



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI ECONOMIA “GIORGIO FUÀ”

---

Corso di Laurea Magistrale in Management della sostenibilità ed economia circolare

**Sostenibilità e terreno: un’analisi critica del  
problema della diossina e nuove possibilità**

Relatore: Chiar.ma

Tesi di Laurea di: Martina Toffanin

Prof.ssa Mariacristina Zarro

Correlatore: Chiar.mo

Prof. Giorgio Murri

Anno Accademico 2023 – 2024

# Indice

Introduzione 5

Parte prima

|   |          |
|---|----------|
| <b>Il problema delle diossine</b>   | <b>9</b> |
| 1.1 Diossine e furani: cosa sono  | 10       |
| 1.2 I PCB: cosa sono  | 16       |
| 1.3 Perché preoccuparci?  | 18       |
| 1.3.1 Ingresso nella catena alimentare  | 21       |
| 1.3.2 Effetti sull'uomo e sugli organismi   | 21       |
| 1.3.3 Come avviene la contaminazione umana da diossine  | 24       |
| 1.3.4 Come si misura la tossicità   | 25       |
| 1.4 La situazione in Italia   | 27       |
| 1.4.1 Diossine, furani e PCB in Veneto  | 27       |
| 1.4.2 Diossine, furani e PCB a Taranto, in Puglia   | 33       |
| 1.5 Esempi di contaminazione da diossine, furani e PCB riscontrata<br>nei prodotti alimentari | 35       |
| 1.5.1 Un focus sul territorio di Forlì, Emilia-Romagna  | 35       |
| 1.5.2 Inquinamento sul latte bovino in una valle piemontese                                   | 38       |

---

Parte seconda

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Gli incidenti più rilevanti e la<br/>normativa comunitaria e internazionale</b>   | <b>39</b> |
| 2.1 Gli incidenti e le contaminazioni da diossine più dannose<br>per la salute per la salute umana e ambientale e la normativa vigente | 40        |
| 2.1.1 Incidente a Seveso, Italia (1976) e conseguente<br>Direttiva Seveso (1982)   | 41        |
| 2.1.2 Incidente in Vietnam (1963-1975)   | 50        |
| 2.1.3 Convenzione di Basilea (1989)  | 52        |
| 2.1.4 Convenzione di Oskar (1998)  | 54        |
| 2.1.5 Convenzione di Stoccolma (2001)  | 56        |
| 2.2 Limiti alle diossine secondo l'Unione Europea e recepimenti italiani   | 58        |
| 2.3 Diossine e casi di attualità   | 66        |

---

Parte terza

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Nuove alternative di bonifiche: un focus sui lombrichi come possibilità per il biorisanamento del suolo</b> | <b>70</b> |
| 3. Un breve excursus sulle tecniche fisiche di bonifica e il biorisanamento                                    | 71        |
| 3.1 Bonifica Seveso – metodo fisico ex-situ  | 75        |
| 3.2 Bonifica tramite microrganismi   | 76        |
| 3.2.1 Un’alternativa di bonifica biologica in-situ in Svizzera   | 80        |
| 3.2.2 Un nuovo progetto di bonifica di sedimenti marini  | 82        |
| 3.3 I lombrichi come nuova possibilità per il biorisanamento del suolo   | 87        |
| 3.3.1 I lombrichi applicati per decontaminare terreni contenenti metalli pesanti                               | 92        |
| 3.3.2 L’uso dei lombrichi per la bonifica di terreni inquinati da antibiotici                                  | 94        |
| 3.3.3 L’uso dei lombrichi per la decontaminazione di terreni inquinati da diossine e PCB                       | 96        |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| Conclusioni                | 104 |
| Bibliografia e riferimenti | 108 |

## **INTRODUZIONE**

Questo studio si propone di analizzare due inquinanti del suolo presenti, sfortunatamente, in quasi tutto il mondo e soprattutto nei Paesi in via di sviluppo: le diossine e i furani (PCDD/F) e i PCB, nello specifico i PCBdl ossia policlorobifenili “dioxin like”, composti molto simili alle diossine in termini di proprietà fisico-chimiche e tossicologiche.

L'interesse per questo argomento è nato in me durante lo studio, in quest'ultimo anno di laurea magistrale, dell'importanza del suolo per la salute umana e nel complesso per il benessere e la prosecuzione della vita di tutto il nostro pianeta. A causa dell'attuale sviluppo industriale e dell'urbanizzazione, la superficie terrestre disponibile pro capite si sta riducendo e la qualità del suolo si sta deteriorando. Inoltre, ho scelto di effettuare un focus sull'inquinamento da diossine perché purtroppo sono presenti moltissimi casi in tutta Italia di terreni inquinati da questi composti. Questi contaminanti hanno causato e causano tuttora molti effetti negativi sulla salute umana delle persone che vivono nelle zone limitrofe e non solo. Inoltre, le azioni di bonifica rappresentano un costo non trascurabile sia dal punto di vista economico sia per l'ambiente in termini di possibile inquinamento e impatto ambientale, se vengono considerate emissioni di CO<sub>2</sub>, impiego di energia e rischio di rilascio di questi inquinanti nell'ambiente durante l'attività di risanamento.

Dall'interesse per questi argomenti, i risultati che derivano dalle diverse azioni antropiche come quella produttiva, la coltivazione, l'allevamento o l'incendio di svariati materiali e le conseguenti patologie che provoca nell'uomo, mi sono chiesta come fosse possibile aumentare la sensibilizzazione su questo tema, cosa negli anni le istituzioni avessero fatto per arginare e ridurre il problema e quali nuove scoperte in termini di bonifiche e biorisanamento fossero possibili per questi terreni.

L'obiettivo della mia tesi è quello di mettere in luce dapprima gli elementi fondamentali dell'inquinamento da diossine: le malattie che ne conseguono e la successiva perdita di una risorsa importante e fondamentale come quella del suolo. Nel primo capitolo infatti verranno introdotti e spiegati nello specifico che cosa sono queste sostanze e perché dobbiamo preoccuparci della loro presenza nell'ambiente e soprattutto nel suolo. I paragrafi successivi evidenziano come questi composti entrano nella catena alimentare, raggiungono gli organismi viventi e gli effetti negativi che hanno su quest'ultimi. Infine, il primo capitolo si conclude con un dettaglio sulla situazione in Italia e nello specifico nelle regioni del Veneto e della Puglia, e con alcuni esempi di contaminazione in diversi cibi.

Successivamente, nel secondo capitolo, mi sono concentrata su quello che finora è stato fatto per limitare gli incidenti e i danni già accaduti negli anni e prevenire quelli futuri in termini di legislazione e normative intraprese a livello internazionale, europeo e italiano. In particolare, si denoteranno anche le difficoltà

nel recepimento da parte dell'Italia di alcune normative e accordi internazionali fondamentali per limitare le conseguenze da inquinamento da diossine. Il secondo capitolo offre anche una sintesi di alcuni incidenti più gravi accaduti nel mondo a causa del rilascio di diossine. Infine, l'ultimo paragrafo introduce alcuni esempi più attuali di casi di contaminazione da diossine.

Per concludere, l'ultima parte del mio lavoro ossia il terzo capitolo, dopo un breve excursus sul funzionamento delle tecniche fisiche di bonifica di terreni inquinati e il biorisanamento, ho deciso di dedicarlo a nuove frontiere e possibilità di bonifiche e in particolare al biorisanamento biologico di diversi siti inquinati dai suddetti contaminanti. Gli ultimi paragrafi sono dedicati ai lombrichi come nuova possibilità di bonifica biologica di siti contaminati. Nello specifico, sono stati analizzati le applicazioni a metalli pesanti, antibiotici e ovviamente diossine e PCB.

Questi ultimi paragrafi vogliono sottolineare la presenza già esistente di nuove possibilità e allo stesso tempo sensibilizzare la comunità anche non scientifica all'importanza dello sviluppo e dell'investimento per nuovi studi e progetti. Quest'ultimi potrebbero riuscire ad aiutarci a mantenere intatta e fertile una risorsa indispensabile come quella del suolo e a ridurre l'inquinamento e l'impatto di bonifiche svolte con metodi più tradizionali.

Le conclusioni mettono in luce come il problema dell'inquinamento da diossine, sebbene sia stato negli anni affrontato e analizzato da diverse Nazioni e

organizzazioni internazionali, non sia ancora stato totalmente risolto. Inoltre, è importante sottolineare come non ci sia una soluzione univoca per tutti i siti inquinati, come si può notare dal nuovo progetto “Life Sedremed” applicato ad un sito marino inquinato e introdotto nel terzo capitolo. Sono quindi necessari ancora investimenti in questo ambito con ulteriori studi e applicazioni ma soprattutto è ancora necessario sensibilizzare la comunità alle conseguenze negative che questi inquinanti hanno per la salute non solo umana ma del pianeta in generale. Per questo, l’incendio doloso di rifiuti di vario tipo non è da ritenersi, da parte della popolazione e da chi lo compie, un comportamento scorretto solo perché vietato dalla legge ma dovrebbe essere ritenuto dannoso perché lesivo della salute propria e altrui, oltre che dell’ambiente. Nell’ultima parte del lavoro dedicata alle conclusioni si possono analizzare più nel dettaglio ciò che è emerso da questo lavoro di approfondimento e revisione.

È necessario far presente che ulteriori studi e approfondimenti si potrebbero aggiungere a questo lavoro di tesi. Inoltre, nuove ricerche e studi affrontati dagli esperti in questi anni porteranno sicuramente a nuove scoperte e possibilità. Saranno necessari, di conseguenza, una revisione e un ampliamento degli studi qui presentati e analizzati.

Parte prima

## **Il problema delle diossine**

## 1.1 DIOSSINE E FURANI: COSA SONO

Le diossine vengono definite come POPs, Persistent Organic Pollutants, e rappresentano un gruppo di duecentodieci composti chimici aromatici policlorurati. Nello specifico, queste sostanze sono composte da carbonio, idrogeno, ossigeno e cloro e sono riconosciute dalle sigle PCDD e PCDF. Esistono, quindi, due famiglie diverse di composti, rispettivamente quella composta dalle dibenzo-p-diossine (le cosiddette diossine) e quella dei dibenzo-p-furani (o furani). Esistono in totale 75 specie di diossine e 135 di furani, di cui solo 17 (7 PCDD e 10 PCDF) sono preoccupanti dal punto di vista tossicologico.

La struttura della diossina è costituita da due anelli benzenici collegati da un atomo di ossigeno. Per le PCDD, l'anello aromatico è collegato da due atomi di ossigeno, mentre per i PCDF l'anello è collegato da un legame di carbonio e da un anello di ossigeno, come si può osservare dalla figura 1 qui sotto<sup>1</sup>.

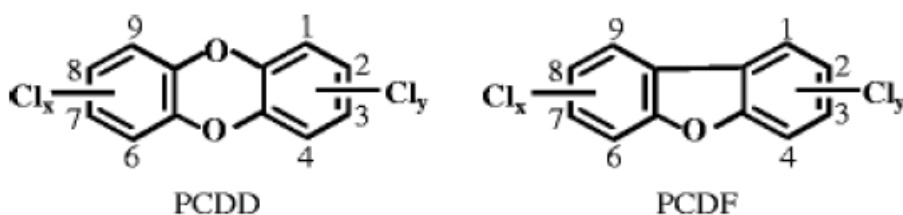


Figura 1- Formula chimica di PCDD e PCDF.

<sup>1</sup> Priyanka Mary Sebastian and K. V. Bhaskara Rao, *Approaches in Bioremediation of Dioxins and Dioxin-Like Compounds – A Review on Current*

Da questo momento in poi, ogni qual volta verrà utilizzato il termine “diossine” si intenderà l’insieme di diossine e furani.

La tossicità delle diossine dipende dal numero e dalla posizione (alpha o beta) degli atomi di cloro sull’anello aromatico. I 17 congeneri sopraindicati sono i più tossici perché possono avere atomi di cloro nelle posizioni 2, 3, 7 e 8 (almeno) dell’anello benzenico, in particolare la tetracloro-dibenzo-p-diossina (TCDD), formula bruta  $C_{12}H_4Cl_4O_2$ , è la specie maggiormente tossica e riconosciuta come possibile cancerogena per l’uomo poiché contiene 4 atomi di cloro nelle posizioni beta. Al contrario, la diossina OCDD per esempio, ossia l’octaclorodibenzo-p-diossina, nonostante i suoi ben 8 atomi di cloro, ha tossicità bassa poiché presenti in posizione alpha.

Queste molecole sono insolubili in acqua, altamente liposolubili e molto resistenti alla degradazione chimica e biologica. Le diossine non vengono prodotte deliberatamente ma sono sottoprodotti derivanti da processi industriali come la produzione delle plastiche, di composti chimici, della carta o degli oli combustibili; da processi naturali di combustione come gli incendi di foreste; da attività antropiche come l’incenerimento di rifiuti contenenti materiali come plastiche, termoplastiche, termoindurenti o di reflui e rifiuti contenenti composti

---

*and Future Prospects, Nature Environment and Pollution Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1381-1387, 2022.

clorurati. Questi processi sono stati individuati e riconosciuti come “sorgenti primarie”. Le diossine come output dei processi chimici diventano spesso l’input nei processi termici.

I processi di combustione si possono poi ulteriormente distinguere in combustioni incontrollate, tra cui incendi accidentali all’aperto di materiali quali rifiuti urbani, per esempio, incendi boschivi che prevedono la combustione di lignina e cellulosa ed eruzioni vulcaniche; combustioni volontarie di rifiuti solidi urbani o di fanghi, carburante o altri combustibili nei processi di fusione dei metalli di produzione del cemento; altre combustioni volontarie per la produzione di energia nei trasporti per esempio, vedi figura 2<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Priyanka Mary Sebastian and K. V. Bhaskara Rao, *Approaches in Bioremediation of Dioxins and Dioxin-Like Compounds – A Review on Current and Future Prospects*, *Nature Environment and Pollution Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1381-1387, 2022.



Figura 2 - Maggiori fonti di diossina nell'ambiente

Le diossine una volta nell'ambiente si accumulano nel suolo e in diversi sedimenti come quello marino e si bioaccumulano in prodotti alimentari come latte e vegetali a foglia larga, o in organismi come fauna ittica ed erbivori. Questa è la fase in cui le diossine sono chiamate "sorgenti secondarie". Le sostanze che una volta bruciate producono diossine sono chiamate invece "precursori" mentre quelle che presentano residui di diossine a causa del processo produttivo sono chiamate "riserve". Quest'ultime sono capaci di rilasciare diossine nell'ambiente e contaminarlo in base alle attività antropiche che le impiegano. Dei precursori,

per esempio, fanno parte le cloroparaffine negli oli usati, il cloro inorganico e le termoplastiche, utilizzati nell'industria della plastica, del cuoio, della pelle o di fitofarmaci. Tra i prodotti precursori particolare rilevanza assumono le materie plastiche, termoplastiche e termoindurenti. Quest'ultime, in particolare, durante la produzione vengono lavorate ad alte temperature e tendono ad inglobare le diossine e a liberarle poi durante una successiva combustione del materiale. Delle riserve invece fanno parte i composti clorofenossilici, composti intermedi di sintesi per i disinfettanti (esaclorofene), il polistirene o polistirolo.

È doveroso però far presente che dal 1990 in poi, i nuovi processi industriali, le nuove metodologie di incenerimento di rifiuti e un aggiornamento e irrigidimento della normativa hanno abbassato l'emissione di queste sostanze. In particolare, diversi studi e organizzazioni dimostrano come a partire dagli anni '90 i livelli di concentrazione di diossine siano diminuiti di molto, con bilanci addirittura in negativo per quanto riguarda alcuni inceneritori, grazie proprio al fatto che quest'ultimi di nuova generazione adottano delle metodologie di incenerimento e di riduzione delle emissioni più efficienti<sup>3</sup>. È necessario però comunque effettuare studi ambientali, controllare e localizzare le fonti di emissione delle diossine, individuare le catene alimentari critiche per

---

<sup>3</sup> Tirler, Palmitano, Raccanelli, *Inceneritori e diossina: evoluzione dei sistemi di abbattimento e di monitoraggio delle emissioni*, 2017

l'uomo o per gli animali e mettere in atto azioni mitigative o contenitive e gestirne quindi l'impatto ambientale e sulla salute umana.

Secondo i dati ISPRA del 2022, l'unico campo in cui le emissioni di diossina non si sono ridotte di molto ma anzi sono aumentate è quello dei processi produttivi, come indica la tabella 1. Nel 2022 le emissioni di diossine e furani derivano per il 33% dai processi di combustione non industriale, per il 27% dai processi produttivi, dal settore dei rifiuti per il 17%, per il 20% dai processi di combustione nell'industria e per quote minori dal settore del trasporto stradale (3%) e dai processi di combustione per la produzione di energia (2%)<sup>4</sup>. Per quanto riguarda il suolo, l'apporto maggiore della contaminazione deriva dai fitofarmaci e dagli incendi dolosi.

| Diossine e Furani | 2003         | 2004         | 2005         | 2006         | 2007         | 2008         | 2009         | 2010         | 2011         | 2012         | 2013         | 2014         | 2015         | 2016         | 2017         | 2018         | 2019         | 2020         | 2021         | 2022         |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                   | gi-Teq/a     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| A                 | 20,6         | 16,6         | 14,0         | 13,9         | 11,7         | 10,7         | 9,4          | 8,2          | 7,6          | 7,8          | 6,7          | 6,6          | 6,2          | 5,8          | 5,3          | 4,7          | 4,2          | 4,0          | 4,1          | 5,0          |
| B                 | 83,8         | 55,6         | 87,0         | 99,8         | 134,5        | 152,6        | 146,2        | 134,6        | 87,4         | 122,5        | 122,6        | 105,9        | 112,4        | 108,9        | 118,4        | 103,7        | 101,7        | 96,4         | 108,5        | 99,4         |
| C                 | 104,2        | 104,6        | 118,7        | 118,0        | 124,5        | 117,9        | 66,2         | 65,3         | 65,8         | 54,0         | 54,1         | 57,7         | 58,2         | 59,1         | 59,8         | 55,9         | 57,0         | 47,1         | 61,8         | 59,3         |
| D                 | 75,8         | 79,6         | 78,6         | 87,8         | 88,7         | 87,4         | 62,3         | 76,2         | 83,6         | 79,7         | 76,8         | 76,5         | 76,8         | 78,8         | 86,1         | 88,9         | 84,5         | 75,7         | 90,9         | 81,0         |
| G                 | 20,3         | 21,5         | 21,4         | 22,8         | 23,1         | 22,7         | 21,7         | 20,6         | 18,8         | 16,3         | 15,8         | 15,7         | 14,3         | 13,0         | 11,7         | 10,2         | 9,4          | 6,9          | 7,4          | 7,9          |
| H                 | 1,4          | 1,6          | 1,5          | 1,5          | 1,4          | 1,4          | 1,4          | 1,2          | 1,2          | 1,1          | 1,0          | 1,0          | 1,0          | 1,1          | 1,0          | 1,1          | 1,1          | 1,1          | 1,0          | 1,0          |
| I                 | 38,9         | 40,7         | 40,1         | 35,3         | 35,5         | 36,0         | 35,8         | 35,7         | 41,0         | 41,2         | 40,8         | 40,4         | 41,1         | 45,4         | 48,1         | 46,7         | 48,8         | 48,8         | 51,7         | 50,3         |
| L                 | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          | 0,1          |
| <b>TOTALE</b>     | <b>345,3</b> | <b>320,4</b> | <b>361,4</b> | <b>379,2</b> | <b>419,5</b> | <b>428,7</b> | <b>343,1</b> | <b>341,7</b> | <b>305,6</b> | <b>322,7</b> | <b>317,8</b> | <b>304,0</b> | <b>310,1</b> | <b>312,1</b> | <b>330,5</b> | <b>311,3</b> | <b>306,7</b> | <b>280,0</b> | <b>325,4</b> | <b>304,0</b> |

Tabella 1

A: Combustione energia e industria di trasformazione; B: Combustione non industriale; C: Combustione industriale; D: Processi produttivi; F: Uso di solventi; G: Trasporti stradali; H: Altre sorgenti mobili; I: Trattamento

<sup>4</sup> ISPRA, Banca dati indicatori ambientali, 2022.

## 1.2 I PCB: COSA SONO

I policlorobifenili (PCB) sono composti aromatici biciclici costituiti da molecole di bifenile variamente clorate, vedi figura 3<sup>5</sup>.

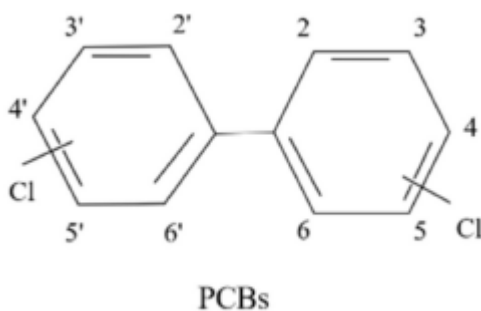


Figura 3 - Struttura chimica PCB

Essi sono composti chimici molto stabili, poco solubili in acqua ma al contrario molto solubili in olio e solventi organici quali alcol e acetone, sono resistenti alla fotodegradazione, non sono ossidabili e non sono infiammabili se la molecola contiene più di 4 atomi di cloro, evaporano ad oltre 800 °C e si decompongono solo oltre i 1000 °C. Sono poco volatili e scarsamente biodegradabili e si spandono su superfici formando sottili pellicole. Come i PCDD e i PCDF, anche i PCB sono stati inclusi nella Convenzione di Stoccolma sui POPs (UNEP<sup>6</sup>, 2001) e nel Protocollo sui POPs all'interno della Convenzione sull'inquinamento atmosferico

---

<sup>5</sup> Nhung, N.T.H. et al., *A Review of Soil Contaminated with Dioxins and Biodegradation Technologies: Current Status and Future Prospects*. *Toxics* 2022, 10, 278. <https://doi.org/10.3390/toxics10060278>

<sup>6</sup> UN Environment Programme

transfrontaliero (UNECE, 1998), come verrà approfondito nel secondo capitolo. I PCB sono molecole che, a differenza delle diossine che venivano prodotte inevitabilmente come sottoprodotti, sono state prodotte deliberatamente a partire dal 1930 in diversi processi produttivi industriali. Venivano particolarmente impiegati in sistemi chiusi quali trasformatori di apparecchiature elettriche e di conseguenza la contaminazione ambientale è riconducibile a perdite, incendi, scarichi illeciti e smaltimento inadeguato; o in sistemi aperti come additivi per antiparassitari, ritardanti di fiamma, isolanti, vernici, ecc. e quindi le principali fonti di contaminazione ambientale sono le discariche, la migrazione di particelle e l'emissione in atmosfera a seguito di evaporazione. In generale, possiamo concludere che troviamo questi composti nell'ambiente a causa del rilascio da parte di vecchi prodotti o apparecchi non correttamente smaltiti, in plastiche, edifici o in sedimenti, tra cui quelli marini e fluviali, dove si sono accumulati nel corso degli anni.

