



# CONDIZIONAMENTO BIOFISICO E RECUPERO AGRO-ECOLOGICO DEI SEDIMENTI

**Veronica Bianchi**

Università di Pisa  
Dipartimento di Ingegneria Civile

## Indice

1. La problematica
2. Quadro normativo
3. Caso di studio: il porto di Livorno
4. La tecnica adottata (fitorimediazione *modificata*)
5. Sperimentazione su meso-scala (lisimetri) – ISE CNR di Pisa
6. Confronto con suolo agronomico
7. Modello concettuale di fitoestrazione
8. Analisi multicriteria
9. Analisi di rischio applicata alla tecnica esposta
10. Sperimentazione su scala reale – porto di Livorno
11. Conclusioni
12. Pubblicazioni

## La problematica

- Necessità di dragaggio di porti e darsene fluviali e costiere (scala mondiale)
- In Europa si stimano circa 100 - 200 milioni m<sup>3</sup> all'anno
- l'EuDA (European Dredging Association [www.european-dredging.info](http://www.european-dredging.info)) stima 200-250 milioni di tonnellate per anno.
- Conferimento in discarica: situazione non più gestibile!

### Il porto di Livorno (Sito di Interesse Nazionale)

1,5 milioni di m<sup>3</sup> dei sedimenti stoccati nella vasca di accumulo adiacente al porto (riempita in soli 2 anni):

- trattamento biologico mediante batteri selezionati prima della collocazione nel bacino (67 €/m<sup>3</sup>)
- collocato nel bacino senza trattamento (25 €/m<sup>3</sup>)



### Obiettivo

Applicare la tecnica di *fitorimediazione* per la decontaminazione di sedimenti marini derivanti da attività di dragaggio, al fine di trasformarli in una matrice non contaminata, dalle peculiarità di un suolo agronomico (*tecno-suolo*), ricollocabile a terra.

## Quadro normativo

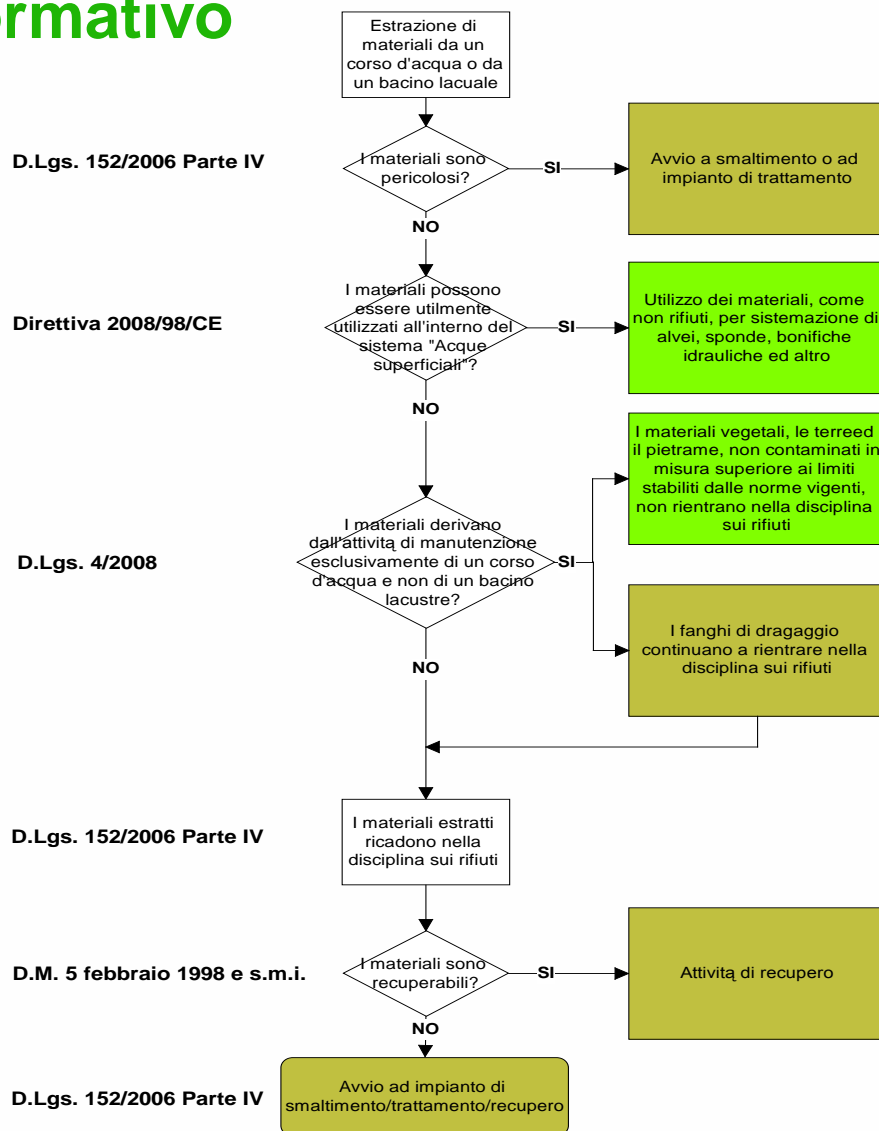
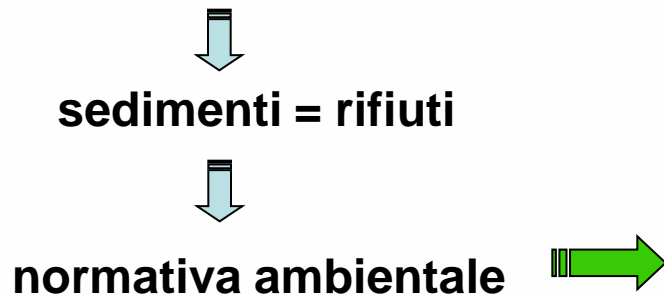
- Dm Ambiente 7 novembre 2008

“Disciplina delle operazioni di dragaggio nei siti di bonifica di interesse nazionale”:

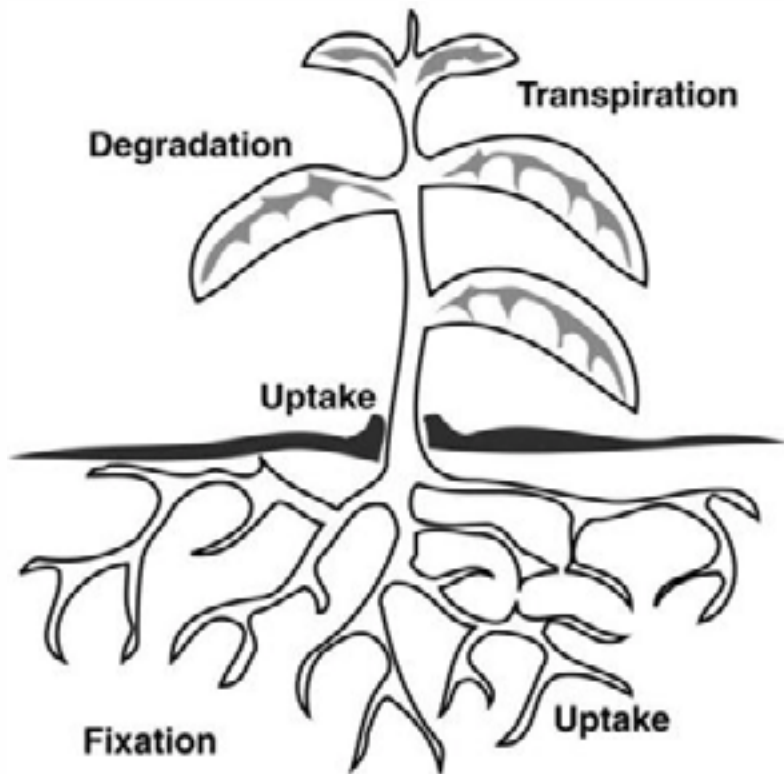
1. sversamento in mare
2. ripascimento di arenili
3. sversamento in vasche di colmata

