

micron



**Bonifica, recupero
ambientale e sviluppo del
territorio: esperienze a
confronto sul fitorimedia**

atti del convegno



micron +

Direttore
Svedo Piccioni

Direttore responsabile
Fabio Mariottini

Segreteria di redazione
Markos Charavgis

Direzione e redazione
Via Pievaiola San Sisto 06132 Perugia
Tel. 075 515961 - Fax 075 51596235
www.arpa.umbria.it
ufficiostampa@arpa.umbria.it

Design
Paolo Tramontana

Fotografia
ICP Milano

Stampa
Grafox, Perugia



INDICE

Presentazione	03
Adriano Rossi	
Il fitorimedio per la bonifica dei siti contaminati: prospettive di sviluppo in Umbria	05
Paolo Sconocchia	
Il ruolo potenziale del fitorimedio nei siti della Provincia di Ferrara: aspetti tecnici ed amministrativi	13
Igor Villani	
Il ruolo delle tecnologie “soft” nella rigenerazione dei brownfields: la visione del progetto europeo HoMBRe	21
Renato Baciocchi, Pierre Menger	
Il rimedio dei suoli e acque contaminati con metalli pesanti, organici ed eccesso di nutrienti: processi biologici utili nella rizosfera	31
Angelo Massacci, Laura Passatore	
Fitotrattamento del percolato di discarica: il caso Alcantara	45
Paolo De Angelis, Daniele Bianconi, Angelo Massacci	
Le attività di REMIDA e l’approccio operativo	57
Andrea Sconocchia	
Prime esperienze di bonifica del suolo dal lindano: le potenzialità della short rotation coppice (SRC) per il recupero ambientale e la sostenibilità economica	65
Daniele Bianconi, Pierluigi Paris, Angelo Massacci	
Il progetto europeo GREENLAND (Gentle remediation of trace element contaminated land): una soluzione verde per l’inquinamento	75
Giancarlo Renella	
Fitostabilizzazione e controllo idrologico in un sito multicontaminato da metalli pesanti nell’area industriale di Porto Marghera	89
L. Pietrosanti, F. Pietrini, G. Matteucci, A. Massacci, R. Aromolo, M.C. Zuin, G. Capotorti, A. Nardella	
Biorisanamento di acque sotterranee contaminate da solventi clorurati: batteri responsabili del processo e strategie applicative	99
S. Rossetti, E. Aulenta, V. Tandoi, M. Majone, B. Matturro, M. Petrangeli Papini	
Esperienze di fitorisanamento presso due aree industriali	107
Luca Marchiol, Guido Fellet, Giuseppe Zerbi, Francesco Boscutti, Barbara Conte, Carlo Montella, Carmine Guarino	
La fito-estrazione assistita per il recupero della fertilità dei suoli agricoli contaminati	125
Massimo Fagnano, Nunzio Fiorentino	
La posizione dell’Unione Petrolifera nei processi di bonifica	139
Donatella Giacometti	



La fito-estrazione assistita per il recupero della fertilità dei suoli agricoli contaminati

Massimo Fagnano (Dip. Ingegneria agraria ed Agronomia, Università degli Studi di Napoli "Federico II")
Nunzio Fiorentino (Dip. Ingegneria agraria ed Agronomia, Università degli Studi di Napoli "Federico II")

Premessa

Il ricorso a scorciatoie piuttosto che agli investimenti per la ricerca di metodi per la riduzione dei costi di produzione, hanno portato molte imprese a smaltire i reflui dei propri cicli produttivi in maniera più o meno illegale. Numerose inchieste (*Cassiopea*, *Spartacus*) hanno messo in luce un fitto intreccio tra economia legale e organizzazioni criminali finalizzato allo smaltimento illegale dei reflui industriali. Si stima che più di 1 milione di tonnellate di fanghi industriali provenienti dalle industrie di Piemonte, Lombardia, Emilia Romagna, Veneto e Toscana sia stato smaltito dalle organizzazioni criminali nelle aree agricole della Campania.