Attualmente, a partire dal 1985, queste molecole sono state bandite in molti Paesi a causa della loro tossicità e della loro tendenza a bioaccumularsi. Questi composti vengono spesso trattati insieme alle diossine per la somiglianza delle loro proprietà tossicologiche e caratteristiche chimico-fisiche. Infatti, 12 specie su 209, chiamati coplanari, vengono definiti PCB dioxin-like (cioè simili alle diossine) e indicati con la sigla PCBdl. Inoltre, gli effetti dei PCBdl sulla salute

umana e sugli organismi sono analoghi a quelli che andremo ad evidenziare per le diossine<sup>7</sup>.

### **1.3 PERCHE' PREOCCUPARCI?**

Diossine e furani sono composti particolarmente stabili e tossici sia per l'ambiente sia per l'uomo e gli animali; infatti, costituiscono due delle dodici classi di inquinanti organici persistenti e riconosciuti a livello internazionale dall'UNEP, organizzazione internazionale per la tutela ambientale. La TCDD, in particolare, è stata riconosciuta come agente cancerogeno multi-sito per l'uomo e classificata nel gruppo 1 dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro<sup>8</sup>, ossia nel raggruppamento dei carcinogeni umani certi.

Queste due famiglie di composti, diossine e furani, hanno anche una vita media considerevole nel corpo umano che va dai 5,8 anni ai 11,3 anni e non è quindi semplice l'eliminazione o la degradazione di questo tipo di sostanze. Le diossine rappresentano un inquinamento cronico in diverse aree e regioni ambientali e riescono ad entrare a far parte, anche con concentrazioni particolarmente elevate, di diverse catene alimentari. Queste sostanze si spostano

---

<sup>7</sup> Arpav Veneto, *Monitoraggio di PCDD, PCDF, PCBdl, IPA*, Padova, 2022

<sup>8</sup> IARC, 1997, Volume 69.

fisicamente dall'atmosfera al terreno tramite deposizione umida quindi tramite precipitazioni, deposizione secca di particolato ossia caduta gravitazionale delle particelle, ed infine deposizione secca della fase vapore, cioè assorbimento di queste sostanze in fase vapore dalla flora. Il suolo e i vegetali ricevono gli inquinanti ambientali attraverso diverse vie, tra cui la volatilizzazione dal suolo verso le piante, la deposizione atmosferica direttamente sulle foglie dei vegetali, lo spandimento di fanghi e compost, lo spandimento di sedimenti provenienti da esondazioni, l'erosione da aree contaminate nelle vicinanze, l'assorbimento radicale quindi tramite le radici. La concentrazione totale di inquinante presente nelle piante viene calcolata come somma di contaminante assorbito attraverso tutti questi meccanismi. Nel terreno, le diossine si legano alla parte organica contenuta in esso e rimangono abbastanza immobili, poiché sono insolubili in acqua e non possono quindi arrivare in profondità. I suoli sono quindi, sfortunatamente, dei buoni recettori naturali per le diossine e, a causa della difficile rimozione e del lungo periodo di emivita, rappresentano una tipica matrice accumulatrice. Le diossine riescono comunque a diffondersi tramite l'acqua grazie alle particelle minerali e organiche presenti e a cui si legano e a raggiungere quindi anche luoghi lontani dalla sorgente di emissione. Vengono infatti trasportate da correnti atmosferiche, fiumi e correnti marine.

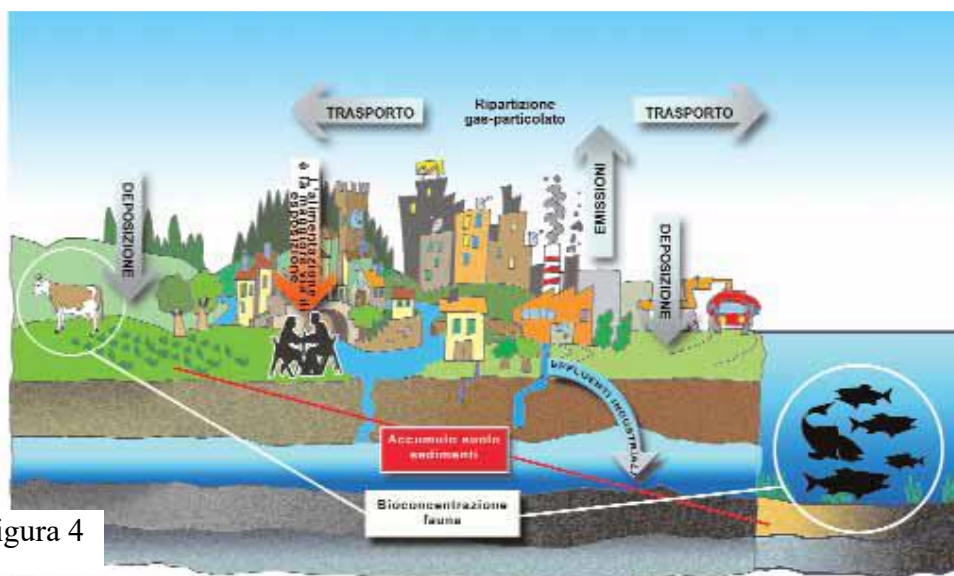


Figura 4

L' ambiente acquatico, quindi, riceve le PCDD/F attraverso deposizione atmosferica, immissione di reflui industriali e dilavamento di suoli contaminati. Dalle regioni idriche, le diossine possono poi volatilizzare e quindi rientrare in atmosfera, adsorbirsi ai sedimenti o bioaccumularsi negli organismi. Le diossine, essendo sostanze persistenti e liposolubili, riescono ad entrare a far parte della catena alimentare e si accumulano nel tempo negli organismi viventi e in particolare nei loro tessuti e organi adiposi, come andremo ad evidenziare nel prossimo paragrafo (figura 4)<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> APAT, *Diossine Furani e PCB*, 2006.

### **1.3.1 INGRESSO NELLA CATENA ALIMENTARE**

Fino ad oggi, la modalità di ingresso delle diossine nella catena alimentare è la deposizione atmosferica in fase di vapore sul suolo e sulle foglie delle piante, le quali vengono ingerite dagli animali da cui derivano prodotti di cui l'uomo, ultimo anello della catena alimentare, si nutre.

Essendo liposolubili, le diossine si accumulano sui tessuti grassi degli animali e soprattutto nei grassi dei prodotti derivati come latte e carni. Per quanto riguarda l'ingresso delle diossine in ambiente acquatico, questo avviene tramite il particolato che raggiunge l'acqua, per esempio, tramite erosione o scarichi. Queste diossine vengono poi assunte dagli organismi acquatici, in maniera tanto maggiore quanto più la componente grassa di quest'ultimi è alta. Tutti gli organismi viventi, quindi, hanno accumulato e accumulano nel tempo una certa quantità di diossine, che dipende dalle abitudini alimentari, dalle caratteristiche dell'ambiente e dalle caratteristiche fisiche.

### **1.3.2 EFFETTI SULL'UOMO E SUGLI ORGANISMI**

Gli effetti più noti attualmente di questi inquinanti sull'uomo sono patologie che derivano da esposizioni importanti professionali o a seguito di eventi incidentali. La prima manifestazione clinica e patologica legata alla tossicità delle diossine è la

cloracne. Venne individuata per la prima volta nel 1897 e fu riconosciuto il rischio maggiore di contrarla per lavoratori impiegati nella produzione dei primi fitofarmaci o per quelli impegnati nella sintesi di policlorobifenili (PCB). I sintomi che si manifestano con questa malattia sono eruzioni cutanee simili all'acne estese a tutto il corpo e che si protraggono, nei casi più difficili, addirittura per anni. Inoltre, diversi studi effettuati su animali e sull'essere umano evidenziano un'alterazione del sistema immunitario come conseguenza della contaminazione da dosi anche basse di diossine. Un esempio è la riduzione e il danneggiamento dei linfociti, cellule del sangue appartenenti ai globuli bianchi che si occupano di difendere l'organismo da corpi estranei pericolosi, producendo anticorpi (linfociti B) e distruggendo cellule infette o estranee all'organismo (linfociti T). Ulteriori ricerche hanno sottolineato inoltre come le diossine possano danneggiare il feto al momento della differenziazione tissutale del sistema immunitario, così da provocare alterazioni a lungo termine sia in senso immunodepressivo sia ipersensibilizzante.

Le diossine hanno inoltre effetti sul sistema endocrino, infatti vanno ad interferire con la produzione, il rilascio, il trasporto, la metabolizzazione, il legame, l'azione e l'eliminazione degli ormoni prodotti dal corpo. Gli ormoni sul nostro corpo umano sono responsabili dell'omeostasi, ossia del mantenimento delle condizioni ottimali degli organi e di tutto l'ambiente interno del nostro organismo. Inoltre,

agiscono anche in risposta a cambiamenti ambientali esterni e regolano i processi produttivi e di sviluppo del corpo umano.

In particolare, nei feti contaminati da diossina sono stati evidenziati anche effetti negativi sullo sviluppo del sistema nervoso, sulla neurobiologia del comportamento e sull'equilibrio ormonale della tiroide<sup>10</sup>.

Occorre invece dare risalto agli effetti della TCDD, riconosciuta come agente cancerogeno multi-sito per l'uomo e classificata nel gruppo 1 dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro<sup>11</sup>. All'esposizione alla TCDD ne consegue un accumulo di porfirine nel fegato, nella milza e nei reni, che consiste in una malattia rara chiamata porfiria. Questa malattia racchiude più in generale una serie di malattie metaboliche rare scaturite da un'alterazione nella produzione del gruppo eme, appartenente alle porfirine, e provoca la distruzione dei globuli rossi, importanti effetti alla pelle quali lesioni cutanee e al sistema nervoso con attacchi di dolore acuto. La TCDD è inoltre irritante per gli occhi, la cute e il tratto respiratorio. Essa può anche determinare dermatiti ed effetti al sistema cardiovascolare, al tratto gastrointestinale, al fegato, al sistema nervoso e al sistema endocrino.

Sugli organismi viventi, come in esemplari della fauna selvatica, per esempio, sono

---

<sup>10</sup> APAT, *Dioossine Furani e PCB*, 2006.

<sup>11</sup> IARC, 1997, Volume 69.

stati riscontrati effetti dalla contaminazione di diossine quali: riduzione della fertilità, disturbi della crescita, immunotossicità e cancerogenicità. Gli studi hanno fatto emergere come tali sostanze agiscano sugli organismi fin dalle prime fasi di vita in quanto interferiscono con diversi sistemi determinanti per la crescita e lo sviluppo, tra cui il metabolismo della vitamina A e degli ormoni sessuali<sup>12</sup>.

### **1.3.3 COME AVVIENE LA CONTAMINAZIONE UMANA DA DIOSSINE**

La contaminazione da diossina nell'uomo può avvenire attraverso tre modalità: per incidente, per via di un'occupazione specifica o per via ambientale. La prima riguarda incidenti che avvengono in maniera casuale come quello famoso di Seveso di cui tratteremo nel secondo capitolo. La seconda include una piccola parte della popolazione esposta a causa della propria professione a emissioni di diossina, per esempio nella produzione di fitofarmaci, e l'ultima è la contaminazione che riguarda la maggior parte della popolazione e implica l'entrare in contatto con cibi contaminati, polveri o tramite contatto. Attualmente, con l'irrigidimento di alcune normative soprattutto dopo il disastro di Seveso, è stato ridotto di molto il rischio di possibile contaminazione attraverso le prime due vie sopracitate e il 95%

---

<sup>12</sup> APAT, *Diossine Furani e PCB*, 2006.

dell'esposizione avviene tramite cibi contaminati e in particolare grassi animali quali latticini e latte, pesce, carni bovine e suine (figura 5)<sup>13</sup>.

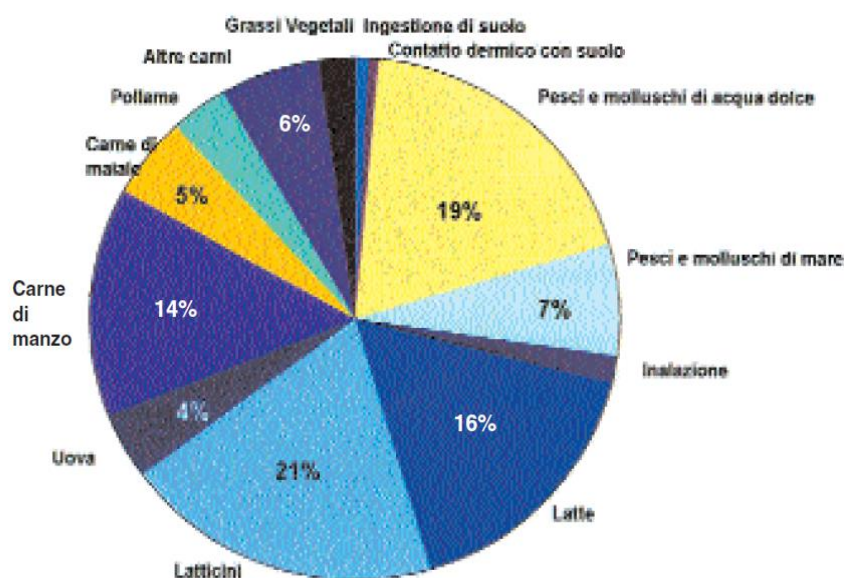


Figura 5 Esposizione a PCDD, PCDF e PCBdl attraverso il cibo, riferito a prodotti alimentari americani

#### 1.3.4 COME SI MISURA LA TOSSICITA'

Le diossine normalmente non si presentano come singoli composti divisi per specie ma come un mix di queste, non tutte tossiche e non tutte pericolose allo stesso modo.

<sup>13</sup> APAT, *Diossine Furani e PCB*, 2006.

Per esprimere la tossicità delle singole specie di diossine, è stato introdotto in ambito NATO il concetto di fattore di tossicità equivalente (TEF<sup>14</sup>). Questi fattori pongono le loro radici nella considerazione che i PCDD e i PCDF sono composti simili per quanto riguarda la struttura e anche per modalità di azione; infatti, agiscono allo stesso modo attivando il recettore Ah<sup>15</sup> e producendo, a causa di questo legame, effetti tossici simili. Questi fattori si calcolano confrontando quanto il composto è affine al legame con il recettore Ah, considerato quello della TCDD come valore unitario di riferimento. Di conseguenza, l'Organizzazione Mondiale della Sanità ha introdotto il concetto di tossicità equivalente (TEQ<sup>16</sup>) che esprime la concentrazione complessiva di diossine nelle diverse matrici e si ottiene sommando i prodotti tra i TEF delle singole specie e le rispettive concentrazioni, espresse secondo l'unità di misura della matrice in cui vengono ritrovate. Le unità di misura della concentrazione sono espresse, di solito, in suolo/sedimenti: mg/kg, µg/kg; acque mg/l, µg/l; aria mg/m<sup>3</sup> µg/m<sup>3</sup>.

---

<sup>14</sup> Toxicity Equivalence Factor (TEF)

<sup>15</sup> Anche chiamato “recettore degli idrocarburi aromatici”. Consiste in una proteina presente nelle cellule degli organismi viventi che riconosce e lega una determinata sostanza. In questo caso, i composti aromatici, come le diossine e gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), vi combaciano perfettamente. L'effetto tossico inizia quando la molecola che si lega e il recettore attraversano la membrana cellulare.

<sup>16</sup> Quantità totale di tossicità, individuata sommando la tossicità relativa di ogni singola specie.

## **1.4 LA SITUAZIONE IN ITALIA**

Da alcuni decenni sono state attuate dalle autorità competenti efficaci misure di prevenzione, controllo e riduzione dell'esposizione umana alle diossine. Nei Paesi dell'Unione Europea, ad esempio, le emissioni prodotte dai nuovi impianti industriali sono state ridotte di molto e sono tuttora in diminuzione. A seguito dell'incidente italiano del 1976 a Seveso, la Comunità Europea nel 1982 approvò la cosiddetta "Direttiva Seveso", oggi giunta alla sua terza revisione, che prevedeva tra l'altro la registrazione degli stabilimenti industriali a rischio, l'identificazione delle sostanze pericolose trattate e la preparazione di specifici piani di prevenzione ed emergenza. Assodata la possibile contaminazione alimentare, in Europa i limiti di concentrazione di diossine presenti nel cibo, identificati in modo da non provocare effetti sulla salute del consumatore, sono regolati per legge e periodicamente controllati attraverso specifici programmi di sorveglianza. Nel capitolo secondo queste informazioni verranno approfondite più dettagliatamente.

### **1.4.1 DIOSSINE, FURANI E PCB IN VENETO**

Uno studio condotto dall'Arpav sul territorio della regione del Veneto ha approfondito la conoscenza di diossine, furani e PCB sul suolo regionale così da apprendere elementi utili a comprendere i fenomeni di accumulo e contaminazione.

Sono state incluse tutte le principali tipologie di sorgenti presenti nel territorio regionale quali lo smaltimento di rifiuti urbani tramite incenerimento; le combustioni per la produzione di energia e di calore; i processi ad alta temperatura come la produzione di cemento, asfalto e calce; le operazioni di metallurgia primaria e secondaria; le combustioni incontrollate ossia gli incendi (figura 6).

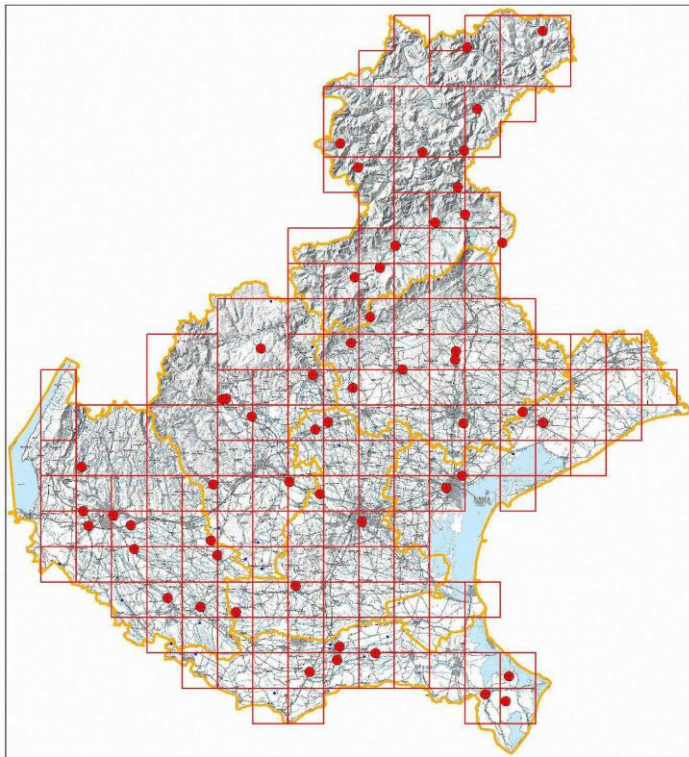


Figura 6 -  
Punti di  
pressione da  
monitorare (in  
rosso) definiti  
in accordo con i  
Servizi Stato  
dell'Ambiente

Sono stati eseguiti diversi campionamenti in zone differenti per individuare le caratteristiche dei composti, stabilire l'origine naturale o meno del materiale raccolto e per capire il comportamento dei composti organici nel suolo.

I risultati raccolti della contaminazione da PCDD e PCDF sono osservabili nella figura 7.