1 + 2 = se la qualità del materiale è analoga all'ambiente in cui s'intende rimetterli  
 3= vasche di colmata

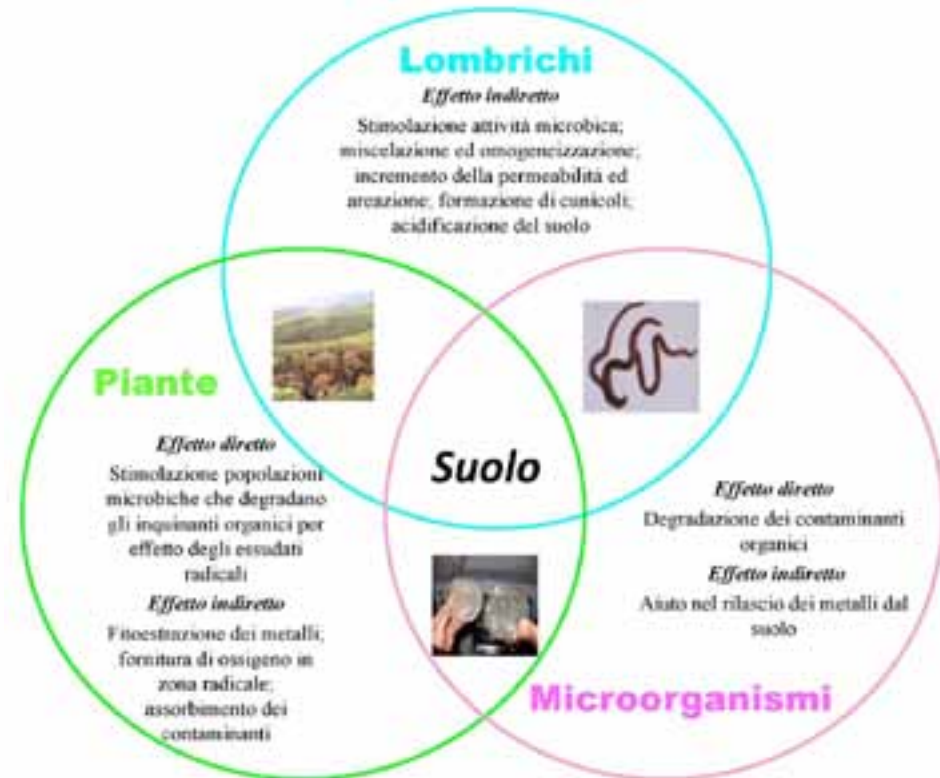
- Diversa destinazione e gestione a terra dei materiali derivanti dall'attività di dragaggio



### La tecnica di fito-trattamento modificata



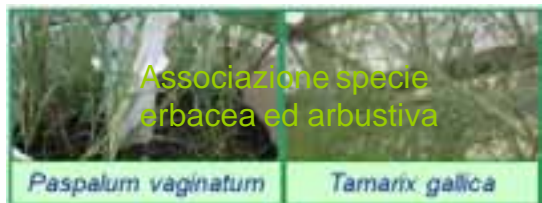
Fonte: USEPA, 1999



Mutua interazione tra piante, lombrichi e microorganismi nella rizosfera

(Bianchi & Ceccanti, 2009)

## La sperimentazione su mesoscala (ISE-CNR)

 Trattamento **P** (Piante)

 Trattamento **L** (Lombrichi)

 Trattamento **PL** (Piante + Lombrichi)