I meccanismi di smaltimento erano prevalentemente 3: sotterramento di carichi pericolosi (fusti, container ed addirittura rimorchi con tutto il loro carico) con conseguenti livelli di inquinamento molto alti, ma puntiformi; sversamento di fanghi nei pozzi, con conseguente inquinamento diretto delle falde; miscelazione dei fanghi con compost e distribuzione sui suoli agricoli come ammendante. Nel primo caso (intombamento), le uniche tecniche di risoluzione del problema possibili sono quelle che portano alla rimozione dei materiali contaminati e lo smaltimento in discariche controllate. Nel secondo caso (sversamento nelle falde), gli inquinanti sono stati trasportati al suolo in maniera inconsapevole dagli agricoltori attraverso l'irrigazione. La stessa dinamica ha interessato la fertilizzazione con compost di bassa qualità: una virtuosa pratica agricola si è trasformata in una delle più diffuse cause di inquinamento soprattutto nelle pianure irrigue interessate da agricoltura intensiva. A queste forme di inquinamento dovute allo smaltimento illegale dei rifiuti industriali si è anche aggiunta la deposizione di particelle derivate dalla combustione di rifiuti sia urbani che industriali (vedi www.laterradeifuochi.it).



Tutto ciò ha determinato la presenza di inquinamento di strati di terreno abbastanza superficiali, con livelli di concentrazione spesso moderati, ma che purtroppo interessa aree molto vaste.

In Campania sono stati identificati 6 Siti di Interesse Nazionale che coprono circa 170.000 ha (fig. 1):

- Napoli Orientale (Legge 426/1998);
- Litorale Domitio Flegreo ed Agro Aversano (Legge 426/1998);
- Napoli-Bagnoli Coroglio (Legge 426/1998);
- Aree del Litorale Vesuviano (Legge 179/2002);
- Bacino idrografico del fiume Sarno (Legge 266/2005);
- Pianura (DM 11 aprile 2008).

Il SIN più grande (Litorale Domitio Flegreo ed Agro Aversano) è quasi tutto rappresentato da aree agricole che sono in via di abbandono a causa della crescente difficoltà di vendere i prodotti agricoli anche a prescindere dal loro effettivo inquinamento. In questo contesto di degrado territoriale, che rende tristemente nota la Campania, ma che non risparmia le aree più industrializzate del Paese, è andata crescendo la necessità di sviluppare protocolli di bonifica che mirino al ripristino della fertilità dei suoli ed alla loro restituzione alle tradizionali produzioni agricole.

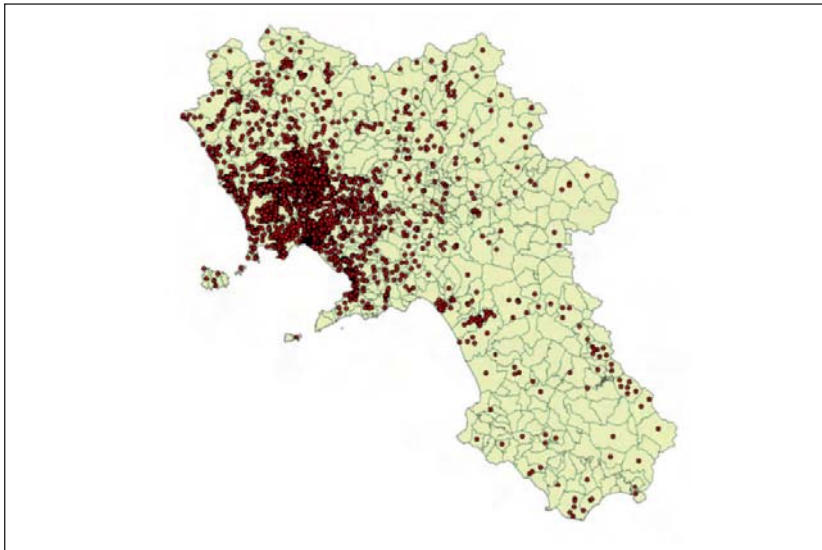


Figura 1. Siti potenzialmente inquinati in regione Campania (ARPAC, 2005)



Inoltre, negli ultimi anni si è andata sviluppando un'altra esigenza: la produzione di biomasse per uso energetico e come materia prima per la chimica verde. La conversione in energia di tali biomasse è caratterizzata da un bilancio neutro per le emissioni di carbonio perché, a differenza dei combustibili fossili, la CO₂ emessa durante la combustione corrisponde a quella che le piante hanno assorbito con la fotosintesi in tempi recenti dall'atmosfera, e, di conseguenza, non contribuisce all'innalzamento dell'effetto serra. Inoltre, la riduzione delle disponibilità di prodotti petroliferi ed il conseguente prevedibile aumento dei prezzi sta spingendo le principali industrie nazionali ad intensificare i loro investimenti nel settore della chimica verde basato sull'uso di risorse rinnovabili, quali le biomasse verdi e le molecole prodotte dalla fotosintesi (cellulosa, lignina, trigliceridi, ecc.).