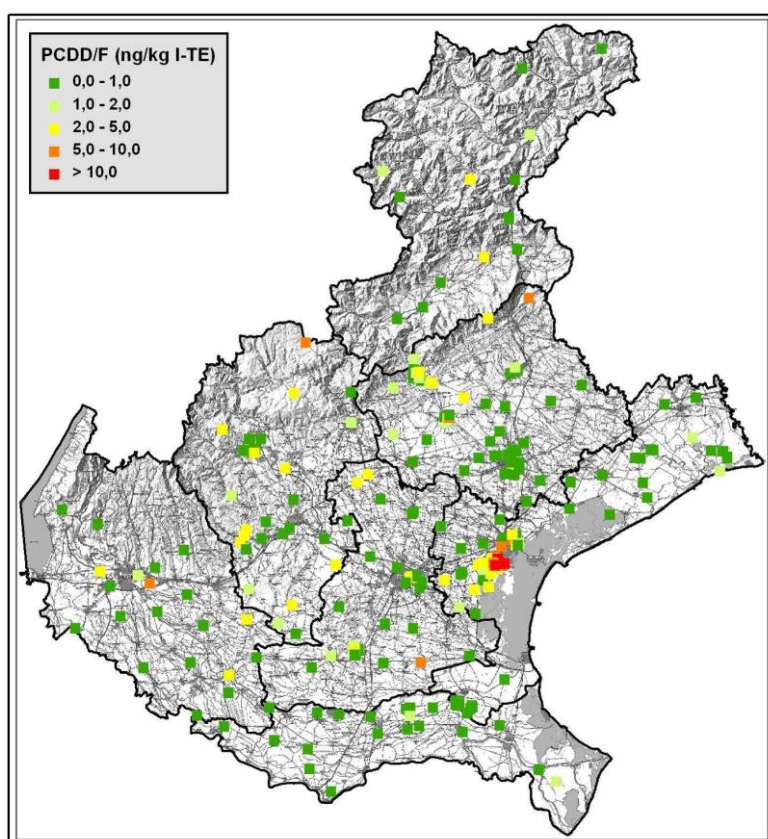


Figura 7 -  
Contenuto in  
diossine e  
furani, espressa  
come tossicità  
equivalente (I-  
TE ng/kg), nei  
suoli del Veneto

In tutto il database disponibile; quindi, oltre allo studio preso in considerazione, sono stati osservati 21 superamenti delle CSC<sup>17</sup> previste dal D.Lgs. 152/2006 per le aree residenziali (10 ng/kg I-TE) ossia circa il 7% dei dati disponibili. Si tratta

---

<sup>17</sup> Concentrazioni Soglie di Contaminazione

dell'area attorno al cementificio di Pederobba, la Scuola Elementare Ciardi a Treviso, due zone a Montebelluna nei pressi di una fonderia e nove aree, ossia la maggioranza, nella zona industriale di Porto Marghera. Tutti i superamenti si presentano comunque con una concentrazione al di sotto dei 40 ng/kg I-TE<sup>18</sup> tranne uno nell'area di Porto Marghera con concentrazione pari a 324 ng/kg I-TE. Aggiungendo anche i PCBdl e considerando l'intero dataset, si passa dai 21 superamenti del limite di legge a 26. Questi casi di superamento ricadono sempre nell'area di Porto Marghera dove la concentrazione di alcune specie di PCBdl risulta particolarmente elevata.

Le forme più presenti riscontrate dai campioni analizzati dal progetto di studio sono le octaclorodibenzodiossine che rappresentano circa il 44% del campione, gli octaclorodibenzofurani con il 31%, ossia le specie meno pericolose in termini di tossicità equivalente, 1,2,3,4,6,7,8 eptaclorodibenzofurani con il 12% e le eptaclorodibenzodiossine con il 7%<sup>19</sup>.

Occorre soffermarsi su alcuni valori osservati nel progetto che, sebbene non superino la soglia di legge, presentano concentrazioni anomale rispetto alla popolazione dell'intera banca dati. Tra questi vale la pena segnalare due campioni eseguiti nel sottobosco dell'area prealpina (altipiano di Asiago e Cansiglio) che

---

<sup>18</sup> Fattori di tossicità equivalente, stabilito dalla Nato a livello internazionale.

<sup>19</sup> Arpav, *Diossine, furani, PCB e IPA nei suoli del Veneto*, 2016

hanno mostrato concentrazioni significative di diossine in particolar modo nei primi centimetri di suolo organico, nello specifico comprese tra 2 e 7 ng/kg I-TE. Scendendo ad una profondità di circa 10cm con il campionamento, sono stati riscontrati valori inferiori ma comunque significativi, ossia tra 1,8 e 3,9 ng/kg I-TE. Lo stesso fenomeno è stato osservato, seppur in maniera minore, anche nei campioni raccolti in altre tre zone prealpine del Monte Grappa, delle Prealpi trevigiane e vicentine. Gli aspetti peculiari di questi casi montani sono le alte concentrazioni di diossine nonostante l'impatto minimo diretto delle attività antropiche. Si tratta infatti di terreni non lavorati in superficie, a differenza di quelli di pianura, posti soprattutto in aree incontaminate e poco frequentate. Inoltre, diversi campionamenti hanno riscontrato concentrazioni di diossine molto diverse tra loro. Il motivo è probabilmente da ritrovare nella diversa composizione degli humus forestali presenti nei diversi siti; infatti, possono essere composti da resti di foglie più o meno recenti (uno o due anni) o al contrario da residui più alterati che persistono sulla superficie del suolo per anni e hanno accumulato deposizioni atmosferiche. Queste peculiarità potrebbero anche essere il risultato di riduzione degli apporti di inquinanti negli ultimi decenni rispetto agli anni precedenti e quindi ad una diminuzione del livello di contaminazione diffusa. Si suppone che le due spiegazioni appena fornite contribuiscano entrambe ai dati emersi.

Inoltre, i dati del progetto Monarpop<sup>20</sup> confermano quanto appena sottolineato. Il progetto ha previsto la collaborazione di dieci istituzioni (Agenzie ambientali e Università) di Austria, Italia, Germania, Svizzera e Slovenia, i quali hanno creato una rete di monitoraggio dei POPs<sup>21</sup> organici e di altri inquinanti nella regione alpina, al fine di stabilire la concentrazione di quest'ultimi nell'ambiente alpino. I risultati emersi hanno indicato come la catena alpina costituisca una barriera per il trasporto atmosferico a lunga distanza degli inquinanti. Soffermandosi sui dati, infatti, le concentrazioni maggiori sono state rilevate nell'area prealpina, quindi, prossime all'area di pianura dove sono presenti le principali sorgenti; le stesse si riducono poi addentrandosi in area alpina, eccezioni permettendo. Per quanto riguarda i PCB, l'area di Porto Marghera, così come per le diossine, presenta valori anomali rispetto al resto della regione, con una maggior frequenza di valori superiori a 10 µg/kg, da ricondurre molto probabilmente alla vicinanza alle fonti di emissione. Il D.Lgs. 152/2006 stabilisce un limite per i PCB nel suolo pari a 0,06 mg/kg (60 µg/kg) per le aree residenziali e 5 mg/kg per le aree commerciali e industriali. I valori superiori ai limiti del D. Lgs. 152/2006 per le aree residenziali sono tre, localizzati nell'intorno di Porto Marghera come sopracitato, pari a 92, 242 e 1607 µg/kg. Inoltre, il 5% dei dati, corrispondente a 32 campioni, presentano

---

<sup>20</sup> Offenthaler et al., *Dioxins and dioxin-like pollutants in alpine forests*, 2007 e 2009

<sup>21</sup> Persistent Organic Pollutants

concentrazioni maggiore di 10 µg/kg: di questi, 20 ricadono ancora nell'area di Porto Marghera. L'86% dei dati ha invece concentrazione inferiore a 5 µg/kg. Per tutti i limiti normativi si rimanda nello specifico al secondo capitolo.

#### **1.4.2 DIOSSINE, FURANI e PCB A TARANTO, PUGLIA**

Lo studio preso in esame ha l'obiettivo di valutare la presenza e la distribuzione spaziale di PCDD/F e PCBdl nei suoli superficiali di Taranto, una delle aree più industrializzate e contaminate del Sud Italia. Nello specifico, Taranto rappresenta una delle peggiori situazioni per le emissioni industriali e l'alta incidenza di malattie ed è caratterizzata da emissioni industriali che contribuiscono significativamente all'inquinamento nazionale di composti cancerogeni come PCDD/F e PCBdl. Sono stati scelti 10 siti in un'area di 20 km<sup>2</sup> comprendente aree urbane e suburbane di Taranto e principali insediamenti industriali e discariche illegali. Tre sotto-aree sono state identificate come ad alto, medio e basso rischio in base alla distanza dalle principali fonti industriali. Sono stati poi raccolti campioni di suolo nel 2017 e 2018 e a questi sono state effettuate diverse analisi chimiche per individuare la presenza di diossine e furani, attraverso la risposta del recettore cellulare Ah, il quale, come anticipato, si attiva in presenza di questi composti.

È stata poi valutata l'esposizione umana ai PCDD/F e PCBdl presenti nel suolo basandosi su scenari realistici di contatto diretto con questo. Sono stati considerati

inoltre diversi gruppi di popolazione, tra cui bambini e adulti, per valutare il rischio complessivo associato alla contaminazione del suolo.

I risultati dell'analisi hanno rivelato che i livelli di PCDD/F e PCBdl variavano ampiamente tra i siti di campionamento, con concentrazioni più elevate nei siti più vicini alle fonti industriali. In 3 su 10 siti, i livelli di contaminazione superavano i limiti regolatori nazionali, suggerendo la necessità di interventi di bonifica e ulteriori monitoraggi. Inoltre, un'alta prevalenza di PCBdl è stata riscontrata in 6 su 10 siti, seguita da PCDF e PCDD, tutti situati in prossimità delle principali aree industriali e di discariche illegali. La distribuzione spaziale dei contaminanti ha mostrato inoltre una chiara tendenza di decremento con l'aumentare della distanza dalle principali aree industriali e di discariche illegali<sup>22</sup>.

---

<sup>22</sup> Liberatori et al, *Occurrence and spatial distribution of dioxin and dioxin-like compounds in topsoil of Taranto (Apulia, Italy) by GC-MS analysis and DR-CALUX® bioassay*, 2021

## **1.5 ESEMPI DI CONTAMINAZIONE DA DIOSSINE, FURANI E PCB RISCONTRATA NEI PRODOTTI ALIMENTARI**

Diversi sono gli esempi citabili riscontrati negli anni di prodotti e alimenti contaminati da diossina. I casi più recenti hanno riscontrato la presenza di inquinanti tra cui diossine in fertilizzanti e in alcune carbonelle utilizzate per il barbecue. Questi episodi tuttora dimostrano come questo argomento non sia vetusto e come volontari smaltimenti errati di ceneri di produzione e il traffico illecito di rifiuti non siano ancora stati debellati. C'è quindi costantemente bisogno di fornire consapevolezza e informazione alla popolazione sui rischi per la salute che queste sostanze apportano. Nei prossimi paragrafi l'attenzione è stata posta sulla contaminazione di tipo alimentare, in particolare in prodotti grassi quali latte e carne.

### **1.5.1 UN FOCUS SUL TERRITORIO DI FORLÌ, EMILIA-ROMAGNA**

L'approfondimento preso in esame delinea un quadro dettagliato sull'inquinamento da diossine, furani e PCB nel territorio di Forlì, basandosi su studi e monitoraggi condotti nel 2011 e nei tre anni precedenti su produzioni alimentari come carne, uova e latte. L'obiettivo era quello di creare un quadro della situazione e poter valutare l'inquinamento da diossine e furani presente nella zona.

Dal 2012 le normative di riferimento per i PCDD/F e i PCB nelle matrici alimentari è cambiata e sono stati abbassati i limiti TEQ per le PCDD/F, per la somma di PCDD/F e PCB-DL ed introdotti nuovi limiti TEQ per alcuni PCB non diossina simili (PCB-NDL) utilizzando i nuovi TEF dell'Organizzazione Mondiale della Sanità.

Il quadro dei risultati emersi dal monitoraggio e dal campionamento è rappresentato dettagliatamente dalla tabella 2 qui sotto.

Tabella 2

**-Campioni effettuati nel 2011 per il controllo dei PCDD/F e PCB in matrici di origine animale giudicati in base alle nuove normative 2012 (tenendo conto anche dei 5 campioni ISDE)**

| Matrice di origine animale    | Numero campioni | N° campioni non conformi al Regolamento (CE) N° 1831/2006 modificato dal Regolamento (UE) 1259/2011 | N° campioni non conformi alla Raccomandazione Commissione Europea (23/8/2011) | N° campioni conformi |
|-------------------------------|-----------------|---|---|----------------------|
| Galline/Pollo                 | 12              | 8   | 2   | 2                    |
| Uova                          | 24              | 4   | 7   | 13                   |
| Tessuto adiposo ovino         | 3               | 0   | 2   | 1                    |
| Fegato ovino                  | 3               | 1   | n.a.  | 2                    |
| Latte ovino                   | 3               | 0   | 0   | 3                    |
| Latte bovino                  | 3               | 0   | 1(*)  | 2                    |
| Latte caprino                 | 2               | 0   | 1   | 1                    |
| Pesce                         | 1               | 0   | 0   | 1                    |
| <b>Totale matrici animali</b> | <b>51</b>       | <b>13</b>   | <b>13</b>   | <b>25</b>            |
| Vegetali                      | 10              | 0   | 10  | 0                    |
| <b>Totale complessivo</b>     | <b>61</b>       | <b>13</b>   | <b>23</b>   | <b>25</b>            |

Tenendo conto di questi riferimenti normativi, la percentuale dei prelievi da matrici animali non conformi alla Raccomandazione della Commissione Europea del 23/8/2011 è pari al 25,5% (13 su 51), analogamente a quella dei campioni non

conformi al Regolamento CE 1259/2011 (13 su 51); pertanto complessivamente i campioni di origine animale conformi sono pari al 49% (25 su 51). Per quanto riguarda i campioni di vegetali, sono risultati tutti non conformi alla Raccomandazione della Commissione Europea ma non per quanto riguarda il contenuto di diossine e furani, quanto piuttosto quello di PCBdl. Per quanto riguarda la presenza di diossine, molto minore in generale rispetto ai PCB, emerge una predominanza della octadiossina, tipica dei processi di combustione, nonché specie più clorurata, più stabile e quindi maggiormente soggetta a bioaccumulo<sup>23</sup>. In conclusione, i risultati esposti in tabella evidenziano una contaminazione non trascurabile nei prodotti alimentari presi in esame e suggeriscono come sia necessario, così come suggeriscono le normative, avviare indagini e individuare le fonti della contaminazione e di conseguenza l'adozione di provvedimenti o di azioni di ripristino per ridurle o eliminarle.

---

<sup>23</sup> Tavolo Tecnico Interistituzionale, *Relazione finale sui lavori del tavolo interistituzionale in tema di diossine/furani e PCB nelle matrici ambientali ed alimentari del territorio forlivese*, 24 Ottobre 2012.

### **1.5.2 INQUINAMENTO SUL LATTE BOVINO IN UNA VALLE PIEMONTESE**

Lo studio esaminato rappresenta un ulteriore esempio di contaminazione alimentare da diossine, ritrovate nel latte bovino di una valle piemontese. I valori di concentrazioni di PCDD/F e PCBdl nel latte sono stati raccolti dal 2004 al 2007 e, poiché la loro presenza nei prodotti animali può essere ricondotta all'ingestione da parte degli animali di foraggi contaminati, sono stati inoltre correlati alla posizione delle coltivazioni di foraggio.

I risultati hanno presentato evidenze a supporto dell'ipotesi che indica l'acciaieria locale come unica fonte di inquinamento e quindi unica responsabile della contaminazione. La stessa è inoltre situata nell'area più inquinata della valle. L'analisi spaziale esplorativa effettuata in questa ricerca è preziosa poiché applicabile per l'identificazione diretta di una probabile fonte di contaminazione da diossina nei prodotti lattiero-caseari anche in mancanza di dati diretti sulla contaminazione del suolo superficiale<sup>24</sup>.

---

<sup>24</sup> Desiato et al, *Data on milk dioxin contamination linked with the location of fodder croplands allow to hypothesize the origin of the pollution source in an Italian valley*, 2014.

Parte seconda

**Gli incidenti più rilevanti e la  
normativa comunitaria e  
internazionale**

## **2.1 GLI INCIDENTI E LE CONTAMINAZIONI DA DIOSSINE PIU' DANNOSE PER LA SALUTE UMANA E AMBIENTALE E LA NORMATIVA VIGENTE**

In questo secondo capitolo andremo prima a trattare gli eventi, incidentali e non, che hanno avuto rilevanti conseguenze sanitarie e ambientali e che hanno conseguentemente spinto a sviluppare un processo conoscitivo e normativo sulle diossine e un progressivo livello di controllo e salvaguardia per la protezione dell'ambiente e della salute umana. Successivamente verranno poi presentate le attuali normative internazionali e nazionali con i rispettivi limiti di concentrazione stabiliti per l'ambito alimentare e ambientale per tutelare la natura, i suoi organismi viventi e l'uomo.

Per arrivare al momento presente ed essere giunti quindi a porre dei limiti al rilascio di queste molecole, alla possibile contaminazione da queste sostanze tossiche e alla consapevolezza della tossicità di quest'ultime, abbiamo dovuto svolgere un processo composto principalmente da due fasi che sono state attraversate. La prima fa riferimento agli anni '50, '60 e '70, dopo alcuni incidenti avvenuti nelle industrie produttrici di fenoli clorurati e acido triclorofenossiacetico, che hanno causato la morte di parecchi animali e la malattia chiamata cloracne. In questa fase, l'uomo è venuto a conoscenza di questi inquinanti e dei possibili rischi per la salute umana e ambientale.

La seconda fase, cronologicamente situabile dagli anni '80 in poi, ha visto l'attuazione di particolari direttive e norme, redatte con il fine di ridurre il rischio e prevenire possibili danni e quindi tutelare l'ambiente e la salute umana. In questa seconda fase, sono state riscontrate le diossine in diverse matrici ambientali anche a concentrazioni molto basse ed è quindi stato scoperto l'ingresso di queste sostanze nella catena alimentare. La tossicità di queste sostanze, indubbiamente, è strettamente correlata al livello di concentrazione di queste molecole negli alimenti. Più quest'ultimo aumenta, più cresce la tossicità e la pericolosità di queste molecole per gli organismi viventi e l'ambiente. Risulta quindi necessario lo studio ambientale e il monitoraggio continuo di questi inquinanti così rischiosi e l'attuazione di azioni mitigative, contenitive e di bonifica di siti inquinati e nocivi.

### **2.1.1 INCIDENTE A SEVESO, ITALIA (1976) E CONSEGUENTE DIRETTIVA SEVESO (1982)**

Nell'estate del 1976, a Seveso, una nube tossica fuoriuscì da un reattore dell'impianto dell'azienda chimica svizzera Icmesa. L'azienda faceva parte del gruppo Givaudan & C. di Vernier S.A. di Ginevra, che fu a sua volta successivamente acquistato nel 1963 dal gruppo Hoffmann-La Roche A.G. di Basilea. L'impianto in questione produceva prodotti intermedi per l'industria cosmetica e farmaceutica ed era situato circa 15 km a nord di Milano.

Dopo l'incidente, la TCDD (2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-diossina) e altri intermedi di produzione fuoriuscirono per molte ore dal camino e raggiunsero l'atmosfera. Quel giorno il vento soffiava particolarmente forte e la nube con tutti gli inquinanti venne rapidamente propagata nel territorio circostante, densamente popolato, per circa 6 km. Il vento, sebbene da un lato estese di molto l'area colpita, dall'altro favorì in questo modo l'abbassamento della concentrazione di diossine disperse. Sono stati calcolati circa 2000 i chilogrammi di inquinanti totali dispersi in atmosfera. Non è stato possibile però calcolare con esattezza la quantità di diossine dispersa, tant'è che i valori presenti in letteratura variano di molto uno con l'altro, sebbene siano comunque molto alti.

Qualche giorno dopo l'incidente, i primi effetti vennero segnalati dalla popolazione tra cui una moria di animali e 193 casi di cloracne. Nel lungo periodo invece furono diagnosticate neoplasie del tessuto linfatico ed emopoietico, casi di diabete mellito, molti casi di morte a causa di malattie circolatorie e di malattie croniche ostruttive dei polmoni. La mortalità negli animali raggiunse livelli del 100% nelle fattorie in cui questi venivano nutriti con foraggio o verdure provenienti dalle aree contaminate. Ovviamente, il consumo di prodotti agricoli o zootecnici provenienti da queste aree fu vietato alla popolazione. Solo una quindicina di giorni dopo però, settecento persone vennero sfollate, l'area venne evacuata e suddivisa in tre zone a seconda del grado di tossicità raggiunto.

Si considerarono a rischio anche undici paesi limitrofi e l'allarme fu esteso anche a quest'ultimi.

Le analisi svolte sul suolo in superficie confermarono che le diossine si ridussero del 50% nei primi cinque mesi e poi si stabilizzarono, motivo per cui il terreno venne poi rimosso e le abitazioni demolite. Tutto il materiale inquinato venne portato in discariche speciali limitrofe. In altre zone più distanti dal luogo dell'incidente, il terreno venne in parte rimosso, gli interni ed esterni degli edifici, i giardini, le aree agricole e zootecniche vennero ripuliti e scrostati, finché non vennero raggiunti i limiti di tollerabilità. A quel punto le autorità sanitarie autorizzarono il reingresso della popolazione evacuata. In altre zone ancora più lontane dal luogo dell'incidente, grazie ad un lavoro di aratura del terreno dei primi sette centimetri svolto negli anni successivi, la diossina venne ridotta tantissimo grazie al processo di decomposizione fotochimica, ossia la degradazione di molecole che avviene grazie alla luce. Le analisi di acque superficiali e sotterranee e dei sedimenti fornirono costantemente risultati negativi. Anche i valori della contaminazione del pulviscolo volatile diminuivano all'aumentare della distanza dall'impianto<sup>25</sup>.

---

<sup>25</sup> <https://www.sasspuglia.it/il-disastro-di-seveso/>

Dal punto di vista legislativo, questo disastro ha permesso diverse svolte importanti nel nostro Paese.

La prima riguarda il diritto all'aborto da parte delle donne, pratica che all'epoca in Italia era vietata, fatte salve alcune deroghe, e considerata reato penale. Il 7 agosto 1976 i due esponenti democristiani, il Ministro della sanità Luciano Dal Falco e quello della giustizia Francesco Paolo Bonifacio autorizzarono aborti terapeutici per le donne della zona colpita che ne avessero fatto richiesta. Le pratiche vennero svolte presso la clinica Mangiagalli di Milano e presso l'ospedale di Desio. Ci fu successivamente un aumento del dibattito in merito in cui l'opinione pubblica partecipò e si sentì pienamente coinvolta. Il tutto si concluse con l'emanazione della Legge 194 del 22 maggio 1978 sul diritto all'aborto, confermata poi dal referendum del 1981.