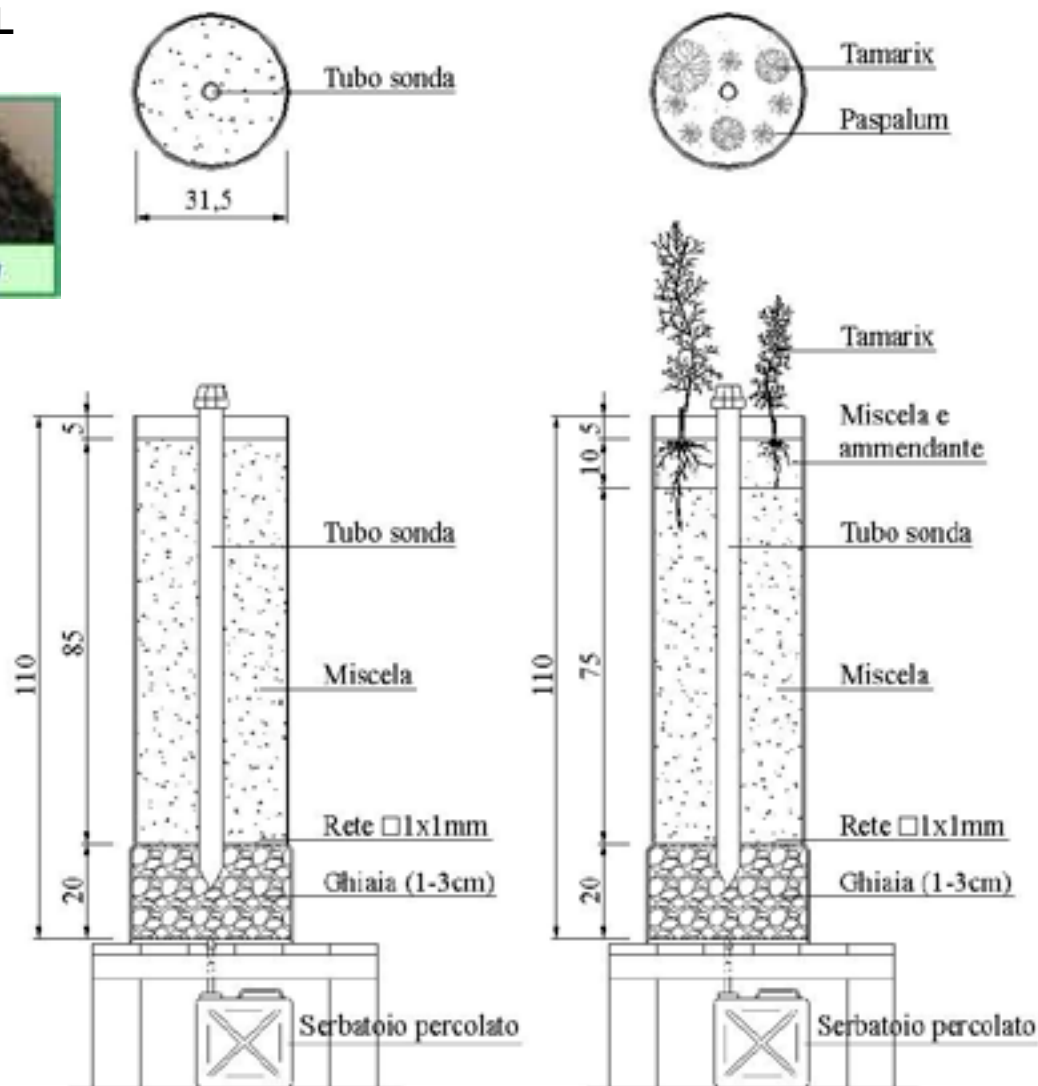

### Pre-condizionamento fisico/chimico:

a) Sedimento : terra di scavo (5:1 v/v)

$K_0 = 10^{-6} \text{ m/s}$        $K = 10^{-3} \text{ m/s}$

b) Dilavamento del sedimento, per portare la salinità a livelli tollerati dalle piante opportunamente selezionate (3 mS/cm).

c) Applicazione di compost vegetale in superficie (1:1 v/v)



## Il materiale

	Sedimento	Terreno di scavo	Compost
Umidità (%)	64.4	3.3	57.1
Sabbia (%)	0.20	71.89	-
Limo (%)	83.89	14.63	-
Argilla (%)	15.91	8.48	-
pH	7.7	8.33	6.52
C.E. (dS m <sup>-1</sup> )	3.0	0.43	1.8
TOC (%)	1.4	1.03	37.7
WSC (mg kg <sup>-1</sup> )	1126	187	1409
N <sub>tot</sub> (%)	0.02	0.1	4.4
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	4.1	4.7	15.1
P <sub>tot</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	350	12	19140
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	129	62.9	51
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	369	27.4	61
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	225	38.5	383
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	183	92.9	35
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	21	<1	17
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	608	84.0	1032
TPH (mg kg <sup>-1</sup> )	6500	<15	<10

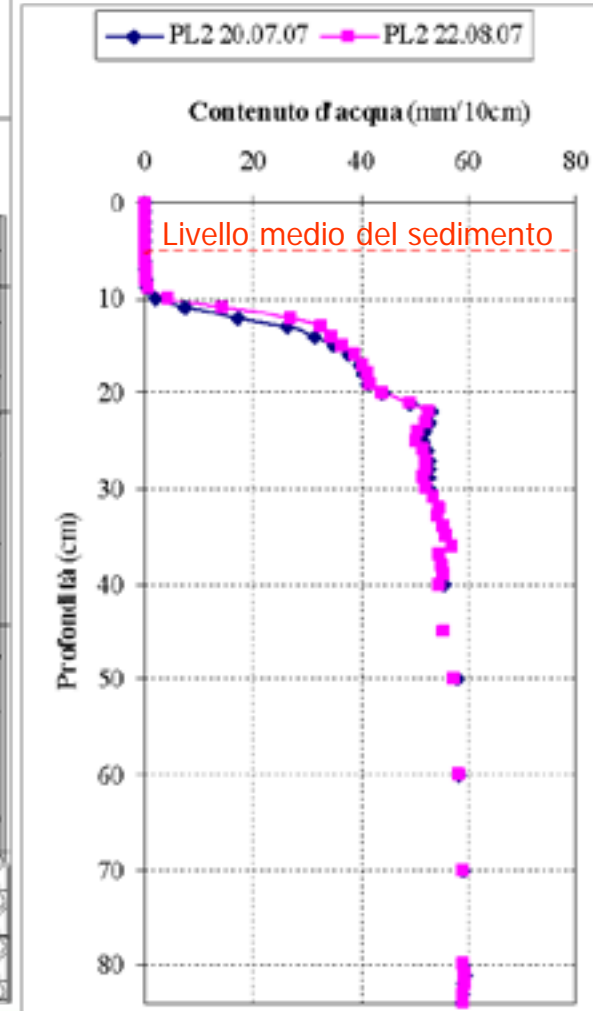
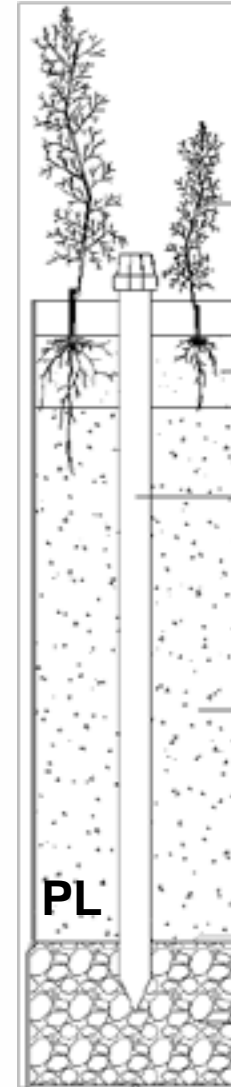
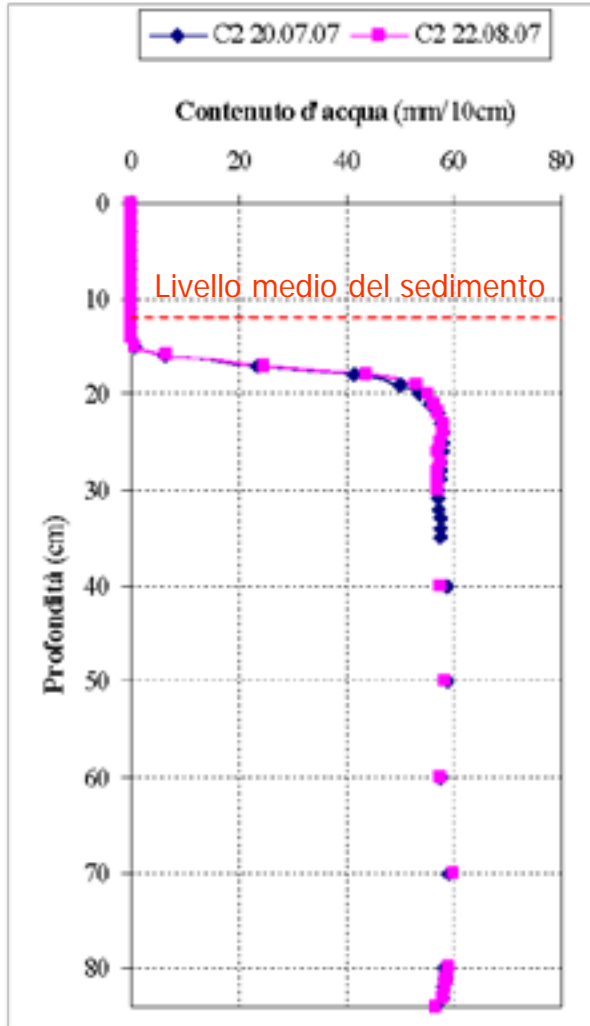
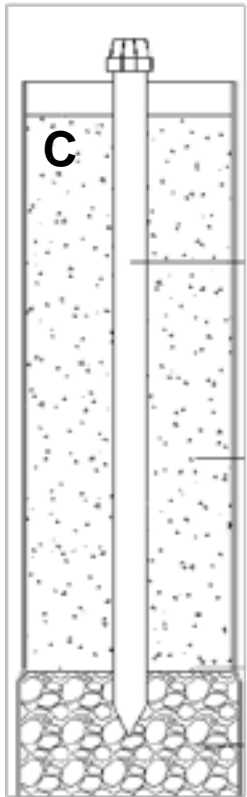


