeni di risospensione di particelle di suolo contaminate, che potranno essere in futuro oggetto di approfondimento mediante una base di dati analitici più ampia, anche sfruttando il semplice modello proposto che lega esplicitamente la presenza di radioattività nel polline al fattore di risospensione.

## BIBLIOGRAFIA

Brini C., Sala L., Magnoni M., Bellotto B., Bertino S., Ghione M., Serena E., Tripodi R., *Monitoraggio della radioattività in matrici e indicatori ambientali, prelevati nel territorio biellese (2006-2008)*, Atti del Quarto Convegno Nazionale: "Controllo ambientale degli Agenti Fisici: nuove prospettive e problematiche emergenti" – Vercelli, 24/26 settembre 2009.

[www.arpa.piemonte.gov.it/homepage/search?SearchableText=C.+Brini%2C+L.+Sala%2C+M.+Magnoni.+B.+Bellotto%2C+S.+Bertino%2C+M.+Ghione%2C+E.+Serena%2C+R.Tripodi++Monitoraggio+della+radioattività+in+matrici+e+indicatori+ambientali%2C+p+relevati+nel+territorio+biellese+%282006-2008](http://www.arpa.piemonte.gov.it/homepage/search?SearchableText=C.+Brini%2C+L.+Sala%2C+M.+Magnoni.+B.+Bellotto%2C+S.+Bertino%2C+M.+Ghione%2C+E.+Serena%2C+R.Tripodi++Monitoraggio+della+radioattività+in+matrici+e+indicatori+ambientali%2C+p+relevati+nel+territorio+biellese+%282006-2008)

Brini C., Sala L., Magnoni M., Bellotto B., Bertino S., Ghione M., Serena E., Tripodi R., *Monitoraggio della radioattività in matrici e indicatori ambientali, prelevati nel territorio biellese (2006 - 2010)*, Atti del Convegno Chernobyl 25 anni dopo: studi, riflessioni e attualità. Udine, 21-23 giugno 2011.

<http://www.arpa.fvg.it/cms/tema/radiazioni/news/Atti-del-convegno-su-Chernobyl.html>

Facchinelli A., Magnoni M., Gallini L., Bonifacio E.,  $^{137}\text{Cs}$  contamination from Chernobyl of soils in Piemonte (North-West Italy): spatial distribution and deposition model, *Water, Air and Soil Pollution*, 134: 341-352, 2002.

Magnoni M., Agnesod G., Faure Ragani M., Garavaglia M., Giovani C., Bucci S., Peroni I., Trotti F., Badalamenti P., Gadaleta G., *L'evoluzione temporale del fattore di risospensione per il  $^{137}\text{Cs}$  nel Centro-Nord Italia nel periodo 1987-2011: dati sperimentali e test di un nuovo modello teorico*, Atti del XXXV Congresso Nazionale di Radioprotezione, Venezia, 17-19 Ottobre 2012.

National Research Council, *Animals as Sentinels of Environmental Health Hazards*, NATIONAL ACADEMY PRESS, Washington D.C. 1991 – ISBN 0-309-04046-9.

Osservatorio meteorologico di Oropa (Biella)  
<http://www.osservatoriodioropa.it/meteoropa/notemeteo.txt>

Porrini C., Ghini S., Girotti S., Sabatini A.G., Gattavecchia E., Celli G., *Use of honey bees as bioindicators of environmental pollution in Italy*. In: Honey bees: Estimating the Environmental Impact of Chemicals (Devillers J. and Pham – Delègue M.H. Eds). Taylor & Francis, London, p. 186-247, 2002.  
<http://www.crcnetbase.com/isbn/978-0-415-27518-7>

Porrini C., Gloria Sabatini A., Girotti S., Ghini S., Medrzycki P., Grillenzoni F., Bortolotti L., Gattavecchia E., Celli G., *Honey Bees And Bee Products As Monitors Of The Environmental Contamination* - APIACTA 38 63-70, 2003.  
[https://www.researchgate.net/publication/228848146\\_Honey\\_bees\\_and\\_bee\\_products\\_as\\_monitors\\_of\\_the\\_environmental\\_contamination](https://www.researchgate.net/publication/228848146_Honey_bees_and_bee_products_as_monitors_of_the_environmental_contamination)

Tonelli D., Gattavecchia E., Ghini S., Porrini C., Celli G., Mercuri A. M., *Honeybees And Their Products As Indicators Of Environmental Radioactive Pollution* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles, Vol. 141, No.2 427-436, 1990.  
[https://www.researchgate.net/publication/226016056\\_Honey\\_bees\\_and\\_their\\_products\\_as\\_indicators\\_of\\_environmental\\_radioactive\\_pollution\\_J\\_Radioanal\\_Nucl\\_Chem\\_Artic](https://www.researchgate.net/publication/226016056_Honey_bees_and_their_products_as_indicators_of_environmental_radioactive_pollution_J_Radioanal_Nucl_Chem_Artic)

Magnoni M., Agnesod G., Garavaglia M., Giovani C., Bucci S., Peroni I., Trotti F., Badalamenti P., Gadaleta G., Sogni R.  
*L'evoluzione temporale del fattore di risospensione per il 137-Cs nel centro-nord Italia nel periodo 1987-2011: dati sperimentali e test di un nuovo modello teorico*  
XXXV Congresso Nazionale di Radioprotezione - Venezia 2012 ISBN 978-88-88648-35-4