L'entità del disastro portò successivamente alla seconda svolta legislativa importante ossia l'emanazione della direttiva 82/501/CEE chiamata anche "Direttiva Seveso" che si occupò di stabilire regole, limiti e obblighi comuni da rispettare per ridurre il rischio di inquinamento di attività industriali definite pericolose e il conseguente danno ambientale e per la salute umana. Si decretò l'obbligo da parte dei produttori di individuare i siti potenzialmente pericolosi e i rischi connessi all'attività, redigere piani d'emergenza e comunicarli agli enti locali per reagire prontamente ad eventuali incidenti, così come le azioni introdotte per

prevenire il possibile verificarsi di danni ingenti. Fu obbligatorio inoltre identificare e comunicare le sostanze pericolose che venivano utilizzate e controllare e informare la popolazione che viveva nelle vicinanze dello stabilimento. Con sostanze pericolose la direttiva intendeva classificare quelle tossiche, comburenti, esplosive, infiammabili e nocive per l'ambiente e la salute umana. La direttiva venne poi aggiornata e divenne la 96/82/CEE dove venne diminuito il numero di sostanze pericolose da 180 a 50 ma venne anche redatta una nuova lista di classi di pericolosità che aumentò di conseguenza il campo di applicazione del decreto.

Un altro aggiornamento fu fatto alla direttiva nel 2003, che divenne la 2003/105/CE, a seguito di un incidente in una fabbrica di fertilizzanti a Tolosa. Vennero inserite le aziende minerarie nella lista di attività pericolose, nuovi limiti per le aziende che utilizzano il nitrato di ammonio e vennero inoltre modificate le soglie limite di sostanze tossiche e cancerogene. L'ultima modifica della direttiva, ancora attualmente in vigore, è la 2012/18/UE del 4 luglio 2012. L'Italia l'ha recepita nel proprio ordinamento giuridico con il decreto legislativo n.105 del 26 giugno 2015<sup>26</sup>. L'ultima svolta importante riguardò l'ambito giurisprudenziale, in quanto si continuò ad ampliare nel tempo il concetto di risarcibilità del danno non

---

<sup>26</sup> <https://www.mase.gov.it/pagina/la-direttiva-seveso-ii-presentazione>

patrimoniale derivante da illecito ambientale. Con la sentenza della Corte di Cassazione del 2009 venne disposto il risarcimento autonomo del danno morale derivante da disastro ambientale, pur in assenza di danno biologico, nei confronti di tutti coloro che, in virtù di un vincolo di vicinanza coi luoghi dell'evento dannoso, ne abbiano presuntivamente subito le conseguenze in termini di «patema d'animo indotto dalla preoccupazione per il proprio stato di salute»<sup>27</sup>. La sentenza ha di fatto accolto la richiesta di risarcimento delle vittime, seppur con la somma irrisoria di 2.000 euro per ognuna di esse. L'innovazione è stata quella di aver garantito un risarcimento di un danno che, per il suo carattere atipico in quanto presunto e senza lesioni alla salute, si confaceva difficilmente ai confini chiari e rigidi delle categorie di matrice giurisprudenziale del danno morale ed esistenziale. La sussistenza del danno, sotto forma di turbamento e patema d'animo, nasceva dai ripetuti controlli sanitari a cui per anni si erano dovuti sottoporre gli individui cosiddetti "a rischio", poiché strettamente coinvolti ai luoghi dell'incidente. Lo stress è da ritenersi inoltre correlato all'iniziale mancanza di informazioni sull'accaduto e alla successiva scoperta che il fatto potrebbe aver causato gravi danni alla propria salute, attuale o futura, senza però poter essere in grado di misurare o stimare l'entità del danno. Questo disagio psichico, inoltre, anziché

---

<sup>27</sup> Sentenza Cass., Sez. III civile, 13 maggio 2009, n. 11059, p.10.

ridursi con il passare degli anni, tendeva a crescere con l'aumentare delle scoperte scientifiche in materia.<sup>28</sup>

L'ultima considerazione in merito riguarda il reato definito dalla Corte di Cassazione come plurioffensivo e di disastro ambientale. La Corte di Cassazione, infatti, in modo molto lungimirante, ha posto la stessa attenzione della Corte Costituzionale (sentenza n. 225 del 22 luglio 2009) sulla nozione di bene-ambiente. La plurioffensività del reato determina infatti l'individuazione di due distinti oggetti della condotta lesiva: i singoli individui e l'ambiente. Quest'ultimo assume quindi una connotazione naturalistico-biologica, come bene pubblico, unico e immateriale. Il carattere plurioffensivo del reato è necessario per tutelare anche l'uomo dalle ripercussioni, sia fisiche sia morali, che egli stesso può subire in caso di danni all'ambiente in cui si trovi a vivere<sup>29</sup>.

Per quanto riguarda la nozione di ambiente quale bene pubblico, occorre fare un piccolo approfondimento più dettagliato e affrontare come si è arrivati a definirlo in questo modo. Prendendo in considerazione le Carte fondamentali degli Stati

---

<sup>28</sup> S. Cacace, *Seveso, atto ennesimo: sì al danno morale "presunto" seppur in assenza di lesioni alla salute*, in *Nuova giur. civ.*, 2006, 9

<sup>29</sup> Enrica Blasi, *Rivista quadrimestrale di diritto dell'ambiente*, Anno 2010, Numero 0, *Il caso Seveso: ampliamento della risarcibilità del danno non patrimoniale e riflessi sulla nozione di bene-ambiente*. (Cass. Civ., Sez. III, 13 maggio 2009, n. 11059)

europei, datate all'immediato dopoguerra, queste non riservavano particolare attenzione alle tematiche ambientali, ma la loro importanza e la salvaguardia di tali beni erano sottintese in diversi articoli. Tuttavia, nel corso del tempo, gran parte dei Paesi europei ha inserito, revisionando la Costituzione, disposizioni specifiche sull'ambiente. In Italia, con la revisione degli articoli 9 e 41, è stata data ancor più importanza alla tutela dell'ambiente e ai diritti delle generazioni future. Oggi l'articolo 9 recita: "La Repubblica promuove lo sviluppo della cultura e la ricerca scientifica e tecnica. Tutela il paesaggio e il patrimonio storico e artistico della Nazione. Tutela l'ambiente, la biodiversità e gli ecosistemi, anche nell'interesse delle future generazioni" mentre il 41 "L'iniziativa economica privata è libera. Non può svolgersi in contrasto con l'utilità sociale o in modo da recare danno alla salute, all'ambiente, alla sicurezza, alla libertà, alla dignità umana. La legge determina i programmi e i controlli opportuni perché l'attività economica pubblica e privata possa essere indirizzata e coordinata a fini sociali e ambientali". In realtà, a parte la modifica nella terminologia e l'aggiunta del termine specifico "ambiente", non è stato apportato nessun miglioramento effettivo o sostanziale. La tutela dell'ambiente era già infatti sottintesa nell'articolo 9 nella tutela del paesaggio e nell'articolo 41 l'utilità sociale dell'iniziativa economica comprendeva anche implicitamente le generazioni future. È stato comunque un enorme passo avanti, per quanto riguarda lo stato italiano, inserire nella propria carta fondamentale una specifica sull'ambiente, in quanto denota l'attenzione e la sensibilità delle

istituzioni nei confronti di questo tema. Viene definito chiaramente il valore della tutela dell'ambiente e il diritto ad un ambiente salubre non solo per le generazioni attuali ma anche per quelle future, comprendendo al suo interno il concetto attuale di sviluppo sostenibile promosso dall'Unione Europea. La vera svolta significativa è stata l'attribuzione al bene ambiente dell'appellativo di bene pubblico. La magistratura ordinaria, a fine anni 80, aveva già accolto "una concezione unitaria del bene ambientale, comprensiva di tutte le risorse, naturali e culturali". A questa nozione di bene aveva accordato la tutela in quanto "elemento determinativo della qualità della vita" ovvero oggetto essenziale per il benessere della persona, rispetto al quale il singolo individuo può far valere un autonomo diritto soggettivo, ossia il "diritto all'ambiente". Negli anni successivi, diventò un "diritto fondamentale della persona umana", costituzionalmente garantito dagli articoli 2, 3, 9 e 32, e inoltre degno di specifica protezione. L'ultimo contributo alla nozione del bene ambiente è stato dato dalla giurisprudenza contabile, la quale ha tentato una classificazione proponendo la concezione di "insieme di beni e di utilità economicamente apprezzabili che sono a disposizione ed in uso della collettività, e nei cui confronti lo Stato (o l'ente territoriale) assume l'obbligo di tutela riconoscendo ad essi nelle leggi, ai diversi livelli, una particolare protezione". L'ambiente è stato quindi

qualificato come bene pubblico e i relativi danni a quest'ultimo sono stati elevati a danni erariali, ossia di patrimonio dello stato.<sup>30</sup>

### **2.1.2 INCIDENTE IN VIETNAM (1963-1975)**

Durante la guerra del Vietnam fu sperimentato e utilizzato un erbicida chiamato comunemente “Agent Orange”, cioè, agente arancione. Il nome deriva dal colore che avvolgeva le cisterne che venivano usate per contenere il prodotto. Il suo utilizzo era a scopo militare, infatti faceva sì che le boscaglie perdessero le foglie, cosicché il nemico non vi si potesse proteggere o nascondere e veniva sparso anche sui raccolti, affinché l'avversario fosse affamato e più in difficoltà. Il prodotto veniva distribuito direttamente a mano o per via aerea dai soldati americani. L'Agente Arancione non fu purtroppo l'unico pesticida usato dagli Americani in Vietnam. Tutti questi prodotti erano contaminati da TCDD, ossia la 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-diossina, a causa delle reazioni di condensazione che avvenivano tra i composti usati per produrre questi erbicidi. Approssimativamente 11.250 chilometri quadrati di terreni coltivati del Vietnam del Sud furono defolciati. Molti studi, nonostante la difficoltà a reperire dati in tempi di guerra, hanno provato a dimostrare il legame tra l'esposizione all'Agente Arancione assunto per diverse

---

<sup>30</sup> Roberta Landi, *Risanamento ambientale e vicende della proprietà*, Napoli, Edizioni Scientifiche Italiane, 2022, pp. 236.

vie dai soldati vietnamiti e americani e dai loro figli e diverse malattie e disfunzioni di vari organi più o meno importanti. Tra quest'ultime non solo le malformazioni dei feti, le irritazioni e la nausea ma anche la cloracne e il cancro a diversi organi dell'apparato respiratorio. Le supposizioni vennero poi confermate successivamente da studi effettuati in laboratorio su topi e ratti. Studi recenti confermano e ribadiscono l'importanza di monitorare le diverse catene alimentari in quanto il suolo, i tessuti animali e il sangue umano sono risultati contenere livelli elevati di TCDD<sup>31</sup>.

Inoltre, importanti studi hanno rilevato come, a circa trent'anni dalla fine della guerra in Vietnam, alcune popolazioni trasferitesi nel Vietnam del Sud e bambini nati dopo la fine degli spargimenti di Agente Arancione, sono ancora caratterizzati da elevati valori di TCDD nel corpo. In particolare, le famiglie con i valori di TCDD più alti sono quelle con regimi alimentari basati principalmente sul pesce<sup>32</sup>.

---

<sup>31</sup> Priyanka Mary Sebastian and K. V. Bhaskara Rao, *Approaches in Bioremediation of Dioxins and Dioxin-Like Compounds – A Review on Current and Future Prospects*, *Nature Environment and Pollution Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1381-1387, 2022.

<sup>32</sup> Schecter et al., *Recent dioxin contamination from Agent Orange in residents of a Southern Vietnam city*. *Journal of Occupational Medicine* 43:5, 2001.

### **2.1.3 CONVENZIONE DI BASILEA (1989)**

Le conseguenze legislative di tutti questi disastri, come visto per la direttiva Seveso, furono molteplici. Una di queste fu la Convenzione di Basilea sul controllo dei movimenti oltre frontiera di rifiuti pericolosi e sulla loro eliminazione. Questa convenzione, adottata nel 1989 e ratificata da 189 Paesi, è un trattato internazionale, negoziato grazie all'azione dell'Unep<sup>33</sup>, pensato soprattutto per evitare il trasporto di rifiuti pericolosi da Paesi sviluppati a Paesi in via di sviluppo. In particolare, le diossine e i PCB vennero inclusi nella lista di rifiuti pericolosi e quindi entrarono a far parte di questa regolamentazione e accordo tra gli Stati. L'impegno più importante scritto nella convenzione è quello che chiede agli Stati firmatari di produrre la minor quantità possibile di rifiuti pericolosi, la messa in opera di impianti statali idonei all'eliminazione di questi scarti e il conseguente smaltimento di quest'ultimi in un luogo il più vicino possibile a quello in cui vengono generati. Infine, gli Stati firmatari devono occuparsi di gestire tali rifiuti in una maniera atta a prevenire l'inquinamento e a tutelare la salute umana e dell'ambiente. Le parti firmatarie si impegnano inoltre a non esportare o importare rifiuti pericolosi o altri rifiuti verso o da uno Stato non firmatario; non esportare rifiuti a meno che lo Stato ricevente non abbia dato precedentemente un consenso per iscritto a tale importazione specifica; comunicare informazioni

---

<sup>33</sup> UN Environment Programme

riguardanti movimenti internazionali agli Stati interessati per mezzo di un modulo di notifica; consentire movimenti internazionali di rifiuti solo se il loro movimento e smaltimento non comportano alcun pericolo; imballare, etichettare e trasportare i rifiuti movimentati in conformità con le disposizioni internazionali, e garantire che essi siano accompagnati da un documento di movimento dal momento della partenza al punto di smaltimento. Le parti si dovrebbero impegnare inoltre a prendere i provvedimenti necessari affinché i movimenti transfrontalieri di rifiuti pericolosi e di altri rifiuti vengano autorizzati soltanto “se lo Stato di esportazione non dispone dei mezzi tecnici e degli impianti necessari o dei siti di eliminazione richiesti per eliminare i rifiuti in questione secondo metodi ecologicamente razionali ed efficaci, oppure se i rifiuti in questione sono necessari come materia prima per l’industria del riciclaggio o del recupero dello Stato di importazione, oppure se il movimento oltre frontiera in questione è conforme ad altri criteri che saranno stabiliti dalle Parti purché detti criteri non siano in contraddizione con gli obiettivi della presente Convenzione.”<sup>34</sup>

La Convenzione di Basilea impone inoltre ad un’azienda che crea un danno ambientale a causa del rifiuto pericoloso esportato di sopportare i costi di

---

<sup>34</sup>[https://www.mase.gov.it/sites/default/files/Convenzione\\_di\\_Basilea\\_sul\\_controll\\_o\\_dei\\_movimenti\\_oltre\\_frontiera\\_di\\_rifiuti\\_pericolosi\\_e\\_sulla\\_loro\\_elimina\\_zione.pdf](https://www.mase.gov.it/sites/default/files/Convenzione_di_Basilea_sul_controll_o_dei_movimenti_oltre_frontiera_di_rifiuti_pericolosi_e_sulla_loro_elimina_zione.pdf)

quest'ultimo secondo il principio "chi inquina paga", che verrà spiegato più dettagliatamente nel prossimo paragrafo.

L'articolo 9 infine definisce il traffico illecito di rifiuti, le responsabilità e stabilisce l'impegno degli Stati a perseguire severamente quest'ultimo e affinché eventuali rifiuti di cui si fatica a trovare il responsabile vengano smaltiti al più presto e correttamente dallo stato in questione.

#### **2.1.4 CONVENZIONE DI OSPAR (1998)**

Un ulteriore sviluppo legislativo a seguito dei diversi incidenti avvenuti fu la Convenzione di Oskar, entrata in vigore il 25 marzo 1998 e redatta dall'allora Comunità Europea. Questa nuova convenzione andò a sostituire le convenzioni di Oslo del 1972 e quella di Parigi del 1974. La Convenzione di Oskar ha l'obiettivo di prevenire ed eliminare l'inquinamento marino e di proteggere la zona marittima dell'Atlantico nordorientale dagli effetti avversi delle attività umane. Nello specifico, lo scopo è quello di eliminare le emissioni, gli scarichi e le perdite di sostanze pericolose entro il 2020 e di raggiungere così concentrazioni quasi nulle di composti come diossine e PCB nell'ambiente marino. La convenzione è stata firmata e ratificata da Belgio, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Islanda, Irlanda, Lussemburgo, Paesi Bassi, Norvegia,

Portogallo, Spagna, Svezia, Svizzera e Regno Unito<sup>35</sup> che, con l'UE, cooperano per la protezione dell'ambiente marino dell'Atlantico nordorientale. Le misure adottate dalle parti mirano a salvaguardare la salute dell'uomo, preservare gli ecosistemi marini e ripristinare l'equilibrio delle zone marine che sono state danneggiate. A tal fine, le parti contraenti devono adottare programmi e misure in maniera individuale e congiunta e, di conseguenza, armonizzare le loro politiche e strategie.

Per ottemperare ai loro obblighi, le parti devono osservare due principi: il primo è quello di precauzione, ossia devono essere adottate misure preventive ogniqualvolta si possa ragionevolmente presumere che sostanze o energie introdotte nell'ambiente marino possano rappresentare un rischio, anche in assenza di una prova del nesso causale tra immissioni ed effetti. Esempi di rischi sono quello per la salute umana, danni a risorse biologiche o agli ecosistemi marini, oppure quello di ostacolare altri usi legittimi del mare.

Il secondo è il principio cosiddetto "chi inquina paga", cioè le spese derivanti dalle misure di prevenzione, controllo e riduzione dell'inquinamento sono a carico di colui che inquina e provoca il danno ambientale. Quindi, il soggetto che ha tenuto determinate condotte scorrette è tenuto a rispondere di quel danno. La convenzione di Oskar ha inoltre istituito una Commissione composta dai

---

<sup>35</sup> Divenuto Paese extra-UE a partire dal 1° febbraio 2020.

rappresentanti delle parti. Quest'ultima si occupa di discutere e successivamente adottare decisioni e raccomandazioni. Le decisioni diventano vincolanti per le parti contraenti dopo un periodo di duecento giorni, mentre le raccomandazioni non sono vincolanti. La suddetta Commissione ha il compito di vigilare sull'attuazione della convenzione; esaminare la situazione della zona marittima; verificare l'efficacia delle misure adottate; elaborare programmi volti a prevenire ed eliminare l'inquinamento marittimo; definire il suo programma di lavoro e creare gli strumenti necessari all'esecuzione di quest'ultimo<sup>36</sup>.

#### **2.1.5 CONVENZIONE DI STOCCOLMA (2001)**

Per quanto riguarda la legislazione internazionale, il punto di svolta cruciale riguardante le diossine è la Convenzione di Stoccolma adottata il 23 maggio 2001, un trattato internazionale legalmente vincolante che vieta la produzione, l'uso ed il rilascio di sostanze chimiche pericolose conosciute come inquinanti organici persistenti (POPs). Più di 120 Nazioni hanno firmato la Convenzione. Quest'ultima è considerata una svolta per la tutela dell'ambiente e della salute umana perché viene riconosciuto, per la prima volta, che il rilascio di determinati inquinanti tossici non può essere controllato, ma deve essere vietato. La Convenzione di Stoccolma, oltre a prevedere l'eliminazione di dodici composti, tra cui PCB, diossine, furani,

---

<sup>36</sup> APAT, *Diossine Furani e PCB*, 2006

diversi fitofarmaci e sottoprodotti della combustione, regola anche l'immissione sul mercato di nuovi composti chimici che abbiano caratteristiche di tossicità e persistenza tali da poterli classificare come POPs. È previsto, inoltre, per le parti firmatarie, oltre all'impegno di diminuire al minimo le emissioni di POPs nell'ambiente, il divieto di esportazione e importazione delle sostanze elencate nella Convenzione<sup>37</sup>.

Solo vent'anni più tardi, il Parlamento italiano ha approvato con la legge del 12 luglio 2022 n.93 la ratifica e l'esecuzione della Convenzione di Stoccolma sugli inquinanti organici persistenti. Per l'adozione di un piano d'azione, il Ministero della Transizione si è avvalso del supporto tecnico-scientifico dell'ISPRA. Verranno inoltre promosse dal Ministero iniziative per favorire la sensibilizzazione e la diffusione delle informazioni sui POPs, andando a stimare le quantità annuali di questi emesse e rilasciate annualmente nell'ambiente. Attualmente, siamo quindi purtroppo ancora ben lontani dall'obiettivo ma si stanno perlomeno delineando i primi passi per andare ad agire sul problema<sup>38</sup>.

---

<sup>37</sup> Unep, Convenzione di Stoccolma, 2019

<sup>38</sup> <https://www.mase.gov.it/pagina/convenzione-di-stoccolma>

## **2.2 LIMITI ALLE DIOSSINE SECONDO L'UNIONE EUROPEA E RECEPIMENTI ITALIANI**

Per quanto riguarda i limiti che l'Unione Europea ha stabilito per la contaminazione da diossine, furani e PCBdl, negli anni sono stati emanati diversi regolamenti e direttive europee che trattano di questa tematica applicata a diversi campi come prodotti alimentari, mangimi per animali, suolo e acque. Queste direttive e regolamenti venivano emanati a seguito di studi e approfondimenti svolti dall'EFSA, Autorità europea per la sicurezza alimentare. Nello specifico, il Regolamento CE 2375/2001 del Consiglio, del 29.11.01, e il Regolamento 466/2001/CE definiscono i limiti massimi di alcuni contaminanti, tra cui le diossine, presenti in alcuni alimenti, nello specifico prodotti di origine animale come carni e derivati del latte. Nel 2001 infatti, il comitato scientifico dell'alimentazione umana dell'Unione Europea (SCF<sup>39</sup>) ha adottato in data 30 maggio un parere sulla valutazione dei rischi delle diossine e PCBdl nei prodotti alimentari. Il comitato ha stabilito un valore cumulativo limite per la dose tollerabile settimanale (DST) di diossine pari a 14 picogrammi (pg<sup>40</sup>) di equivalente tossico

---

<sup>39</sup> Scientific Committee on Food

<sup>40</sup> Un picogrammo è un trilionesimo ( $10^{-12}$ ) di un grammo.