## Risultati raggiunti

### Idraulica: misure di umidità

$$K_0 = 10^{-6} \text{ m/sec}$$

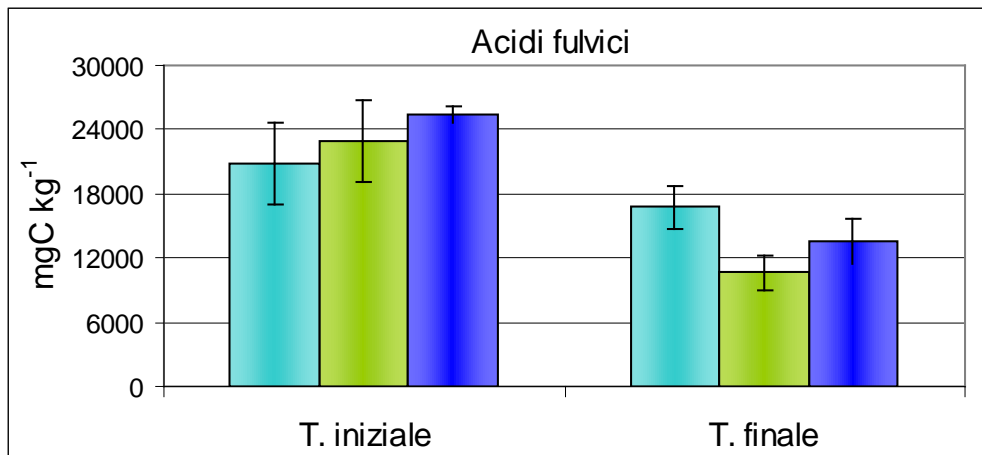
$$K = 10^{-3} \text{ m/sec}$$





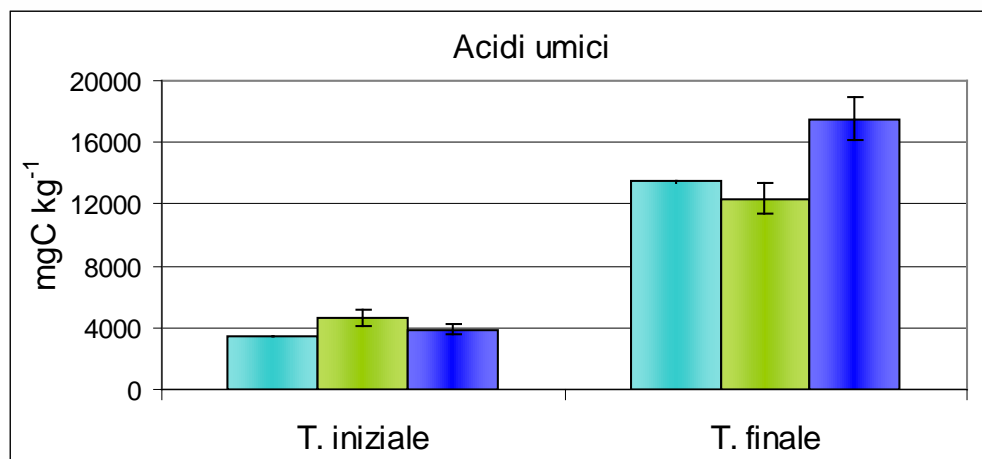
## Risultati raggiunti

### Sostanze umiche (chelanti naturali)

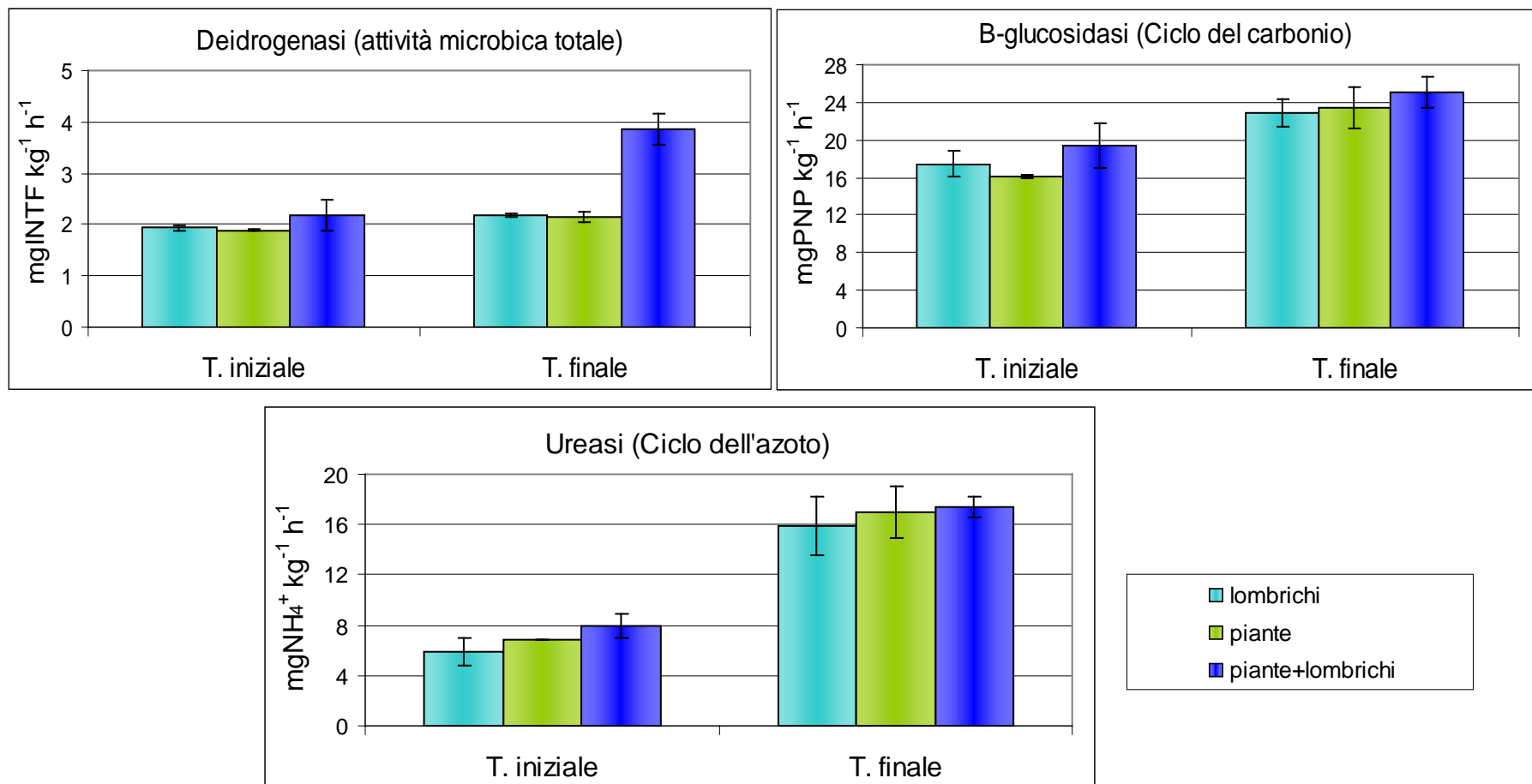


■ lombrichi   
 ■ piante   
 ■ piante+lombrichi

Aumentano nel tempo gli **acidi umici** che solubilizzano (chelazione) i metalli pesanti, rendendoli più disponibili per la pianta; tuttavia potrebbero anche essere trattenuti e competere quindi con la radice.



## Test enzimatici

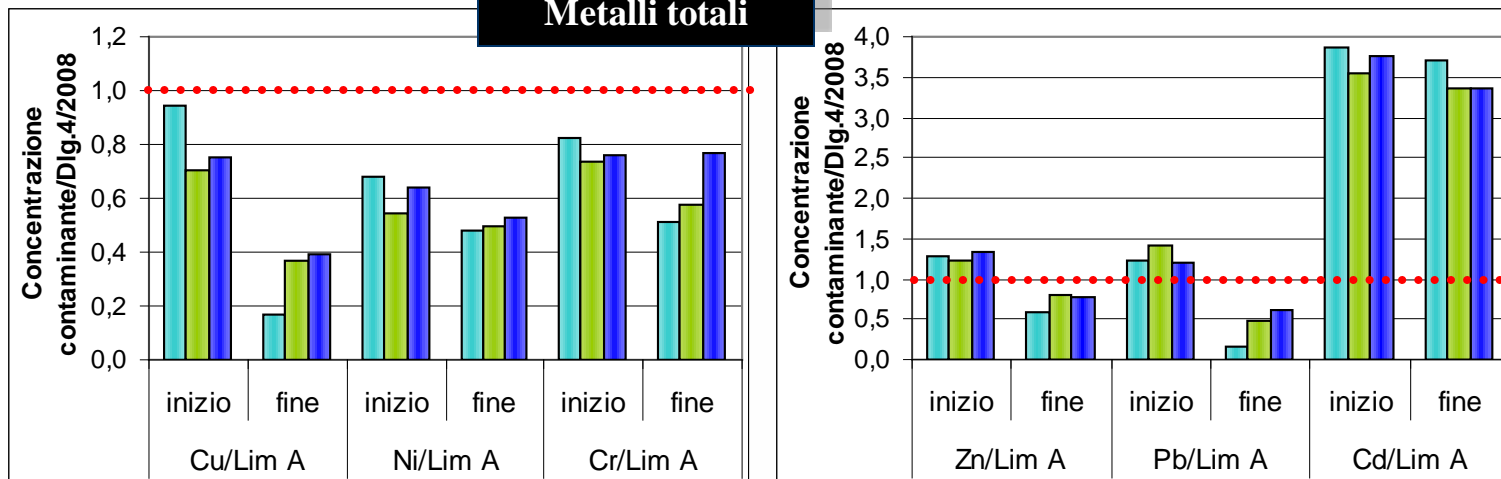


Si nota una spiccata attività microbica a termine sperimentazione, dopo 2 anni circa (T. finale) e nei lisimetri che hanno previsto il trattamento combinato (piante e lombrichi).

## Risultati raggiunti

### Contaminanti inorganici e organici

#### Metalli totali

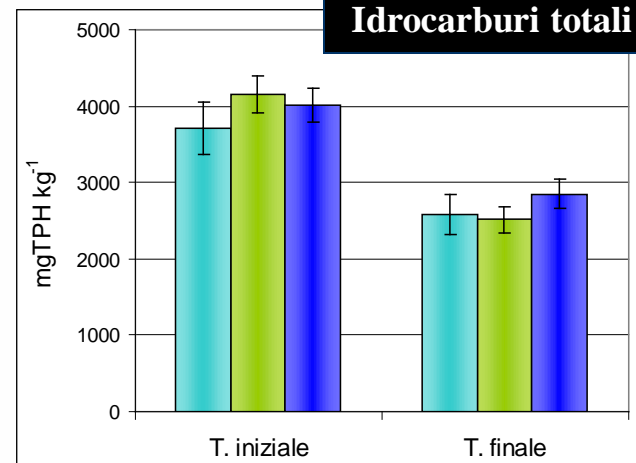


#### Concentrazioni soglia imposte dal D. Lgs. 4/2008

	Cu	Ni	Cr	Zn	Pb	Cd	C<12	C>12
Usa A (mg kg <sup>-1</sup> )	120	120	150	150	100	2	10	50
Usa B (mg kg <sup>-1</sup> )	600	500	800	1500	1000	15	250	750