(TEQ) per chilogrammo di peso corporeo<sup>41</sup>. Successivamente, nel 2006, il Regolamento CE n. 1881/2006 della Commissione del 19 dicembre 2006 ha definito nuovamente i tenori massimi di alcuni contaminanti nei prodotti alimentari, andando a sostituire i sopracitati regolamenti del 2001. Per esempio, per quanto riguarda le carni di bovini e ovini e prodotti derivati, la somma di diossine (PCDD/F-TEQ) e PCB diossina-simili (PCB TEQ) è stata posta a 4,5 pg/g grasso. Per quanto riguarda il pollame invece a 4,0 pg/g grasso e la carne e i derivati dal suino a 1,5 pg/g grasso.

Nel 2018 però, l'EFSA ha pubblicato un nuovo parere scientifico sui rischi per la salute pubblica e per gli animali legati alla presenza di diossine e PCB diossina-simili nei mangimi e negli alimenti, concludendo che la nuova assunzione settimanale tollerabile di questi composti negli alimenti non debba superare i 2 pg TEQ (equivalente tossico)/kg di peso corporeo alla settimana. La nuova DST è di sette volte inferiore alla precedente dose tollerabile UE, stabilita nel 2001. Già diversi anni prima, i dati di cui disponevamo indicavano che una notevole parte della popolazione europea si trovava ancora al di sopra del limite della dose tollerabile settimanale secondo le diete alimentari che seguiva, assumendo molti più picogrammi di diossine di equivalente tossico (TEQ)/kg di peso corporeo a

---

<sup>41</sup> Proposta di regolamento del Consiglio recante modifica del regolamento CE n. 466/2001 della Commissione <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52001PC0495&from=DE>

settimana. Il dottor Hoogenboom dell'EFSA ha dichiarato nel 2018: "Le esposizioni medie ed elevate erano rispettivamente fino a cinque e 15 volte la nuova DST in adolescenti, adulti e anziani. Nei bambini piccoli e in altri bambini fino a 10 anni di età si è visto un simile spettro di superamento della DST"<sup>42</sup>. L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha successivamente riesaminato i fattori di tossicità equivalente definiti nel 2005 e a seguito di ciò e di stime dell'esposizione dell'uomo a questi contaminanti, la Commissione europea ha ritenuto necessario intervenire sui livelli massimi di questi composti in alcuni prodotti alimentari. Il 21 ottobre 2022 è stato pubblicato il Regolamento UE 2022/2002 che ha modificato il Regolamento CE 1881/2006 per i limiti massimi di diossine e PCBdl in alcuni prodotti alimentari. Queste nuove soglie sono entrate in vigore il 1° gennaio 2023. Le modifiche più importanti riguardano l'inserimento di valori massimi per quanto riguarda carne di caprini, equini, coniglio, cinghiale, selvaggina da penna, cervo, fegato di caprini, equini e la riduzione dei tenori massimi per latte crudo e prodotti lattiero-caseari. L'esempio sopracitato di soglie per quanto riguarda diverse carni è un'altra modifica interessante del nuovo Regolamento. Le carni di bovini e ovini, a cui è stata aggiunta anche quella caprina e i loro prodotti derivati, non possono superare una somma di diossine (PCDD/F-TEQ) e PCB diossina-simili (PCB TEQ) pari ai 4 pg/g grasso, contro i 4,5 pg/g grasso del Regolamento del 2006. Inoltre, il

---

<sup>42</sup> <https://www.efsa.europa.eu/it/press/news/dioxins-and-related-pcbs-tolerable-intake-level-updated>

limite per il pollame è passato a 3,0 pg/g di grasso (prima era 4,0 pg/g di grasso) mentre carne e derivati del suino a 1,25 pg/g di grasso (prima era 1,5 pg/g di grasso). Siccome la contaminazione di alimenti di origine animale è direttamente correlata alla contaminazione dei mangimi, è stato ritenuto indispensabile definire i limiti anche per questi prodotti. L'Italia, recependo diverse direttive comunitarie tra cui la Direttiva 2002/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, con il D.Lgs. 10/5/2004 n.149 ha fissato i valori limite massimi di sostanze e prodotti indesiderabili nei mangimi per animali. Inoltre, con la Direttiva 2005/7/CE della Commissione del 27 gennaio 2005, sono stati anche stabiliti i requisiti per la determinazione dei livelli di diossine e PCB diossina-simili nei mangimi. Infine, la Commissione con la raccomandazione del 3 dicembre 2013<sup>43</sup> sulla riduzione della presenza di diossine, furani e PCB nei mangimi e negli alimenti, ha ritenuto di dover sottolineare l'importanza da parte degli Stati membri, di effettuare controlli sulla presenza di questi composti su mangimi e alimenti e ha inoltre indicato alcuni prodotti nello specifico come le uova. Nel caso in cui i limiti non siano rispettati, è fondamentale l'identificazione della fonte di contaminazione e l'impegno da parte dello Stato a ridurla o eliminarla. Per quanto riguarda il suolo, il 1° marzo 2019 viene emanato dal Ministero dell'Ambiente il Decreto n. 46, regolamento relativo agli interventi di bonifica, di

---

<sup>43</sup> Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea del 4.12.2013

ripristino ambientale e di messa in sicurezza, d'emergenza, operativa e permanente, delle aree destinate alla produzione agricola e all'allevamento, che ha modificato alcune parti dell'articolo 241 del decreto legislativo 3 aprile 2006 n. 152. Nello specifico, sono state modificate le concentrazioni soglia di contaminazione (CSC) per i suoli delle aree agricole e sono stati fissati a 6 ng/kg di sostanza secca WHO-TEQ per la sommatoria di diossine, furani e PCBdl, rispetto ai 10 ng/kg di sostanza secca WHO-TEQ (esclusi I PCB-DL) del decreto legislativo del 2006<sup>44</sup>. Per quanto riguarda la disciplina dei limiti di accettabilità della contaminazione dei suoli e dei sottosuoli (le CSC) dedicati ad uso pubblico o privato più in generale invece, quella del decreto legislativo del 3 aprile 2006 n.152 è rimasta invariata a quella del D.M. del 25/10/1999 n. 471. La legge ha fissato per diossine e furani i seguenti valori di concentrazione limite accettabile:  $1 \cdot 10^{-5}$  mg/kg per i siti ad uso di verde pubblico, mentre per i siti ad uso commerciale, industriale, privato e residenziale il limite è di  $1 \cdot 10^{-4}$  mg/kg. Questi valori sono da intendersi come sostanza secca e convertiti in TEQ. Recentemente, il Consiglio e il Parlamento hanno raggiunto un accordo sulla revisione degli allegati del regolamento relativo agli inquinanti organici persistenti (POPs) e hanno stabilito ulteriori restrizioni alla presenza di tali sostanze nei rifiuti che verranno trattati nel paragrafo successivo.

---

<sup>44</sup> Decreto del 1 marzo 2019, n.46, Gazzetta Ufficiale n.132 del 7/06/2019

Per attuare un'economia circolare e quindi utilizzare i rifiuti come materia prima seconda è necessario che siano puliti e con il minimo contenuto possibile di sostanze inquinanti. A questo proposito, la normativa in merito ai rifiuti e agli impianti industriali è disciplinata dal D.M. 12/07/1990 poi abrogato dal D.lgs. 152/2006, e dalla direttiva 2010/75/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 24 novembre 2010, attuata in Italia con il D.lgs. del 4 marzo 2014, n. 46<sup>45</sup> che assegnano il valore limite di emissione medio per diossine e furani di 0,1 ng/m<sup>3</sup>, calcolato secondo un periodo di campionamento minimo di 6 ore e massimo di 8 ore. Gli impianti di incenerimento devono ovviamente anche essere progettati, costruiti, attrezzati e fatti funzionare in maniera da non superare i valori limite di emissione.

Il nuovo Regolamento UE 2022/2400 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 novembre 2022, come sopracitato, ha apportato modifiche agli allegati IV e V del precedente Regolamento UE 2019/1021 relativo agli inquinanti organici persistenti (POPs). L'obiettivo del regolamento del 2019 era quello di tutelare la salute umana e l'ambiente dai POPs, vietando, eliminando gradualmente il prima possibile o limitando la fabbricazione, l'immissione in commercio e l'uso di sostanze pericolose soggette alla convenzione di Stoccolma. Il risultato auspicabile è quello dapprima di ridurre al minimo e successivamente l'eliminazione, ove

---

<sup>45</sup> Il quale ha modificato diversi articoli del D.lgs. del 3 aprile 2006, n.152.

possibile, del rilascio di tali sostanze. Inoltre, gli Stati sono tenuti ad istituire disposizioni concernenti i rifiuti costituiti da tali sostanze, sia che ne contengano sia che ne siano contaminati.

Con il nuovo Regolamento del 2022, il Consiglio e il Parlamento hanno pertanto convenuto di aggiungere nuove sostanze chimiche all'elenco degli inquinanti organici persistenti e di limitarne la presenza nei rifiuti rendendo più restrittivi i valori limite di concentrazione. Inoltre, secondo il nuovo regolamento, i rifiuti che contengono una concentrazione di PCDD/F superiore ai 15 µg/kg TEQ<sup>46</sup> non possono essere smaltiti o recuperati in conformità alla pertinente legislazione dell'Unione.

Il valore di 15 µg/kg continua ad applicarsi alle ceneri e alla fuliggine provenienti dalle abitazioni private contenenti o contaminate da dibenzo-p-diossine e dibenzofurani policlorurati (PCDD e PCDF) e PCBdl fino al 31 dicembre 2024. Per questi inquinanti che possono essere contenuti nelle ceneri e nella fuliggine provenienti da abitazioni private, il valore di 5 µg/kg si applicherà a decorrere dal 1° gennaio 2025. Il valore limite di diossine, furani e PCBdl nelle ceneri volatili provenienti da unità di biomassa per la produzione di calore ed energia è stato fissato a 5 µg/kg a partire dal 31 dicembre 2023. L'obiettivo è di consentire agli

---

<sup>46</sup> o TEF “Toxic equivalency factor”

Stati membri di esaminare la situazione in modo più dettagliato e attuare il più efficacemente possibile il regolamento. Gli Stati membri dovranno raccogliere i dati e metterli a disposizione entro il 1° luglio 2026. Questi valori limite saranno riesaminati 5 anni dopo l'entrata in vigore del regolamento. Per quanto riguarda il contenuto nelle acque il D. Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 Norme in materia ambientale<sup>47</sup> fissa per diossine e PCB i valori massimi ammissibili: per PCDD/F, in sommatoria, è previsto il limite di  $4 \times 10^{-6}$  µg/l, mentre per le PCB di 0,01 µg/l.

Per quanto riguarda il contenuto di diossine nelle acque destinate al consumo umano invece, il D. Lgs. del 23 febbraio 2023 n.18, attuazione della direttiva UE 2020/2184, non fissa alcun limite al momento per queste sostanze. Al contrario, l'Agenzia per la protezione dell'ambiente statunitense (EPA) nel documento "Drinking Water Standards and Health Advisories"<sup>48</sup> (edizione 2004) relativo alle acque destinate al consumo umano, fissa il valore massimo di PCB a  $5 \times 10^{-4}$ .

---

<sup>47</sup> Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2006

<sup>48</sup> EPA, 2004. *Edition of the Drinking Water Standard and Health Advisories*, EPA 822-R-04-005, Office of Water U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC

### **2.3 DIOSSINE E CASI DI ATTUALITA'**

Nonostante possa sembrare un problema di inquinamento superato, la presenza di queste sostanze è ancora alta in prodotti che ancora oggi consumiamo in maniera inconsapevole. Questa via di contaminazione per l'uomo è la più rischiosa e fa sì che queste sostanze si accumulino nei tessuti adiposi degli esseri viventi e che causino tutte le conseguenze negative della tossicità di queste sostanze. A questo si aggiungono i diversi casi che si continuano a susseguire di incendi, dolosi e non, di discariche e depositi di diverso materiale. In questo paragrafo verranno presentati casi recenti di attualità dove è stata riscontrata la presenza di diossine in alimenti e prodotti destinati all'uso umano o nell'atmosfera.

Il primo caso d'attualità risale ai primi di agosto 2024 quando decine di sacchetti contenenti carbonella per barbecue sono stati sequestrati da circa una cinquantina di negozi "do it yourself" in tutta Italia. Il motivo del sequestro è la presenza di sostanze tossiche, tra cui idrocarburi e diossine. Dall'Alto Adige partiva un traffico internazionale di rifiuti illeciti, infatti due imprese altoatesine anziché smaltire la cenere dei processi di piro-gassificazione come rifiuto, la vendevano ad una ditta austriaca. Quest'ultima la trasportava poi all'estero, in Croazia e Serbia, dove veniva trasformata in bricchette per barbecue grazie all'aggiunta di materiale esterno anche plastico. Le confezioni, falsamente certificate, venivano poi vendute ai negozi di bricolage in Svizzera, Germania e Italia come carbone di legna. Uno di

questi, Obi-Italia Srl, ha comunicato di aver ritirato le bricchette dai suoi punti vendita e di costituirsi parte civile. Gli indagati in questione dovranno rispondere dei reati di traffico illecito di rifiuti e frode in commercio<sup>49</sup>.

A questo grave danno, si aggiungono quelli di continui incendi, dolosi o meno, di discariche e depositi di rifiuti. Fra tutti l'ultimo esempio recente: l'incendio che risale ai primi di agosto 2024 in zona Ponte Mammolo a Roma, dove sono stati registrati livelli di diossina molto alti e sono stati posti ai residenti limitrofi diversi divieti, come quello di consumare e vendere alimenti di origine vegetale e animale e foraggi appartenenti alla zona intorno ad un chilometro dall'incidente. Secondo l'Arpa Lazio, i valori di diossine riscontrati erano molto alti e il campionamento a pochi giorni dall'incendio riportava 92 pg/m<sup>3</sup> nonostante il limite di sicurezza posto dall'Organizzazione Mondiale della Sanità che non dovrebbe superare i 0,3 pg/m<sup>3</sup>.

L'ultimo caso analizzato riguarda integratori alimentari di Omega-3 prodotti in Cina. Il Consumer Council cinese qualche anno fa ha esaminato diversi campioni di integratori alimentari scoprendo all'interno di questi diverse sostanze tossiche, tra cui diossine e PCBdl. Sebbene la quantità di queste molecole non superasse i limiti consentiti dall'Unione Europea per prodotti destinati al consumo umano, l'idea che all'interno di integratori alimentari, i quali vengono normalmente

---

<sup>49</sup> <https://ilsalvagente.it/2024/08/06/maxi-sequestro-di-carbonella-tossica-e-obi-ritira-le-bricchette>

acquistati con fiducia dal consumatore per apportare miglioramenti alla propria salute, siano stati ritrovate sostanze cancerogene non permette a coloro che li acquistano di rimanere fiduciosi e sereni<sup>50</sup>.

Questi ulteriori casi più attuali di contaminazione da diossine, anche in prodotti dove normalmente non ce lo si aspetta, conferma l'idea che c'è ancora molta strada da fare nella sensibilizzazione della comunità sulle conseguenze che azioni negative intraprese con superficialità in realtà abbiano, provocando gravi danni all'ambiente e agli organismi viventi. È necessario quindi diffondere informazioni sulla pericolosità di queste sostanze e sugli effetti che provocano soprattutto sulla salute umana, come la loro cancerogenicità, ma anche su come l'uomo venga contaminato da queste sostanze, provando a trasmettere l'idea che siamo quello che mangiamo e che le conseguenze di incendi dolosi, per esempio, possono essere molto dannose non solo per l'ambiente. A questa necessaria presa di consapevolezza e di responsabilità che abbiamo nei confronti di noi stessi, ma soprattutto degli altri e dell'ambiente che ci circonda e ci ospita, subentra la necessità di capire come poter bonificare siti come Seveso e poter quindi degradare sostanze nocive e tossiche. La tecnologia, l'innovazione e la scienza hanno fatto negli ultimi anni passi da gigante

---

<sup>50</sup> Hong Kong Consumer Council, *Test on Fish Oil Supplements Revealed Omega-3 Fatty Acid Content Varied Greatly Among Samples Harmful Contaminants Detected in All Samples with 4 Exceeding EU Limits Industry Urged to Promptly Improve*, press release 15 Novembre 2022.

riguardo questo tema e nel prossimo capitolo verranno presentate diverse possibilità, soluzioni e collaborazioni degli ultimi anni.

Parte terza

**Nuove alternative di bonifiche:  
un focus sui lombrichi come  
possibilità per il biorisanamento  
del suolo**

### **3. UN BREVE EXCURSUS SULLE TECNICHE FISICHE DI BONIFICA E IL BIORISANAMENTO**

Finora ci siamo principalmente concentrati sull'Europa ma l'inquinamento da diossina non è però un problema solo europeo ma piuttosto globale, soprattutto nei Paesi più poveri dell'Asia e dell'Africa. Infatti, mentre le emissioni di diossina nei Paesi sviluppati sono rimaste a livelli relativamente bassi e stabili grazie alle misure di controllo, quelle negli Stati a basso reddito sono ancora relativamente alte o hanno continuato ad aumentare negli ultimi anni, come riportano alcuni studi<sup>51</sup>. Come abbiamo visto infatti, questi inquinanti ambientali tossici derivano principalmente da processi produttivi come sottoprodotti indesiderati, da inceneritori di rifiuti non controllati o tecnologicamente non avanzati e da combustioni a cielo aperto. Uno dei motivi scatenanti è da imputare alla delocalizzazione, molti Paesi industrializzati infatti hanno deciso di delocalizzare i propri impianti produttivi in Paesi in via di sviluppo, dove potevano permettersi salari più bassi ed erano presenti normative meno stringenti anche riguardo le emissioni di inquinanti, oltre che per quanto riguarda la salute e la sicurezza sul lavoro.

In questo capitolo andremo ad analizzare come è possibile bonificare terreni e

---

<sup>51</sup> Rongrong Lei et al., *Global status of dioxin emission and China's role in reducing the emission*, Journal of Hazardous Materials.

prodotti contaminati da diossine, andando ad esaminare ed esporre alcuni esempi e nuovi studi recenti.

Sono stati ideati e adattati diversi metodi e tecnologie di bonifica che possono essere classificati in tre grandi gruppi: trattamenti fisici, chimici e biologici. I trattamenti fisici e chimici includono per esempio l'incenerimento, la fotolisi e l'uso di ossidanti e riducenti. Sebbene l'incenerimento sia stata una tecnica poco costosa rispetto ad altre tecniche fisico-chimiche per la degradazione di grandi quantità di diossina, dovendo trattare una grande quantità di terreni e sedimenti contaminati ha comunque i suoi svantaggi<sup>52</sup>.

Normalmente, per quanto riguarda la bonifica di terreni contaminati da diossina, si usano metodi tradizionali ex-situ, ossia non direttamente nel sito inquinato. Infatti, essi prevedono la rimozione dell'inquinante in seguito all'escavazione del terreno contaminato e il successivo trattamento di bonifica che può essere "on site" se fatto avvenire sul luogo dell'escavazione, oppure "off site" se è necessario ricorrere a impianti localizzati altrove, come avverrà per il caso Seveso. Si tratta quindi di tecnologie fisiche, che consistono nel separare la parte di suolo contaminata da quello sano e il conseguente smaltimento in discarica. Infatti, solitamente il terreno

---

<sup>52</sup> Priyanka Mary Sebastian and K. V. Bhaskara Rao, *Approaches in Bioremediation of Dioxins and Dioxin-Like Compounds – A Review on Current and Future Prospects*, *Nature Environment and Pollution Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1381-1387, 2022.

contaminato viene estratto, portato nella discarica più limitrofa possibile e sostituito con terreno pulito.

Questa alternativa fisica finora utilizzata di bonifica *ex-situ* presenta diversi svantaggi non solo economici e per gli operatori durante le fasi di scavo, movimentazione e trasporto del terreno inquinato ma anche per quanto riguarda la stessa risorsa del suolo. Innanzitutto, è una risorsa rinnovabile ma che, sebbene detenga la capacità di rigenerarsi, lo fa molto lentamente. Al contrario, l'attività antropica lo degenera molto velocemente. Il suolo inoltre ha diverse funzioni ben precise e indispensabili alla vita terrestre che sono quella di accettore di rifiuti che produciamo; quella di regolazione, in quanto regola diversi processi naturali come il ciclo dell'acqua e del carbonio; di produzione, infatti produce e offre diverse sostanze, materie prime e prodotti che utilizziamo e di cui ci nutriamo e quella di offrire la possibilità a noi di sfruttarne la sua bellezza attraverso passeggiate per esempio. La bonifica fisica che preleva il terreno spesso va ad intaccare lo strato di suolo abbastanza superficiale chiamato *topsoil*, che è la zona di massima attività biologica. In questo strato infatti si trova l'humus, un insieme di sostanze derivate dalla decomposizione di resti organici animali e vegetali, ricco di elementi essenziali per la crescita delle piante come azoto, zolfo, fosforo e ferro<sup>53</sup>. Rimuovendo quindi la parte superficiale del terreno contaminato si riduce anche la

---

<sup>53</sup> <https://www.fao.org/4/w8594e/w8594e0g.htm>

sostanza organica drasticamente e si rende quell'appezzamento di suolo ancora più desertico.