Usa A – verde pubblico e residenziale; Usa B – area industriale

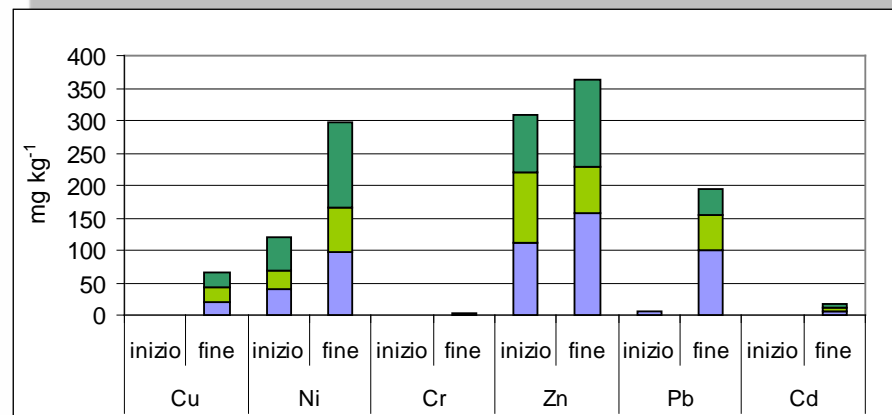
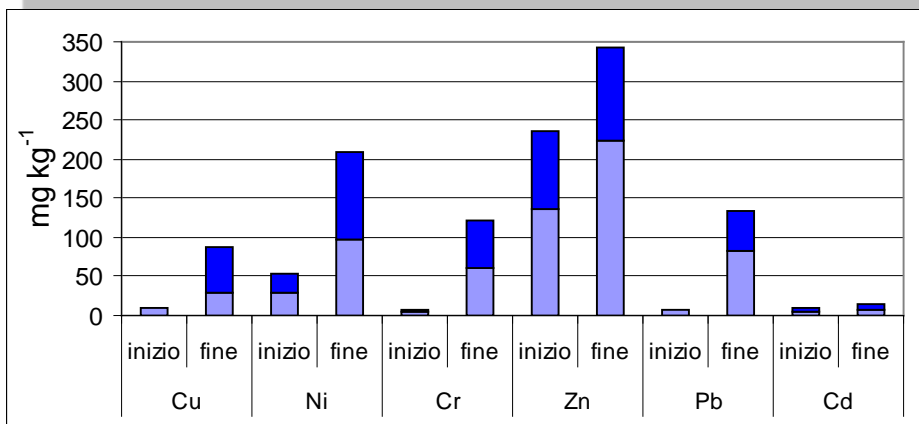
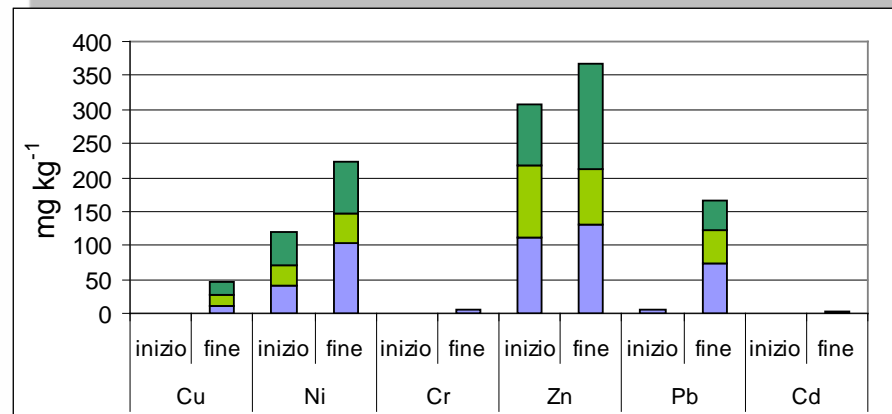
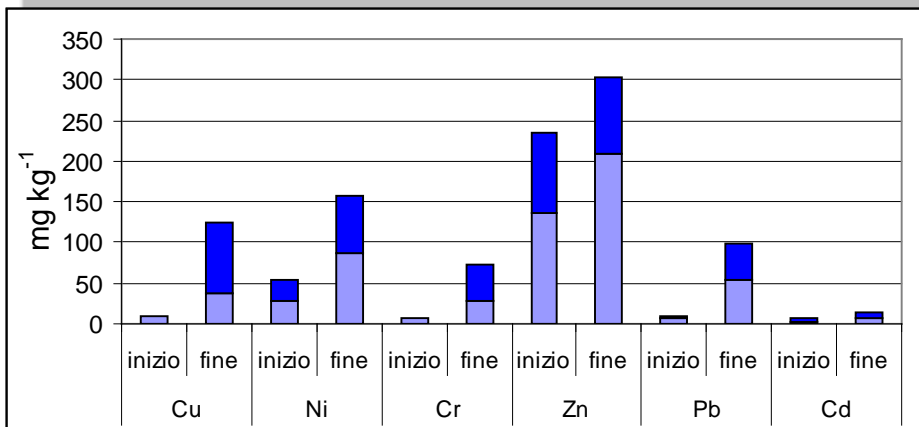
#### Idrocarburi totali



## Metalli nel *Paspalum* e *Tamarix*

■ Parte epigea  
■ Parte radicale

■ Foglie  
■ Fusto  
■ Parte radicale



Si nota un accumulo di metallo nei tessuti vegetali in funzione del tipo di metallo, del trattamento e tempo di contatto

## Stepwise forward regression (Statistica 6.0)

- Analisi dei parametri significativi

1. La permeabilità idraulica migliora in seguito all'attivazione microbiologica del sedimento:

$$k = 0.76Dh-ase + 0.69B-glu + 0.48TEC \quad [R^2= 0.76]$$

2. Le sostanze umiche presenti nel sedimento sono capaci di legarsi agli idrocarburi, che possono essere così degradati dai microorganismi:

$$Idrocarburi = 10.2 - 0.58pH - 0.35C/N + 0.4TEC \quad [R^2= 0.87]$$

3. I composti organici prodotti dagli essudati radicali stimolano la solubilità dei metalli, mentre le sostanze umiche li fissano:

$$Metalli\ totali\ (Paspalum + Tamarix) = 26.26 + 0.89WSC - 0.33TEC$$

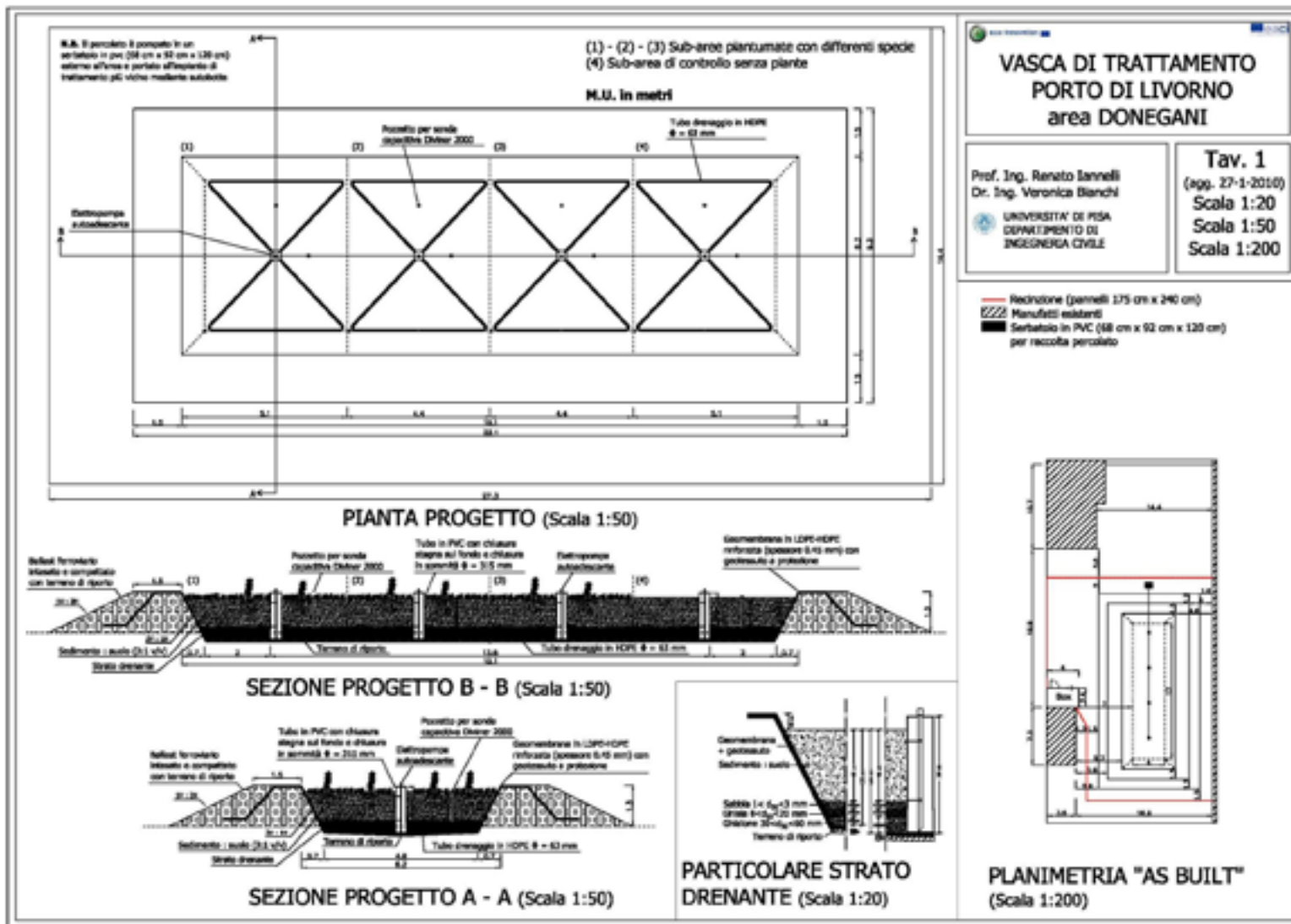
Riferimenti:

Bianchi and Ceccanti (2009)

Bianchi et al. (2008)

[R<sup>2</sup>= 0.87]

# “AGRIPORT” No. ECO/08/239065/S12.532262 2009 2009 – 2012



## "AGRIPORT" - Bilancio economico

treated sediments per cycle	80	m <sup>3</sup>		
treatment surface	160	m <sup>2</sup>		
width of cultivation lanes	6	m		
length of cultivation lanes	26,67	m		
overall required surface	392	m <sup>2</sup>		
<i>Estimated costs:</i>	<i>quantity</i>	<i>u.m</i>	<i>specific cost</i>	<i>total cost</i>
<i>Stable installation to be rebuilt every 20 years:</i>			<i>(€/u.m.)</i>	<i>(€)</i>
excavation	24	m <sup>3</sup>	4,0	96,0
liner	163,33	m <sup>2</sup>	10,0	1633,3
draining pipes	53,33	m	6,0	320,0
draining pebbles layer	48	m <sup>3</sup>	16,5	792,0
irrigation system	160	m <sup>2</sup>	6,0	960,0
hydraulic and general equipment (10%)	1	n	380,1	380,1
<i>Total stable installation</i>				<i>4181,5</i>
<i>Cyclic works to be repeated every 2 years (duration of cycle)</i>				
handling and transportation of sediments from port	80	m <sup>3</sup>	3	240,0
vegetal soil to be added for mixing (30%)	24	m <sup>3</sup>	15	360,0
geotextile	160	m <sup>2</sup>	2	320,0
mixing and preparation of beds	104	m <sup>3</sup>	1	104,0
shrub planting (including workmanship)	160	n	2	320,0
grass planting (including workmanship)	640	n	0,5	320,0
green amendment (including workmanship)	1600	kg	0,2	320,0
earthworms spreading (including workmanship)	160	m <sup>2</sup>	2	320,0
running workmanship (total per cycle)	20	hours	15	300,0
irrigation water (total per cycle)	160	m <sup>3</sup>	1	160,0
leachate treatment and disposal (total per cycle)	32	m <sup>3</sup>	2	64,0
removal and disposal of plants at the end of cycle	0,32	ton	100	32,0
removal of treated soil	104	m <sup>3</sup>	3	312,0
land rental (total per cycle)	392	m <sup>2</sup>	0,4	156,8
<i>Total per cycle</i>				<i>3328,8</i>
<b>OVERALL SPECIFIC TREATMENT COST:</b>	<b>46,84</b>	<b>€/m<sup>3</sup></b>		

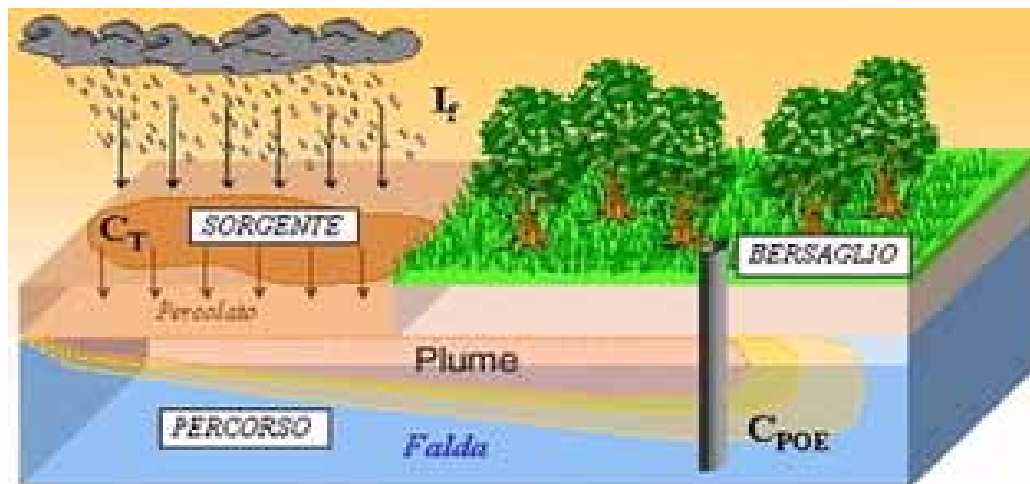
## Il mercato di riferimento

Immobilisation	50-100	€/m <sup>3</sup>
Landfill (not including dredging and transport)	20-25	€/m <sup>3</sup>
Novosol® (Solvay)	68,50	€/m <sup>3</sup>



## Analisi di rischio associata alla tecnica di fito-trattamento

Strumento avanzato di supporto alle decisioni nella gestione dei siti contaminati che consente di valutare, in via quantitativa, i rischi per la salute umana connessi alla presenza di inquinanti nelle matrici ambientali.



Il punto di partenza per l'applicazione dell'analisi di rischio è lo sviluppo del **Modello Concettuale del Sito** (MCS), basato sull'individuazione e parametrizzazione dei 3 elementi principali:

- la sorgente di contaminazione,
- i percorsi di migrazione degli inquinanti attraverso le matrici ambientali,
- i bersagli o recettori della contaminazione nel sito o nel suo intorno.

$$R = E \times T$$

rischio

**E** ([mg/kg d]) rappresenta l'assunzione cronica giornaliera del contaminante

**T** ([mg/kg d]<sup>-1</sup>) la tossicità del contaminante

→ <1 non cancerogene (APAT)

→ <10<sup>-6</sup> cancerogene (APAT)

## Analisi di rischio associata alla tecnica di fito-trattamento

### Calcolo del rischio (RISC 4.0) – *forward analysis*

A) Accumulo dei sedimenti nella vasca di stoccaggio interna al porto di Livorno (situazione reale)

B) Fito-trattamento *off site* dei sedimenti

Sorgente: suolo superficiale.