Questi svantaggi hanno di fatto aperto la strada alle tecniche biologiche di biorisanamento. Quest'ultime sono tecnologie biologiche di bonifica in-situ, ossia direttamente sul sito inquinato senza prevedere l'escavazione di terreno. Queste tecnologie sfruttano le capacità dei microrganismi di ottenere la mineralizzazione o la trasformazione dei contaminanti in forme meno tossiche, meno mobili oppure più tossiche ma meno biodisponibili. In generale, le tecniche di biorisanamento prevedono modificazioni ambientali ottenute mediante aggiunta di nutrienti, aerazione forzata e aggiunta di appropriati organismi degradativi. Queste tecniche non invasive presentano vantaggi quali la possibilità di intervenire su un largo numero di molecole inquinanti e il loro potenziale effetto benefico sulla struttura e sulla fertilità del terreno. D'altro canto, però, presentano anche svantaggi, quali il fatto di essere più lente di tecnologie chimiche o fisiche, di essere influenzate dalle condizioni ambientali e dal fatto che non funzionano sfortunatamente per tutti i contaminanti. Queste tecniche, infatti, le quali sfruttano principalmente il metabolismo di alcuni microrganismi, vengono usate principalmente per bonificare terreni contaminati da sostanze diverse dalle diossine<sup>54</sup>. Ultimamente però sono state proposte dalla comunità scientifica alcune

---

<sup>54</sup> A. Sofo, *Tecniche di biorisanamento in situ ed ex situ, con particolare riferimento alla biodegradazione in siti contaminati da idrocarburi*, 2010.

nuove soluzioni per il biorisanamento di suoli contaminati da diossine che andremo ad illustrare nei prossimi paragrafi.

### **3.1 BONIFICA SEVESO METODO FISICO EX-SITU**

Recentemente, per poter proseguire i lavori dell'autostrada Pedemontana, è stato approvato il piano di bonifica dei terreni interessati dal disastro di Seveso del 1976. La metodologia scelta è una tecnologia fisica ex-situ e il conseguente smaltimento degli inquinanti in discariche off-site. Quasi ottanta mila tonnellate di terreno verranno rimosse e trasportate su ruota verso discariche autorizzate allo smaltimento di queste sostanze, localizzate tra Lombardia, Piemonte, Emilia-Romagna e Toscana. Tra il 2008 e il 2019 sono stati analizzati seicento campioni di terreno e sono state individuate ventitré contaminazioni nella parte di terreno più esterno, chiamato "top soil", ossia tra zero e venti centimetri di profondità e quattordici nel suolo intermedio, esattamente al di sotto. L'Arpa Lombardia controllerà gli obiettivi di bonifica attraverso l'analisi di campioni di terreno. Durante le attività di bonifica è previsto l'utilizzo di mezzi e procedure per ridurre l'eventuale produzione di polveri, mediante sistemi di abbattimento delle polveri, bagnatura delle piste di cantiere e pulizia del manto stradale, lavaggio manuale delle ruote dei mezzi con idropulitrici, predisposizione di reti per il contenimento polveri in prossimità degli scavi e interruzione degli scavi nelle giornate ventose. Inoltre,

durante le attività di bonifica, sarà effettuato un monitoraggio delle polveri nell'aria, andando a misurare il particolato Pm10 e Pm2.5 ed il parametro diossine attraverso nove centraline di rilevamento. Il trattamento di bonifica si stima che durerà circa centoottanta giorni e costerà sedici milioni di euro<sup>55</sup>.

A questo metodo più classico e tradizionale, gli scienziati ne stanno studiando e affiancando di nuovi, meno costosi e biologici, con lo scopo di mantenere e proteggere il suolo e le sue caratteristiche importanti come la fertilità. Nel prossimo paragrafo verrà presentata una nuova possibilità studiata in Svizzera, la quale verrà sperimentata nei prossimi mesi.

### **3.2 BONIFICA TRAMITE MICRORGANISMI**

Una tecnica biologica di biorisanamento di sedimenti inquinati, già ampiamente sperimentata, prevede l'uso della tecnologia microbica, con batteri e funghi, per detossificare le diossine. Questa è considerata un'alternativa più efficace, economica ed ecologicamente sostenibile. Questa biodegradazione utilizza i microrganismi per scomporre le sostanze chimiche potenzialmente pericolose in composti più piccoli e non tossici, utilizzando il loro meccanismo metabolico o enzimatico. L'entità e il risultato della biodegradabilità dipendono molto dalla

---

<sup>55</sup> <https://www.comune.seveso.mb.it/it/news/pedemontana-bonifica-al-via>

tossicità, dalla concentrazione dei contaminanti, dal tipo di microrganismi coinvolti e dalle proprietà del terreno contaminato. La concentrazione dei contaminanti, in particolare di diossine e furani, può essere ridotta sia da meccanismi aerobici, cioè in presenza di ossigeno, sia anaerobici, ossia in assenza di ossigeno. La differenza fondamentale tra i due è che la degradazione aerobica avviene per i congeneri meno clorurati, mentre il percorso anaerobico è necessario per i congeneri altamente clorurati<sup>56</sup>.

In condizioni di aerobiosi, il microrganismo coinvolto nella degradazione delle diossine intraprende una via di degradazione ossidativa. Diversi ceppi batterici che possiedono la capacità di degradare diossine e furani sono stati isolati e studiati. Il ceppo RW1 di *Sphingomonas wittichii* è stato il microrganismo più studiato in grado di degradare la diossina attraverso processi metabolici ma, come anticipato, degrada solo le dibenzo-p-diossine a basso grado di clorurazione e i dibenzofurani<sup>57</sup>. Una delle tecniche più favorevoli per la detossificazione di diossina altamente clorurata è la dechlorazione riduttiva. I congeneri altamente clorurati sono difficilmente degradabili per via aerobica ma al contrario possono essere degradati

---

<sup>56</sup> Priyanka Mary Sebastian and K. V. Bhaskara Rao, *Approaches in Bioremediation of Dioxins and Dioxin-Like Compounds – A Review on Current and Future Prospects*, *Nature Environment and Pollution Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1381-1387, 2022.

<sup>57</sup> A. Sofo, *Tecniche di biorisanamento in situ ed ex situ, con particolare riferimento alla biodegradazione in siti contaminati da idrocarburi*, 2010

con successo da un meccanismo anaerobico. Il processo di dechlorazione riduttiva scinde il legame carbonio-alogeno e rimuove il cloro dall'anello aromatico in modo anaerobico e usando accettori di elettroni. Il prodotto risultante completamente o parzialmente dechlorurato subisce poi un'ulteriore degradazione con altre tecniche aerobiche e anaerobiche. I batteri legati al genere *Dehalococcoides* sono stati trovati capaci di trasformare diossine altamente clorurate a un composto molto meno clorurato<sup>58</sup>.

Al contrario di certi batteri, il micelio di alcuni funghi come il *Phanerochaete chrysosporium* e il *Phanerochaete sordida* a radice bianca degrada molte dibenzo-p-diossine policlorurate. Si tratta di funghi isolati dal suolo, in grado di degradare un polimero molto complesso, la lignina, utilizzando un enzima extracellulare. Nella tabella 3 sono riportati i dettagli dei vari funghi e la loro capacità di biodegradazione di vari congeneri di diossina.

---

<sup>58</sup> Priyanka Mary Sebastian and K. V. Bhaskara Rao, *Approaches in Bioremediation of Dioxins and Dioxin-Like Compounds – A Review on Current and Future Prospects*, *Nature Environment and Pollution Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1381-1387, 2022.

| Organism  | Compound degraded                      | Duration | Percentage of degradation | Reference                  |
|---|--|----------|---------------------------|----------------------------|
| <i>Rigidoporus</i> sp. FMD21  | 2,3,7,8- Tetrachlorodibenzo-p-dioxin   | 50 days  | 79.9%                     | (Dao et al. 2021)          |
| <i>Phanerochaete chrysosporium</i> OGC101   | 2,7- Dichlorodibenzo-p-dioxin          | 27 days  | 50 %                      | (Valli et al. 1992)        |
| <i>P. velutina</i> ,<br><i>Stropharia rugosoannulata</i> ,<br><i>Gymnopilus luteofolius</i> | Polychlorinated dibenzo-p-dioxin/Furan | 77 days  | 67%                       | (Anasonye et al. 2014)     |
|   |  | 70 days  | 61%                       |                            |
| <i>Phlebia brevispora</i>   | 1,3,6,8- Tetrachlorodibenzo-p-dioxin   | 90 days  | 69%                       | (Kamei et al. 2009)        |
| <i>P. sordida</i> YK-624  | Polychlorinated dibenzo-p-dioxin/Furan | 14 days  | 76%                       | (Takada et al. 1996b)      |
|   |  |          | 70%                       |                            |
| <i>Pleurotus pulmonarius</i>  | Polychlorinated dibenzo-p-dioxin/Furan | 72 days  | 96%                       | (Kaewlaoyoong et al. 2020) |
| <i>Panellus styticus</i>  | 2,7- Dichlorodibenzo-p-dioxin          | 40 days  | 100 %                     | (Sato et al. 2002)         |

Tabella 3 Capacità di biodegradazione di diversi funghi

Infine, a dimostrazione di quanto sostenuto finora, uno studio di Nam et al. ha valutato la rimozione di PCDD e PCDF dalle ceneri volanti, una delle principali fonti di contaminazione da diossina, utilizzando un biocatalizzatore che contiene batteri e funghi in grado di degradare le diossine. Questo trattamento ha portato alla rimozione del 68,7% di PCDD/F in 21 giorni<sup>59</sup>.

Nei prossimi paragrafi verranno presentate nel dettaglio alcune tecnologie di bonifica biologica in fase di applicazione.

---

<sup>59</sup> Priyanka Mary Sebastian and K. V. Bhaskara Rao, *Approaches in Bioremediation of Dioxins and Dioxin-Like Compounds – A Review on Current and Future Prospects*, *Nature Environment and Pollution Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1381-1387, 2022.

### **3.2.1 UN'ALTERNATIVA DI BONIFICA BIOLOGICA IN-SITU IN SVIZZERA**

Nel 2021 a Losanna, città della Svizzera occidentale, è stata scoperta una contaminazione da diossina causata da un vecchio inceneritore in funzione nel centro città dal 1958 al 2005. Un totale di più di un milione di metri quadri di terreno, circa trecentoquaranta campi da calcio, è stato contaminato dalle diossine emesse dall'inceneritore di Vallon. In alcuni appezzamenti, l'inquinamento da diossina è ben al di sopra del livello accettato in Svizzera, anche di cinque volte superiore. Al momento le autorità locali devono affrontare la costosa opera di bonifica, a seguito soprattutto della preoccupazione dei cittadini e della loro mobilitazione. Tra le varie misure prese in considerazione, le autorità stanno finanziando un progetto della start-up svizzera di biotecnologie Tibio Sagl, che ha sviluppato una tecnica di biorisanamento che utilizza microrganismi per decontaminare il suolo. Questi batteri sono stati direttamente prelevati dal suolo di Losanna, isolati e potenziati al fine di degradare la diossina. Secondo i dati disponibili, in un mese, i batteri, coltivati nel laboratorio di Chavornay nel Canton Vaud, sono in grado di dimezzare la quantità di diossina presente. Al contrario del metodo deciso e iniziato all'inizio dell'estate 2024 a Seveso, in Italia, che prevede la bonifica secondo un metodo fisico ex-situ, con l'escavazione e il trasporto di materiale contaminato in discariche per lo smaltimento, il metodo

biologico di Tibio è in-situ. Infatti, il terreno contaminato viene trattato sul posto, senza necessità di scavare e trasportare il materiale con un camion. Il metodo deve ancora essere testato su larga scala e attualmente gli studiosi non hanno la certezza assoluta che funzionerà come previsto. Infatti, non è immediato per i batteri identificare la diossina ed eliminarla e potrebbero concentrarsi anche su altri nutrienti. Per questo motivo, i tempi di bonifica potrebbero allungarsi. Nei prossimi mesi saranno condotti test su terreni contaminati provenienti da tre siti. In caso di successo, i batteri saranno utilizzati su larga scala a partire dalla primavera del 2025. D'altro canto, se questo metodo funzionasse, permetterebbe di mantenere e proteggere una risorsa importante come quella del suolo e dei suoi componenti e sarebbe inoltre un'innovazione molto più sostenibile per la degradazione della diossina. Si andrebbe ad agire direttamente sul terreno evitando tutti quegli impatti legati al trasporto e allo smaltimento in discarica e quindi al consumo di energia e all'emissione di inquinanti. Il successo di questo studio potrebbe cambiare il modo in cui viene affrontato l'inquinamento da diossine a livello globale<sup>60</sup>.

---

<sup>60</sup> <https://www.tio.ch/aziende-ticinesi-informano/1747190/losanna-citta-ticinese-biorisanamento-diossine>

### **3.2.2 UN NUOVO PROGETTO DI BONIFICA DI SEDIMENTI MARINI - “LIFE SEDREMED”**

Sfortunatamente, negli anni non solo sedimenti terrestri sono stati inquinati da diossine ma anche quelli marini. Un caso fra tutti è l'ex area industriale di Bagnoli presso la città metropolitana di Napoli. La zona era caratterizzata da industrie siderurgiche, di lavorazione dell'amianto (Eternit), di produzione di fertilizzanti (Federconsorzi) e di cemento (Cementir). A metà del Novecento costituiva il più grande polo industriale del sud Italia. Una volta chiuso il polo industriale a fine anni Novanta, l'impatto sulla popolazione locale è enorme: circa settemila famiglie rimangono senza la loro principale fonte di reddito e l'area circostante risulta essere molto inquinata. Questa dinamica è sfortunatamente caratteristica di molte città ex-industriali in Europa, quindi la necessità di tecniche innovative di decontaminazione risulta necessaria per ripristinare la competitività territoriale e porre fine alle crisi socio-economiche che derivano dalla deindustrializzazione. Attualmente, la contaminazione dei sedimenti di Bagnoli è caratterizzata da alti livelli di inquinanti organici ossia idrocarburi alifatici, policlorobifenili (PCB), diossine e metalli tossici come arsenico, piombo, zinco, cadmio, rame e mercurio, i cui valori superano pericolosamente i limiti fissati dalla legge italiana con il Decreto Ministeriale 56/09. Inoltre, ad oggi circa tre chilometri di costa di Bagnoli non risultano balneabili, anche a causa dello scarico di acque reflue urbane non

trattate. Per questo, è infatti necessario parallelamente un adeguamento e miglioramento del sistema fognario.

Per la bonifica di aree marine come questa, cioè con quest'alta presenza di inquinanti, la soluzione adottata da sempre è il dragaggio, ossia lo scavo dei sedimenti, e il successivo smaltimento e bonifica di questi oppure il deposito di questi in vasche di colmata, cioè casse di raccolta a tenuta stagna che vengono poi destinate ad altri usi, per esempio quello ferroviario o portuale. Data l'elevata estensione dell'area costiera inquinata di Bagnoli, corrispondente a quattordici chilometri quadrati di sedimenti da decontaminare, questa strategia di bonifica ex-situ risulterebbe molto costosa e ad alto rischio di disastro ambientale; infatti, lo scavo dei sedimenti marini rimetterebbe in circolo grandi quantità di inquinanti attualmente stratificati nel suolo<sup>61</sup>.

Per questi motivi, è stata studiata una soluzione alternativa ed è nato il progetto "Life Sedremed", finanziato dall'Unione Europea per ridurre la concentrazione di contaminanti organici e la biodisponibilità di metalli tossici nei sedimenti. Questa tecnica permetterebbe la riduzione dei costi di decontaminazione dell'85% rispetto a tecniche convenzionali. Nello specifico, non solo i rischi ambientali verrebbero

---

<sup>61</sup> <https://life-sedremed.eu/it/homepage/>

ridotti ma il costo di gestione dei sedimenti passerebbe da circa centocinquanta euro a circa venticinque euro per m<sup>3</sup>.

L'obiettivo del progetto in questione è il restauro ambientale della zona e il ripristino della sua balneabilità, con il fine di restituire l'area in condizioni ottimali per il suo sfruttamento da parte dei cittadini, ripristinare di conseguenza la qualità della loro vita e il loro benessere e facilitare lo sviluppo socio-economico della comunità locale.

Il coordinatore del progetto è la Stazione Zoologica Anton Dohrn di Napoli (Szn), Istituto Nazionale di Biologia, Ecologia e Biotecnologie Marine che lavora in collaborazione con un gruppo multidisciplinare e intersettoriale di sette partner provenienti da quattro Paesi dell'Unione Europea tra cui due fornitori di tecnologia basati in Belgio e in Finlandia, due partner accademici per il monitoraggio tra cui l'Università Politecnica delle Marche e una startup che gestisce gli aspetti di divulgazione e comunicazione del progetto.

“Life Sedremed” è un processo di bonifica in-situ dei sedimenti marini contaminati che si fonda sull'implementazione di due tecnologie quali il biorisanamento e l'elettrocinetica. La prima fase e tecnologia consiste nello sviluppo di un prototipo per l'applicazione di microrganismi all'interno dei sedimenti e la seconda nella

trasmissione di corrente elettrica per stimolare le reazioni di biorisanamento<sup>62</sup>. La prima tecnologia sfrutta il metodo della biofissazione, che consente di immobilizzare i microrganismi su supporti minerali naturali, consentendo una maggiore durata di vita dei microrganismi e quindi, una migliore efficienza di degradazione degli inquinanti. Inoltre, i supporti minerali utilizzati non sono di origine sintetica ma naturale, come il carbonato di calcio di origine marina, e consentono una maggiore efficienza di degradazione. Il secondo dei due elementi di innovazione sfrutta reazioni elettrocinetiche ed elettrochimiche, le quali vengono utilizzate per potenziare le reazioni di biorisanamento e abbattere quindi gli inquinanti organici tramite modelli di tensione pulsata. Questa tecnologia avanzata di bonifica migliora i processi naturali e utilizza fenomeni elettrochimici per generare radicali sulle superfici delle particelle dei sedimenti e fenomeni elettrocinetici ed elettro-osmotici per aumentare la disponibilità di contaminanti organici per il biorisanamento da parte dei microrganismi, la degradazione chimica o la rimozione meccanica. L'installazione di questi sistemi mira quindi a potenziare l'efficienza di degradazione degli inquinanti fornita dai microrganismi e attraverso un design specifico realizzato

---

<sup>62</sup> <https://www.aboutpharma.com/animal-health/anche-i-batteri-aiutano-a-decontaminare-il-mare-da-idrocarburi-diossine-e-metalli-pesanti/>

durante la fase di progettazione, i sistemi massimizzano il potenziale di bonifica delle matrici contaminate.

L'ulteriore novità è che questa tecnologia è già stata sperimentata in luoghi chiusi come porti e laghi ma questo progetto rappresenta la prima applicazione della tecnologia in mare aperto e quindi con forti correnti. Durante i test e la bonifica, verranno eseguiti monitoraggi innovativi da diversi partner, tra cui l'Università Politecnica delle Marche, che analizzeranno l'efficienza delle tecnologie di bonifica e l'impatto sulla biodiversità. L'Università Politecnica delle Marche ha infatti una vasta esperienza nell'analisi dell'ecologia e della biodiversità delle comunità bentoniche, cioè quelle specie in stretto contatto con il fondale marino che fungono da indicatori ambientali sullo stato ecologico dell'ecosistema, nella valutazione dell'impatto dei contaminanti a diversi livelli della catena alimentare marina e nello sviluppo di strategie e strumenti per il risanamento e ripristino degli ecosistemi.

Attualmente, il progetto sta seguendo una timeline ben precisa ed entro la fine di novembre 2024 terminerà la fase di test sul campo del nuovo prototipo tecnologico. Nei prossimi mesi saranno inoltre disponibili sul sito del progetto i risultati di bonifica ottenuti<sup>63</sup>.

---

<sup>63</sup> <https://life-sedremed.eu/it/biblioteca/>

I microrganismi non sono però l'unica alternativa di biorisanamento sostenibile; infatti, nel prossimo paragrafo verranno illustrate le ultime scoperte in merito a tecniche di bonifica biologiche tramite lombrichi.

### **3.3 I LOMBRICHI COME NUOVA POSSIBILITÀ PER IL BIORISANAMENTO DEL SUOLO**

Come abbiamo precedentemente visto, il suolo è purtroppo contaminato in molte parti del mondo ma sono i Paesi più sviluppati che sono i maggiori produttori e i responsabili di questo tipo di inquinamento, considerando per esempio che un quarto dell'uso mondiale di pesticidi appartiene a quest'ultimi. Allo stesso modo sono coloro che hanno creato il fenomeno della delocalizzazione, sposando siti produttivi in luoghi dove la legislazione e la normativa ambientale sono meno restrittive.

Alle soluzioni e ai progetti sopra presentati, diversi studi recenti, anche in Italia, si sono concentrati sull'uso del compostaggio con lombrichi per decontaminare suoli inquinati da diverse sostanze, come pesticidi, idrocarburi policiclici aromatici, metalli pesanti e diossine. Gli studi effettuati e gli incentivi forniti sono però ancora troppo pochi per avere informazioni sufficienti e perché venga diffuso in tutto il mondo un altro tipo di bonifica. È necessario quindi l'approfondimento di

determinate tecniche di biorisanamento affinché ci siano più alternative di bonifica disponibili sul mercato.

Il biorisanamento mediato dal compost è un processo biologico basato sulla combinazione del materiale di partenza per il compostaggio con il terreno contaminato. La maturazione del compost porta alla degradazione dell'inquinante. Il co-compostaggio con l'aiuto di microrganismi è considerato uno dei metodi efficienti per la degradazione di composti tossici. Il potenziale di compostaggio dipende però da vari fattori come il metabolismo microbico, l'umidità, la temperatura, il pH e le sostanze nutritive. La biodegradazione di siti contaminati da diossina può essere effettuata utilizzando batteri ottenuti da compostaggio aerobico con un'efficienza alta di rimozione oppure con lombrichi<sup>64</sup>. L'utilizzo dei lombrichi per decontaminare il terreno da diversi inquinanti andrebbe a risolvere diversi svantaggi, presentati nel paragrafo tre, per quanto riguarda la tecnica fisica ex-situ e andrebbe a migliorare e ripristinare le caratteristiche del suolo. In particolare, i lombrichi vengono sfruttati perché con le loro interazioni con le altre specie viventi e fattori abiotici come l'acqua e la temperatura, il loro ciclo di vita, la loro attività di scavo e di nutrimento, degradano, rimuovono o

---

<sup>64</sup> Priyanka Mary Sebastian and K. V. Bhaskara Rao, *Approaches in Bioremediation of Dioxins and Dioxin-Like Compounds – A Review on Current and Future Prospects*, *Nature Environment and Pollution Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1381-1387, 2022.

trasformano le sostanze inquinanti presenti nel suolo contaminato. Non solo quindi tramite l'assorbimento e la digestione rimuovono i contaminanti ma stimolano anche la crescita di microrganismi che contribuiscono alla decontaminazione del suolo. Gli inquinanti o vengono quindi digeriti dal lombrico e rimangono all'interno di esso oppure vengono ridotti in forme meno tossiche e poi degradati anche con l'aiuto di microrganismi. Le tane di questi importanti animali, con i residui dei lombrichi su di esse, diventano una zona favorevole allo sviluppo di microrganismi decontaminanti<sup>65</sup>.

Inoltre, i lombrichi influenzano positivamente le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche del suolo. Nello specifico, contribuiscono alla pedogenesi, ossia i vari processi che formano il suolo, al suo ricambio e all'aumento della sua porosità, proprietà fisica del terreno che ne aumenta la fertilità ed è fondamentale affinché riesca a trattenere l'acqua necessaria ma a non trattenerne troppa altrimenti creerebbe ristagno. La porosità, infatti, è definita come il volume dei pori del terreno fratto il volume totale del terreno. I pori sono gli spazi vuoti di dimensione più o meno grande che detiene il terreno tra le sue particelle solide. La porosità, quindi,

---

<sup>65</sup> Tagliabue F. et al, *A Systematic Review on Earthworms in Soil Bioremediation*. Appl. Sci. 2023, 13, 10239.

è un valore che indica la percentuale di spazi vuoti presenti in un certo volume di terreno (figura 8)<sup>66</sup>.

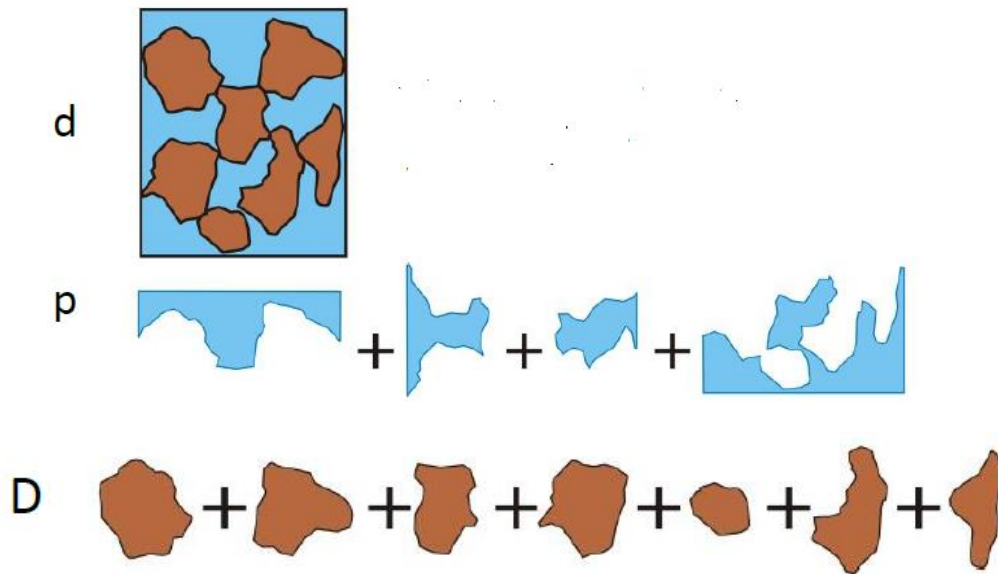


Figura 8

d = densità apparente: Massa di un campione di terreno indisturbato di volume noto

p = porosità: Volume complessivo di spazi vuoti del campione di terreno espresso in percentuale

D = densità reale: Peso specifico delle particelle di terreno del campione.

$$p = (D - d) / D \times 100$$

<sup>66</sup> Dipartimento di Agraria, Corso di Laurea in Scienze e Tecnologie Alimentari, Carmelo Santonoceto

I pori del terreno sono occupati da acqua e aria; infatti, qui avvengono importanti processi biologici dall'assorbimento radicale alla respirazione e acqua, aria, radici e microrganismi interagiscono tra loro e si sviluppano. Il valore assoluto della porosità non ha un'importanza alta nel caratterizzare le proprietà di un terreno quanto al contrario la dimensione dei pori è fondamentale. Per questo si parla di microporosità e macroporosità. La dimensione dei pori è correlata direttamente con la grandezza delle particelle solide del terreno. Con microporosità intendiamo il volume complessivo dei pori aventi dimensione inferiore agli 8  $\mu\text{m}$  e rappresenta la capacità del terreno a trattenere l'acqua. Con macroporosità invece si fa riferimento alla parte di porosità avente dimensioni superiori agli 8  $\mu\text{m}$  tali da non trattenere l'acqua contro l'azione della forza di gravità. Questa porosità è utile per far scivolare l'acqua in eccesso e rappresenta quindi al contrario la capacità del terreno a contenere aria (figura 9).

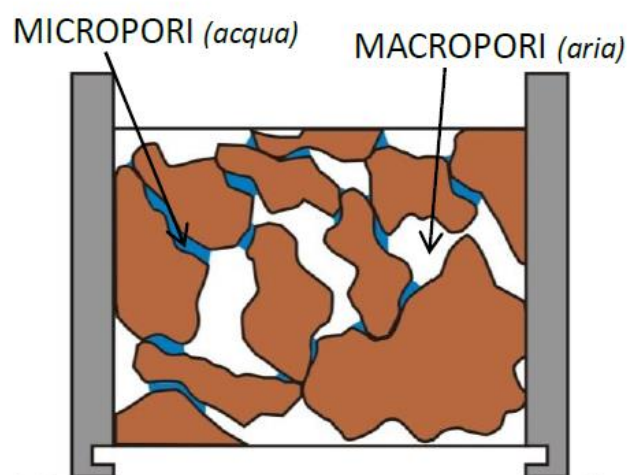


Figura 9

Per la vita delle piante, è necessario che le due porosità siano equilibrate nel terreno, circa 50% e 50%. Se il suolo presenta macroporosità in eccesso, come nei terreni sabbiosi, trattiene poca acqua e troppa aria, al contrario se si ha nel terreno una sproporzione verso la microporosità, come nei terreni argillosi, si creano problemi di ristagno e l'aria fatica a trovare spazio, favorendo la crescita di microrganismi anaerobi sfavorevoli e impedendo così la crescita e l'assorbimento delle radici<sup>67</sup>. Non solo i lombrichi sono fondamentali perché si occupano di ridistribuire gli elementi all'interno del suolo ma modificano anche l'architettura dei suoi pori.

### **3.3.1 I LOMBRICHI APPLICATI PER DECONTAMINARE TERRENI CONTENENTI METALLI PESANTI**

Attualmente le ricerche disponibili si sono focalizzate sull'uso dei lombrichi per decontaminare siti inquinati da idrocarburi policiclici aromatici, pesticidi ed elementi potenzialmente tossici tra cui i metalli pesanti. Su questi ultimi si sono soffermate parecchie ricerche e studi in diverse parti del mondo, ma la maggioranza ha utilizzato la specie di lombrico chiamata *Eisenia fetida* poiché ha veloci tempi di replicazione, è semplice da coltivare in laboratorio ed è molto suscettibile alle sostanze chimiche.

---

<sup>67</sup> Dipartimento di Agraria, Corso di Laurea in Scienze e Tecnologie Alimentari, Carmelo Santonoceto.

Per quanto riguarda l'elemento cadmio, per esempio, la percentuale media di riduzione del contaminante in diversi rifiuti organici, analizzati nei vari studi che hanno utilizzato i lombrichi come metodo di biorisanamento, è stata calcolata al 55,38%. Questa percentuale aumenta inoltre fino a quasi il 100% se consideriamo gli studi effettuati con l'aggiunta ai lombrichi di letame proveniente da bovini<sup>68</sup>. Risultati sempre molto alti sono stati riscontrati per gli inquinanti piombo e cromo, considerando una buona proporzione aggiunta di letame bovino. Per entrambe le sostanze chimiche da decontaminare, le matrici sperimentate sono state diverse tra cui per esempio i fanghi di un'industria tessile e alcuni rifiuti solidi urbani. Al contrario, risultati alquanto negativi sono stati riscontrati per due elementi chimici ossia lo zinco e il rame. Le motivazioni sono da ricercare nel fatto che nonostante la specie di lombrichi *E. fetida* riesca ad accumulare molti metalli dal terreno, allo stesso tempo il processo di mineralizzazione e decomposizione della materia organica durante il processo di compostaggio può concentrare e aumentare il contenuto di metalli pesanti. Ulteriori studi sono però consigliati per quanto riguarda queste due sostanze perché ancora in letteratura non sono presenti molte analisi che ci permettano di trattare il tema in modo più approfondito. Per quanto riguarda i metalli pesanti, anche la specie di lombrichi chiamata *Lumbricus terrestris*, sebbene sia stata studiata in maniera minore, ha raggiunto i

---

<sup>68</sup> Tagliabue F. et al, *A Systematic Review on Earthworms in Soil Bioremediation*. Appl. Sci. 2023, 13, 10239

più alti livelli di riduzione del contaminante rispetto alle altre specie di lombrichi analizzate.

### **3.3.2 L'USO DEI LOMBRICHI PER LA BONIFICA DI TERRENI INQUINATI DA ANTIBIOTICI**

Non solo per i metalli pesanti, i lombrichi stanno iniziando a essere sperimentati anche per decontaminare alcuni terreni contaminati da diversi antibiotici. Per quanto riguarda questi prodotti, le tetracicline sono le componenti di quelli più utilizzati dall'essere umano per diversi scopi, sia per il loro costo esiguo sia per il loro ampio spettro di funzionamento. L'applicazione dei lombrichi per queste sostanze è una scoperta a cui non possiamo rimanere indifferenti in quanto andrebbe a contrastare il fenomeno dei microrganismi antibioticoresistenti. Gli antibiotici, infatti, poiché utilizzati in maniera eccessiva, sono riusciti ad entrare in diversi ambienti terrestri come quello del suolo e dell'acqua e hanno scatenato lo sviluppo e la crescita di batteri resistenti ad essi. Questi microrganismi annientano nel tempo l'efficacia degli antibiotici che, in caso di infezioni, non funzionano più e fanno inoltre aumentare le infezioni difficilmente trattabili<sup>69</sup>.

---

<sup>69</sup>Fonte: Salute Lazio, sistema sanitario regionale.

Uno studio nello specifico che applicò la specie di lombrichi chiamata *Metaphire guillelmi* evidenziò come sia più adatta rispetto alla classica *E. fetida* in quanto aumenta la velocità di degradazione delle tetracicline. Allo stesso tempo, l'attività enzimatica non ha stabilito alcun danno ossidativo dovuto alle tetracicline, dimostrando l'efficiente capacità di detossificazione del sistema antiossidante di questa specie<sup>70</sup>. Il danno ossidativo, o stress ossidativo, si ha quando la presenza di radicali liberi supera le capacità antiossidanti dell'organismo, ossia di enzimi antiossidanti che convertono i radicali in composti meno reattivi. Lo stress ossidativo provoca danni alla pianta in generale e nello specifico alla membrana cellulare, alle proteine e al DNA. I radicali liberi sono molecole che si formano normalmente a seguito della respirazione cellulare, un processo vitale per la produzione di energia nella cellula ma la cui produzione può essere stimolata da diversi fattori ambientali e non, tra cui la presenza di inquinanti nel terreno<sup>71</sup>.

---

<sup>70</sup> Tagliabue F. et al, *A Systematic Review on Earthworms in Soil Bioremediation*. Appl. Sci. 2023, 13, 10239

<sup>71</sup> Giacomo Lorenzini et al, *Piante, cambiamento climatico e stress ossidativo*, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-ambientali dell'Università di Pisa.

### **3.3.3 L'USO DEI LOMBRICHI PER LA DECONTAMINAZIONE DI TERRENI INQUINATI DA DIOSSINE E PCB**

I bifenili policlorurati (PCB), come anticipato nel primo capitolo, sono un gruppo di sostanze chimiche organiche comprendenti atomi di carbonio, idrogeno e cloro di origine antropica, appartenenti agli idrocarburi clorurati. Non solo le diossine, ma anche questi composti sono fonte di preoccupazione perché sono distribuiti a livello globale, altamente persistenti e tossici. Lo sviluppo di processi biologici di biorisanamento per rimuovere le diossine è una sfida più che attuale per i microbiologi e gli ingegneri ambientali. Al momento, come anticipato in qualche paragrafo precedente, sappiamo da diversi studi e applicazioni che diversi batteri e funghi riescono a degradare le diossine.

Per quanto riguarda le tecniche innovative riguardanti i lombrichi, uno studio specifico di Zenteno-Rojas et al. ha studiato per settantadue giorni un processo di compostaggio da lombrichi e la capacità della specie di lombrichi *E. fetida* insieme a batteri simbiotici di rimuovere il composto decaclorobifenile (DCB). I risultati mostrano come i lombrichi e i batteri che lavorano in stretto contatto con loro abbiano ridotto le concentrazioni del contaminante del 65,24%. I ceppi di batteri *Pseudomonas extremaustralis* (ADA-5) e *Staphylococcus sciuri* (ADA-12) hanno

mostrato un potenziale più elevato di rimozione di DCB<sup>72</sup>. Questo apre uno spiraglio per la decontaminazione da diossine, in quanto i PCB sono molecole molto simili alle diossine per proprietà tossicologiche e fisico-chimiche. Inoltre, sarebbe interessante effettuare studi sui composti PCBdl ossia dioxin like, particolarmente somiglianti alle diossine come ricorda il nome. Attualmente è stato effettuato uno studio proprio in Italia su questi composti ma i risultati emersi, sebbene comunque positivi, non confermano sfortunatamente tutte le aspettative iniziali. Lo studio ha attuato diverse strategie su una parte di terreno inquinato dove sorgeva l'impresa chimica Caffaro Spa, produttrice di diversi prodotti chimici. L'inquinamento di tale suolo consiste in contaminanti quali mercurio, arsenico, PCB, diossine, furani e altri<sup>73</sup>. Lo studio ha applicato diverse tecniche usando la simbiosi perfetta di lombrichi di specie *E. fetida* e di piante, nello specifico la *Lepidium sativum*, per provare a decontaminare zone di terreno inquinate da diossine (PCDD) e furani (PCDF). Tra questi trattamenti, il primo ha utilizzato terreno non contaminato con l'aggiunta della specie di lombrichi *E. fetida*; il secondo ha usato solo terreno contaminato; il terzo ha utilizzato terreno contaminato con l'aggiunta della specie di lombrichi *E. fetida*; il quarto ha usato

---

<sup>72</sup> Zenteno-Rojas A. et al, *Removal of High Concentrations Decachlorobiphenyl of Earthworm Eisenia Fetida and Its Symbiotic Bacteria in a Vermicomposting System. Water Air Soil Pollut.* 2019, 230, 5–6.

<sup>73</sup> <http://bresciacaffaro.it/home/progetto-bonifica-brescia-caffaro.html>

invece terreno contaminato con l'aggiunta della pianta *L. sativum* e l'ultimo terreno contaminato con la specie *E. fetida* e la pianta *L. sativum* (figura 10)<sup>74</sup>.

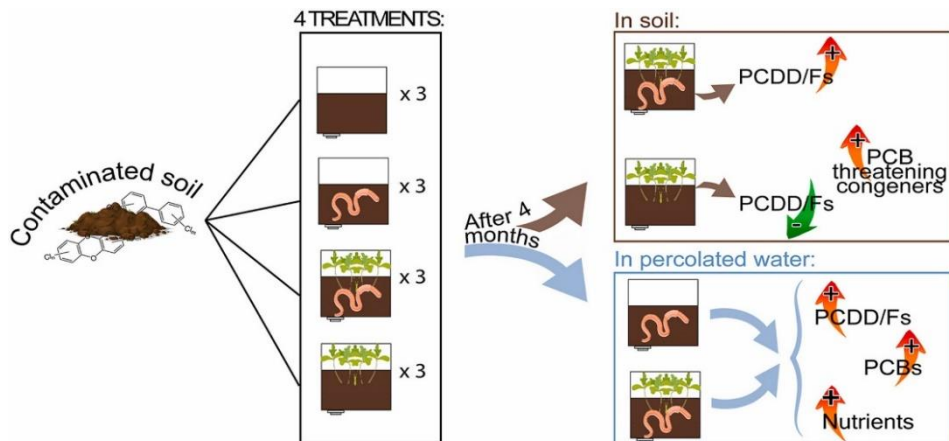


Figura 10 – Tecniche applicate con uso di lombrichi *E. Fetida* e pianta *L. sativum* e rispettivi risultati dopo quattro mesi

Successivamente sono stati analizzati i risultati di ogni tecnica dopo i quattro mesi di prova. Il trattamento migliore riscontrato nei risultati è quello che prevede l'uso di lombrichi *E. fetida* nel suolo contaminato. Il risultato finale però, che ha sorpreso anche negativamente gli studiosi, è che in realtà in generale è stato ottenuto un biorisanamento più debole rispetto alle aspettative. I diversi trattamenti hanno riscosso successi diversi nella diminuzione della concentrazione di PCDD e PCDF,

<sup>74</sup> Remelli, S. et al, *Vermiremediation Applied to PCB and PCDD/F Contaminated Soils and Its Implications for Percolating Water*. Environmental Research, Volume 214, Part 1, 2022

mentre quella dei PCB è la stessa per tutti i trattamenti. Sono diventati però molto meno pericolosi per l'ambiente i congeneri dei PCB.

Altro elemento contrastante ottenuto dagli studiosi rispetto agli studi effettuati su altri inquinanti è che il trattamento che combina insieme lombrichi e piante ha in realtà un effetto molto inferiore in termini di riduzione del contaminante rispetto all'utilizzo delle due componenti separatamente e rispetto al trattamento con solo suolo. Questi risultati sono stati strettamente legati ad una bassa biodisponibilità di diossine e furani, alla durata insufficiente dell'esperimento e al basso numero di individui della specie di *E. fetida* utilizzati. Un'ulteriore conseguenza negativa è riscontrabile nelle acque di percolazione, ossia quelle che attraversano il suolo a causa della forza di gravità. In seguito all'attività di scavo dei lombrichi, la concentrazione degli inquinanti in queste acque è salita, così come la concentrazione di fosforo reattivo solubile.

Tuttavia, questo studio sottolinea l'importanza di valutare l'efficienza dei metodi di bonifica e per il recupero della salute del suolo, non solo in termini di riduzione delle concentrazioni totali di contaminanti ma anche nei conseguenti cambiamenti nelle distribuzioni dei congeneri. Infine, i dati suggeriscono che occorre prestare attenzione alle conseguenze dell'azione dei lombrichi sul contenuto delle acque di

percolazione, sia per i contaminanti discussi qui che, più in generale, per i nutrienti disciolti<sup>75</sup>.

Un ulteriore studio effettuato dalla Howard University di Washington ha indagato il potenziale uso dei lombrichi, in particolare della specie *E.fetida*, per la biotrasformazione dei PCB nei fanghi e nei sedimenti del sito di Ralston Street Lagoon, a Gary nello Stato dell'Indiana negli Stati Uniti d'America. L'obiettivo di questo studio è analizzare la biotrasformazione di questi composti come metodo alternativo per bonificare il sito. I PCB si trovano ora, a causa del loro massivo utilizzo negli anni passati e di pratiche di smaltimento lassiste, in molte matrici ambientali come sedimenti, suoli e corpi idrici interni e hanno una distribuzione ambientale quasi ubiquitaria, cioè si trovano praticamente dappertutto. Al contrario, le tecnologie di trattamento approvate, come l'incenerimento, sono costose e possono generare sottoprodotti nocivi. Per l'esperimento, l'università americana ha usato un campione di fango proveniente dal centro-ovest, con una concentrazione approssimativa di inquinante di 780ppm<sup>76</sup>.

---

<sup>75</sup> Remelli, S. et al, *Vermiremediation Applied to PCB and PCDD/F Contaminated Soils and Its Implications for Percolating Water*. Environmental Research, Volume 214, Part 1, 2022.

<sup>76</sup> Parti per milione

Per la scelta della specie di lombrichi per l'esperimento invece, come abbiamo anticipato sopra, è stata utilizzata *E.fetida*. Questa specie, infatti, tende a essere ubiquitaria e molti rifiuti organici vengono colonizzati naturalmente da questa. Inoltre, ha un'ampia tolleranza alla temperatura e può vivere in rifiuti con un'ampia gamma di umidità. È un lombrico tenace che viene maneggiato facilmente e, in colture miste, di solito diventa dominante, cosicché, anche quando i sistemi di campo iniziano con altre specie, finiscono per avere un'ampia percentuale di *E.fetida*.