Meccanismi di trasporto: erosione del vento, volatilizzazione e dispersione dei vapori.

Vie di esposizione: suolo superficiale, aria outdoor.

Modalità di esposizione: (A) ingestione suolo, contatto dermico; (B) ingestione suolo e vegetali, contatto dermico, (A e B) inalazione di polveri e vapori.

Ricettore: (A) adulti, lavoratori; (B) adulti e bambini area residenziale.

**Sostanze non cancerogene (pericolo cumulativo): HI < 1 (APAT, 2006):**

<b>Caso peggiore = (A)</b>	Contatto dermico = 1.7	Inalazione di vapori = 25
Caso (B)	Ingestione di vegetali = 1.4	Inalazione di vapori = 0.98

## Analisi di rischio associata alla tecnica di fito-trattamento

Considerata l'abbondante biomassa vegetale sviluppata sulla matrice da bonificare e quindi la "diluizione" dei metalli nelle parti epigee della pianta, il rischio derivante dall'ingestione di parti vegetali, risulta sovrastimato.

### Calcolo degli obiettivi di bonifica – *backward analysis*

Contaminanti	(A)				(B)			
	Sedimento Superficiale		Aria Outdoor		Sedimento Superficiale		Aria Outdoor	
	Limiti DLgs 152/06 Uso B	CRS mg/kg <sub>dw</sub>	SSTLs mg/kg <sub>dw</sub>	SSTLs mg/kg <sub>dw</sub>	Limiti DLgs 152/06 Uso A	CRS mg/kg <sub>dw</sub>	SSTLs mg/kg <sub>dw</sub>	SSTLs mg/kg <sub>dw</sub>
Cd	15	13.2	5.7	-	2	3	1.9	-
Cr	800	123	50	-	250	58	36	-
Ni	500	81	33	-	120	56	35	-
Cu	600	85	22	-	120	55	53	-
Pb	1000	541	220	-	100	102	63	-
Zn	1500	1456	590	-	150	1035	640	-
C<12	250	3191	1300	95	10	101	62	-
C>12	750	16461	6700	490	50	1000	640	-

CRS: concentrazione contaminante; SSTL: obiettivo di bonifica

Il fito-trattamento *off site* consente di effettuare, senza alcun rischio ambientale e a costi competitivi rispetto ad altre tecniche di trattamento e smaltimento, un efficace intervento di bonifica di sedimenti marini contaminati da metalli pesanti ed idrocarburi.

## Condizionamento biofisico e recupero dei sedimenti marini: una sfida possibile

### Conclusioni

Il fito-trattamento, che ha previsto l'interazione tra piante-lombrichi-microrganismi (TRIAS) si è dimostrato efficace nella rivitalizzazione e ripristino delle funzioni biologiche del sedimento, nonché nel suo miglioramento fisico-strutturale, conferendo alla matrice degradata dal punto di vista geologico e biofisico, i connotati di un suolo agronomico (*tecno-suolo*), ricollocabile a terra, al fine di ripristini ambientali.

Nondimeno, la tecnica studiata fornisce una valida alternativa alla consueta destinazione finale dei sedimenti contaminati (considerati come rifiuti), che consiste nello smaltimento in discarica controllata.

Ciò implica che lo studio presentato, base scientifica per la realizzazione su *full-scale* del progetto europeo AGRIPORT, rappresenta un sostanziale contributo nella definizione delle linee guida per la gestione dei sedimenti contaminati.

### Articoli su riviste internazionali

1. **Bianchi, V.**, Masciandaro, G., Giraldi, D., Ceccanti, B., Iannelli, R. 2008. Enhanced heavy metal phytoextraction from marine dredging sediments comparing conventional chelating agents (citric acid and EDTA) with humic substance. *Water, Air & Soil Poll.* 193, 323-333.
2. Giraldi, D., Masciandaro, G., Peruzzi, E., **Bianchi, V.**, Peruzzi, P., Ceccanti, B., Iannelli, R. 2008. Hydraulic and biochemical analyses on full scale sludge consolidation reed beds in Tuscany (Italy). *Water Science and Technology* 60, 1209-1216.
3. **Bianchi, V.**, Ceccanti, B. 2009. A Three Components System (TRIAS) in the phytoremediation of polluted environmental matrices. *Toxicological & Environmental Chemistry* 92, 477– 493.
4. **Bianchi, V.**, Masciandaro G., Ceccanti B., Doni S., Iannelli, R. 2009. Phytoremediation and bio-physical conditioning of dredged sediments for their reuse in the environment, *Water, Air & Soil Poll.*, published on line (accepted, in press).
5. Iannelli, R., **Bianchi, V.**, Carducci, A., Battistini, R., Ceccarini, A., Fuoco, R. 2010. Effects of intracellular/dissolved ratios of microcystine-LR onto ultrafiltration removal. *Desalination and Water Treatment* (accepted, in press).
6. Masciandaro, G., **Bianchi, V.**, Macci, C., Doni, S., Ceccanti, B., Iannelli, R. 2010. Potential of on-site vermicomposting of sewage sludge in soil quality improvement. *Desalination and Water Treatment* (accepted, in press).
7. **Bianchi, V.**, Masciandaro, G., Ceccanti, B., Peruzzi, E., Iannelli, R. 2009. Phytoremediation of contaminated sediments: evaluation of acquired agronomic properties and risk assessment. *Chemistry and Ecology* (submitted).
8. **Bianchi, V.**, Ceccanti B., Masciandaro G., Doni S., Macci C., Iannelli R. 2009. Coupling vermiremediation with phytoremediation technology to enhance the efficiency of reclamation of polluted marine sediments, *International Journal of Environmental Engineering* (accepted).

### Capitolo su libri nazionali e internazionali

1. Iannelli, R., Giraldi, D., **Bianchi, V.**, Masciandaro, G. 2008. Utilizzo di essenze vegetali per la decontaminazione e la ricollocazione a terra di sedimenti di dragaggio portuale contaminati da idrocarburi e metalli pesanti. Criteri e strumenti per la valorizzazione dei rifiuti ed il recupero ambientale e funzionale di siti inquinati: il contributo di due Progetti di Ricerca di Interesse Nazionale ISBN: 88-7850-004-6.
2. **Bianchi, V.**, Masciandaro, G., Ceccanti, B., Peruzzi, E., Iannelli, R. 2008. Phyto-bioremediation of polluted marine sediments: the need of a bio-physical approach. *Environmentalism, environmental strategies, and environmental Sustainability*. Nova Science Publishers, Inc., NY. ISBN: 978-1-60741-634-0.
3. Ceccanti B., Masciandaro G., Macci C., Doni S., Giraldi D., **Bianchi V.**, Iannelli R., 2009. *Tecniche di Bioremediation. Il governo delle risorse ambientali nel comune di S. Giuliano Terme*. Felici Ed. ISBN: 978-88-6019-262-2.