L'esperimento ha previsto l'uso di bioreattori per il lombricompostaggio, allestiti con frazioni di massa di fanghi contaminati comprese tra il 10% e il 75%. I bioreattori erano costituiti da uno strato di drenaggio sovrapposto a una rete e poi la lettiera di lombrichi mescolata ai fanghi contaminati. Ciascun bioreattore aveva un'uguale biomassa di lombrichi. Il contenuto dei bioreattori è stato poi mantenuto umido mediante spruzzi d'acqua e i lombrichi sono stati alimentati periodicamente con farina di mais. Ad orari e tempi prestabiliti, il compostaggio è stato campionato per verificare i livelli di PCB. Sono stati misurati anche la biomassa e il numero di lombrichi<sup>77</sup>.

Dopo circa 150/180 giorni, i risultati emersi dell'esperimento dimostrano che i

---

<sup>77</sup> Tharakan John et al., *Vermicomposting for the bioremediation of PCB congeners in SUPERUND site media*, Waste Management and the Environment II, 117-124, 2004

lombrichi sono sopravvissuti e si sono riprodotti in presenza di terreni contaminati. Inoltre, i test e i campionamenti hanno dimostrato una riduzione dell'80% del livello di PCB in tutti i bioreattori, anche se il tempo necessario per ottenere questo livello di riduzione è aumentato con l'aumentare della frazione di fango contaminato nei bioreattori. La tabella 4 qui sotto mostra il tasso di riduzione dei PCB in diverse concentrazioni di fango.

| Sludge Concentration (%) | PCB concentration at $t_{\text{initial}}$ (ppm) | PCB concentration at $t_{\text{final}}$ (ppm)[days] | Net % reduction in PCB concentration |
|--------------------------|---|---|--------------------------------------|
| 10                       | 223.65  | 40.07 [150]   | 82.08                                |
| 25                       | 476.28  | 87.46 [150]   | 81.63                                |
| 50                       | 719.57  | 73.8 [185]  | 89.67                                |
| 75                       | 942.17  | 160.83 [200]  | 82.93                                |

Tabella 4 - Concentrazioni di PCB in differenti concentrazioni di fanghi

I dati mostrano però anche che più alti sono i livelli di PCB nell'ambiente circostante, maggiore è la quantità di PCB accumulati nei lombrichi. Questo studio dimostra quindi che i lombrichi *E.fetida* sono stati in grado di bioaccumulare i PCB dai fanghi e di ridurre la quantità di congeneri di PCB rimasti nei fanghi. Tuttavia, nonostante i dati suggeriscano una certa biotrasformazione dei PCB, la maggior parte della rimozione dei PCB dalle matrici dei bioreattori sembra avvenire per trasporto nella biomassa dei lombrichi. Circa il 20% dei PCB rimane nella miscela di fanghi e lettiera di lombrichi al momento della conclusione di ogni

studio sperimentale. Il destino di questo restante 20%, come un'ulteriore biotrasformazione per esempio, richiede ulteriori studi e indagini. Naturalmente, è del tutto possibile che una parte di contaminazione da PCB sia difficilmente accessibile e quindi ostile a qualsiasi attività di trasformazione. La biodisponibilità del PCB nei fanghi potrebbe essere un grande fattore di ostacolo, soprattutto se si considera la natura dei fanghi, estremamente densi e argillosi. Un'altra possibilità è che i lombrichi non abbiano avuto a disposizione un tempo sufficiente e un'alimentazione supplementare; quindi, è possibile che con sufficienti risorse aggiuntive ed esperimenti più lunghi, possa avvenire una biotrasformazione più completa. Questi risultati suggeriscono che il lombricompostaggio può essere un'opzione valida per il biorisanamento in situ e la bonifica dei siti ma che ulteriori approfondimenti sono fondamentali per l'applicazione di questa tecnica direttamente in sito e su grandi siti<sup>78</sup>.

---

<sup>78</sup> Tharakan John et al., *Vermicomposting for the bioremediation of PCB congeners in SUPERUND site media*, Waste Management and the Environment II, 117-124, 2004.

## **Conclusioni**

Lo scopo di questo lavoro di tesi era quello di mettere in luce, attraverso un'analisi critica, lo stato dell'arte di ciò che è stato fatto finora in merito all'inquinamento da diossine e di illustrare le nuove frontiere e possibilità per la bonifica di suoli inquinati da questi contaminanti. Lo studio, quindi, ha cominciato con l'illustrare cosa sono questi composti inquinanti e perché fossero nocivi per l'ambiente e l'essere umano. Successivamente, vari esempi di incidenti e di contaminazioni hanno sottolineato la pericolosità di questi contaminanti e hanno sviluppato una risposta da parte delle istituzioni e organizzazioni nazionali e internazionali. Diversi casi di attualità presentati però confermano quanta strada ci sia ancora da fare nel sensibilizzare la comunità scientifica e non, sia sugli effetti negativi che queste sostanze provocano sia sulle azioni antropiche che le scatenano. Infine, i nuovi studi effettuati e i recenti progetti presentati dimostrano come sia possibile un'alternativa sostenibile per il ripristino di questi luoghi contaminati così da restituirli risanati alla comunità.

Alla luce delle informazioni riportate è quindi possibile trarre alcune conclusioni. Innanzitutto, esistono già alternative più sostenibili per la decontaminazione di terreni inquinati da diossine tramite batteri, microrganismi e metodologie che sfruttano la simbiosi con alcune specie di lombrichi durante il processo di

compostaggio. Al momento però non sono tutte e del tutto applicabili perché non ancora sufficientemente studiate e sperimentate.

Inoltre, questo studio sottolinea l'importanza di valutare l'efficienza dei trattamenti di bonifica e il recupero della salute del suolo non solo in termini di riduzione delle concentrazioni totali di contaminanti ma anche nei cambiamenti nelle distribuzioni dei congeneri, soprattutto per quanto riguarda composti difficili da degradare e durevoli nel tempo come diossine, furani e PCB.

Infine, diversi casi di attualità presentati confermano ancora che nuove e maggiori azioni da parte delle istituzioni nazionali e locali sono necessarie al fine di far comprendere alla comunità l'effetto negativo che azioni scorrette intraprese senza riflettere possono avere. Infatti, come è sicuramente fondamentale eliminare l'impatto e l'inquinamento ambientale a valle ossia direttamente nei sedimenti inquinati, è importante allo stesso modo agire a monte limitando i comportamenti inquinanti e quindi prevenire il rischio di inquinamento e azioni dannose che metterebbero in pericolo sia l'uomo sia l'ambiente. Dove non arriva la normativa, che agisce per esempio con obblighi e divieti per quanto riguarda gli impianti produttivi, è importante che sopraggiungano azioni di sensibilizzazione per la comunità, come seminari e iniziative pubblicitarie, per esempio, che facciano leva sul benessere e il diritto di tutti a vivere in un ambiente sano e non inquinato. Non solo i divieti e le possibili sanzioni dovrebbero bloccare azioni antropiche

disastrose, come l'incendio doloso di rifiuti di vario genere, ma anche e soprattutto la consapevolezza di creare un danno alla salute altrui e propria e all'ambiente dovrebbe limitare atti disastrosi.

Un'altra conclusione importante, che è necessario sottolineare, è un concetto che permea tutta la sostenibilità in generale ossia focalizzarsi sulla riduzione dell'impatto ambientale ma evitandone lo spostamento su altri ambienti terrestri. Nei casi affrontati nello studio, è fondamentale fronteggiare la decontaminazione di terreni senza spostare l'impatto ambientale degli inquinanti su altri ambienti come quello delle acque per esempio. Nello specifico, particolare attenzione va posta sulle conseguenze che l'azione dei lombrichi ha sulle acque di percolazione, infatti potrebbero essere disciolti in queste nuovi inquinanti o ulteriori sostanze non previste all'inizio del progetto di bonifica.

Inoltre, gli studi effettuati su PCB e diossine hanno aperto uno spiraglio sulla possibilità di biorisanamento per sedimenti inquinati da questi contaminanti. Sarebbe interessante effettuare studi aggiuntivi sui composti PCBdl ossia dioxin like, particolarmente somiglianti alle diossine, come ricorda il nome, sia in termini di proprietà chimico-fisiche sia tossicologiche.

Per concludere, cospicui investimenti e ulteriori studi sono necessari per fornire nuove alternative di mercato per la bonifica di questi sedimenti inquinati e soprattutto per offrire possibilità meno inquinanti, meno costose e che mantengano

la risorsa del suolo il più intatta possibile sia nelle sue caratteristiche e proprietà sia in termini di biodiversità. Inoltre, nuovi approfondimenti si potrebbero aggiungere a questo mio lavoro di tesi perché auspicabilmente le nuove tecnologie che vengono studiate e analizzate in questi anni apriranno una nuova frontiera di possibilità e metodologie alla risoluzione del problema che questo studio ha messo in rilievo. Un primo spunto di riflessione andrebbe posto sull'uso dei nanomateriali per il biorisanamento che, secondo nuove ricerche, grazie alle loro proprietà fisico-chimiche andrebbero ad aumentare le prestazioni di bonifica. La tecnica di nanobiorisanamento, cioè di nanomateriali e microrganismi insieme, è una tecnica emergente e versatile che possiede il potenziale di trattare gli inquinanti ambientali più tossici e pericolosi. Pertanto, l'avanzamento nell'uso del nanobioremediation sarebbe una tecnica promettente per la bonifica delle sfide ambientali.

## Bibliografia e riferimenti

- Agency for Toxic Substances & Disease Registry (ATSDR), *Toxicological Profile for Chlorinated Dibenzo-p-dioxins (CDDs)*, Atlanta (Georgia), Dicembre 1998.
- Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici (APAT), *Diossine, furani e PCB*, Roma, 2006. URL: [https://www.salute.gov.it/imgs/C\\_17\\_pubblicazioni\\_821\\_allegato.pdf](https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_821_allegato.pdf)
- Arpav, *Diossine, furani, PCB e IPA nei suoli del Veneto*, 2016.
- Arpav Veneto, *Monitoraggio di PCDD, PCDF, PCBdl, IPA*, Padova, 2022.
- LL. AYLWARD et al., *Temporal trends in human TCDD body burden: Decreases over three decades and implications for exposure levels*, Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, Settembre 2002, pp. 319-328, DOI: 10.1038/sj.jea.7500233.
- E. BLASI, *Il caso Seveso: ampliamento della risarcibilità del danno non patrimoniale e riflessi sulla nozione di bene-ambiente*, Rivista quadrimestrale di diritto dell'ambiente, Numero 0, Anno 2010. (Cass. Civ., Sez. III, 13 maggio 2009, n. 11059)
- S. CACACE, *Seveso, atto ennesimo: sì al danno morale "presunto" seppur in assenza di lesioni alla salute*, in Nuova giur. civ., 2006.
- F. CASTELLANI et al., *Levels of Polychlorinated Dibenzo-p-Dioxins/Furans and Polychlorinated Biphenyls in Free-Range Hen Eggs in Central Italy and Estimated Human Dietary Exposure*, Journal of Food Protection, Volume 84, Issue 8, 2021, pp. 1455-1462, ISSN 0362-028X, <https://doi.org/10.4315/JFP-21-126>.
- Convenzione di Basilea sul controllo dei movimenti oltre frontiera di rifiuti pericolosi e sulla loro eliminazione, tradotta dal Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica

- Convenzione OSPAR della Comunità Europea, Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea n. L 104 del 03/04/1998 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A31998D0249>
- Decreto del 1° marzo 2019, n.46, Gazzetta Ufficiale n.132 del 7/06/2019.
- Decreto legislativo 23 febbraio 2023, n. 18, Gazzetta Ufficiale n.55 del 06/03/2023  
<https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2023-02-23;18>
- Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, Norme in materia ambientale, Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2006.
- Decreto legislativo 4 marzo 2014, n. 46, Attuazione della direttiva 2010/75/UE relativa alle emissioni industriali e modifiche al decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.
- Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999, n. 471, Gazzetta Ufficiale n.293 del 15/12/1999.
- R. DESIATO et al., *Data on milk dioxin contamination linked with the location of fodder croplands allow to hypothesize the origin of the pollution source in an Italian valley*, Science of The Total Environment, Volume 499, 2014, pp. 248-256, ISSN 0048-9697  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.044>
- EPA, *Edition of the Drinking Water Standard and Health Advisories*, EPA 822-R-04-005, Office of Water U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, Winter 2004.
- Hong Kong Consumer Council, *Test on Fish Oil Supplements Revealed Omega-3 Fatty Acid Content Varied Greatly Among Samples Harmful Contaminants Detected in All Samples with 4 Exceeding EU Limits Industry Urged to Promptly Improve*, 15 Novembre 2022.
- IARC, *Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Man*, Vol. 69, 1997, p. 33.

- ISPRA, Banca dati indicatori ambientali, 2022  
<https://indicatoriambientali.isprambiente.it/it/emissioni/emissioni-di-composti-organici-persistenti-ipa-diossine-e-furani-trend-e-disaggregazione-settoriale#:~:text=I%20valori%20emissivi%20di%20IPA,Teq%20per%20diossine%20e%20furani.>
- G. LORENZINI et al., *Piante, cambiamento climatico e stress ossidativo*, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-ambientali dell'Università di Pisa.
- N.T.H. NHUNG et al., *A Review of Soil Contaminated with Dioxins and Biodegradation Technologies: Current Status and Future Prospects*, *Toxics* 2022, 10, pp. 1-17. <https://doi.org/10.3390/toxics10060278>
- I. OFFENTHALER et al., *Dioxins and dioxin-like pollutants in alpine forests*, *Organohal, Compd.* 69, 2007, pp. 608-611.
- M. S. PRIYANKA et al., *Approaches in Bioremediation of Dioxins and Dioxin-Like Compounds – A Review on Current and Future Prospects*, *Nature Environment and Pollution Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1381-1387, 2022.
- Proposta di regolamento del Consiglio recante modifica del regolamento CE n. 466/2001 della Commissione <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52001PC0495&from=DE>
- Raccomandazione della Commissione del 3 dicembre 2013 sulla riduzione della presenza di diossine, furani e PCB nei mangimi e negli alimenti, *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* del 4.12.2013.
- Regolamento UE 2022/2002 della Commissione del 21 ottobre 2022, *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* del 24/10/2022.
- Regolamento UE 2022/2400 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 novembre 2022 recante modifica degli allegati IV e V del regolamento UE 2019/1021 relativo agli inquinanti organici persistenti. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* del 9/12/2022.

- Regolamento UE 2019/1021 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 20 giugno 2019 relativo agli inquinanti organici persistenti. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea del 25/06/2019.
- Regolamento UE 2022/2002 della Commissione del 21 ottobre 2022 che modifica il regolamento CE n. 1881/2006 per quanto riguarda i tenori massimi di diossine e PCB diossina-simili in alcuni prodotti alimentari, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea del 24.10.2022. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/2002/oj/ita>
- Regolamento CE n. 1881/2006 della Commissione del 19 dicembre 2006 che definisce i tenori massimi di alcuni contaminanti nei prodotti alimentari. Gazzetta Ufficiale del 20.12.2006. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX%3A32006R1881%3AIT%3AHTML#d1e34-15-1>
- S. REMELLI et al., *Vermiremediation Applied to PCB and PCDD/F Contaminated Soils and Its Implications for Percolating Water*, Environmental Research, Volume 214, Part 1, 2022, 113765, ISSN 0013-9351. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113765>.
- L. RONGRONG et al., *Global status of dioxin emission and China's role in reducing the emission*, Journal of Hazardous Materials, Volume 418, 2021, 126265, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126265>.
- A. SCHECTER et al., *Recent dioxin contamination from Agent Orange in residents of a Southern Vietnam city*. Journal of Occupational Medicine 43:5, 2001, pp. 435-443.
- G. SCORTICHINI et al., *Dioxin contamination of food in Italy: an overview of the situation 1999-2000*, Veterinaria italiana, 40, 2004, pp. 22-31.
- Sentenza della Corte Costituzionale n. 225 del 22 luglio 2009.
- A. SOFO, *Tecniche di biorisanamento in situ ed ex situ, con particolare riferimento alla biodegradazione in siti contaminati da idrocarburi*, Lulu.com, 2010, pp. 1-70.

- Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs), Quindicesimo meeting del comitato per la revisione sugli inquinanti organici persistenti (POPRC), 2019.
- F. TAGLIABUE et al., *A Systematic Review on Earthworms in Soil Bioremediation*, Appl. Sci. 2023, 13, 10239. <https://doi.org/10.3390/app131810239>
- Tavolo Tecnico Interistituzionale, *Relazione finale sui lavori del tavolo interistituzionale in tema di diossine/furani e PCB nelle matrici ambientali ed alimentari del territorio forlivese*, 24 Ottobre 2012. [http://ambiente.comune.forli.fc.it/public/cms\\_page\\_media/278/Relazione%20finale%2024-10-2012.pdf](http://ambiente.comune.forli.fc.it/public/cms_page_media/278/Relazione%20finale%2024-10-2012.pdf)
- J. THARAKAN et al., *Vermicomposting for the bioremediation of PCB congeners in SUPERUND site media*, Waste Management and the Environment II, 2004, pp. 117-124.
- W. TIRLER et al., *Inceneritori e diossina: evoluzione dei sistemi di abbattimento e di monitoraggio delle emissioni*, Ingegneria dell' Ambiente, Vol. 4 n. 1, 2017, pp.35-44. [dx.doi.org/10.14672/ida.v4i1.744](https://doi.org/10.14672/ida.v4i1.744)
- A. ZENTENO-ROJAS et al., *Removal of High Concentrations Decachlorobiphenyl of Earthworm Eisenia Fetida and Its Symbiotic Bacteria in a Vermicomposting System*, Water Air Soil Pollut, 2019, pp. 5–6.

- <http://bresciacaffaro.it/home/progetto-bonifica-brescia-caffaro.html>
- <https://www.issalute.it/index.php/la-salute-dalla-a-alla-z-menu/d/diossine>
- [https://www.arpalazio.it/aggiornamenti/-/asset\\_publisher/Ix28jmeJZ2I8/blog/id/366212](https://www.arpalazio.it/aggiornamenti/-/asset_publisher/Ix28jmeJZ2I8/blog/id/366212)
- <https://www.cortecostituzionale.it/actionSchedaPronuncia.do?anno=2009&numero=225>
- <https://www.tio.ch/aziende-ticinesi-informano/1747190/losanna-citta-ticinese-biorisanamento-diossine>
- <https://www.mase.gov.it/pagina/convenzione-di-stoccolma>
- <https://www.rsi.ch/info/ticino-grigioni-e-insubria/Lotta-alle-diossine-pioniera-un%E2%80%99azienda-ticinese--2128667.html>
- <https://life-sedremed.eu/it/progetto/>
- <https://www.aboutpharma.com/animal-health/anche-i-batteri-aiutano-a-decontaminare-il-mare-da-idrocarburi-diossine-e-metalli-pesanti/>
- <https://www.eea.europa.eu/it/segnali/segnali-2019/articoli/intervista-2013-il-suolo-un>
- [https://www.arpalazio.it/web/guest/pubblicazioni/infografiche?p\\_p\\_id=com\\_liferay\\_document\\_library\\_web\\_portlet\\_IGDisplayPortlet\\_INSTANCE\\_kP2rMEUd1NLM&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&\\_com\\_liferay\\_document\\_library\\_web\\_portlet\\_IGDisplayPortlet\\_INSTANCE\\_kP2rMEUd1NLM\\_mvcRenderCommandName=%2Fdocument\\_library%2Fview\\_file\\_entry&\\_com\\_liferay\\_document\\_library\\_web\\_portlet\\_IGDisplayPortlet\\_INSTANCE\\_kP2rMEUd1NLM\\_fileEntryId=368680](https://www.arpalazio.it/web/guest/pubblicazioni/infografiche?p_p_id=com_liferay_document_library_web_portlet_IGDisplayPortlet_INSTANCE_kP2rMEUd1NLM&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&_com_liferay_document_library_web_portlet_IGDisplayPortlet_INSTANCE_kP2rMEUd1NLM_mvcRenderCommandName=%2Fdocument_library%2Fview_file_entry&_com_liferay_document_library_web_portlet_IGDisplayPortlet_INSTANCE_kP2rMEUd1NLM_fileEntryId=368680)
- <https://www.consilium.europa.eu/it/press/press-releases/2022/06/21/council-and-parliament-agree-to-reduce-limit-values-for-the-presence-of-persistent-organic-pollutants-in->



- <https://ilsalvagente.it/2024/08/06/maxi-sequestro-di-carbonella-tossica-e-obi-ritira-le-bricchette/>
- <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52010DC0562&from=EN>
- [https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/file-e-allegati/documenti/rete-di-monitoraggio/microinquinanti\\_organici\\_suoli\\_2010-2016.pdf/@@display-file/file](https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/file-e-allegati/documenti/rete-di-monitoraggio/microinquinanti_organici_suoli_2010-2016.pdf/@@display-file/file)
- <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/dioxins-and-their-effects-on-human-health>
- <https://www.mase.gov.it/notizie/ratificata-dall-italia-la-convenzione-di-stoccolma-sugli-inquinanti-organici-persistenti#:~:text=inquinanti%20organici%20persistenti,Ratificata%20dall'Italia%20la%20Convenzione%20di%20Stoccolma%20sugli%20inquinanti%20organici,Stoccolma%20sugli%20inquinanti%20organici%20persistenti>
- [https://www.mase.gov.it/sites/default/files/Convenzione\\_di\\_Basilea\\_sul\\_controllo\\_dei\\_movimenti\\_oltre\\_frontiera\\_di\\_rifiuti\\_pericolosi\\_e\\_sulla\\_loro\\_eliminaazione.pdf](https://www.mase.gov.it/sites/default/files/Convenzione_di_Basilea_sul_controllo_dei_movimenti_oltre_frontiera_di_rifiuti_pericolosi_e_sulla_loro_eliminaazione.pdf)