Il principale fattore limitante di questo settore è la necessità di ampie superfici per la coltivazione delle specie da biomassa: ciò potrebbe sottrarre i suoli più fertili alla tradizionale agricoltura per la produzione di cibo mettendola così ancor più a rischio a partire dalle aree cerealicole dove i ridotti margini di guadagno già ora mettono a serio rischio la sopravvivenza economica delle aziende agricole.

I rischi connessi a questa riduzione di superfici agricole, non consistono tanto nell'aumento dei prezzi dei prodotti alimentari o nella perdita di sovranità alimentare dei Paesi industrializzati, quanto nella riduzione dell'accesso al cibo dei cittadini dei Paesi in via di sviluppo (anche a causa del c.d. land grabbing) con conseguente aumento dei morti e delle migrazioni per fame.

Naturalmente non è accettabile da nessun punto di vista uno sviluppo che comporti questi effetti "collaterali".

In questo quadro il gruppo agronomico del Dipartimento di Ingegneria agraria ed Agronomia dell'Università di Napoli ha promosso diverse linee di ricerca per sviluppare protocolli di bonifica eco-compatibile basati sull'utilizzazione di piante interessanti per le industrie della green economy nazionale. Alcune di queste ricerche saranno sviluppate nell'ambito del progetto PON "Filiera agro-industriali integrate ad elevata efficienza energetica per la messa a punto di processi di Produzione Eco-compatibili di Energia e Bio-chemicals da fonte rinnovabile e per la valorizzazione del territorio (acronimo EnerbioChem)"; recentemente finanziato, ed al quale partecipano partner industriali come la Novamont o la Chemtex.



La fitoestrazione: limiti e prospettive per ottimizzare il processo di bioaccumulo

Studi accurati sulle concentrazioni di metalli presenti nei tessuti di alcune piante misero in luce la loro straordinaria capacità di bioaccumulo verso uno o più metalli pesanti (Chaney *et al.*, 1995).

Le ricerche sull'uso delle piante per la bonifica dei suoli contaminati sono state spinte soprattutto dal fatto che la fitoestrazione, rispetto alle altre tecniche di bonifica convenzionali, è molto più economica (tab. 1).

Trattamento	Fattori aggiuntivi	Costo (\$/ton)
Vetrificazione	Monitoraggio a lungo termine	75-425
Smaltimento in discariche	Trasporto/scavo/monitoraggio	100-500
Trattamenti chimici	Riciclaggio dei contaminanti	100-500
Elettrocinesi	Monitoraggio	20-200
Fitoestrazione	Monitoraggio	5-40

Tabella 1. Costi delle tecniche per il trattamento del suolo

Fonte: Glass, D.J., (1999). *Economic potential of phytoremediation*. In: Raskin, I., Ensley, B.D. (Ed.), *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment*. John Wiley & Sons, New York, 15-32

Le piante per la fitoestrazione di tali metalli dovrebbero avere, preferibilmente, le seguenti caratteristiche (Alkorta *et al.*, 2004):

- 1) tolleranza ad alte concentrazioni di metalli;
- 2) accumulare grosse quantità di metallo nei loro tessuti fuori dal suolo;
- 3) rapido tasso di crescita;
- 4) produzioni ragionevoli di elevate biomasse in campo;
- 5) abbondante apparato radicale;
- 6) facilità di gestione culturale;
- 7) proprietà geneticamente stabili;
- 8) eventuale interesse economico della biomassa.

Le piante che riescono ad accumulare metalli nei tessuti della parte aerea in concentrazioni di almeno 1% (Zn, Mn), 0,1% (Ni, Cr, Co, Cu, Pb e Al), 0,01% (Cd e Se) o 0,001% (Hg) su peso secco (Baker e Brooks, 1989) sono dette iperaccumulatrici.

In relazione ai suddetti requisiti, tutte le specie iperaccumulatrici hanno uno o



più dei seguenti difetti: lento e ridotto sviluppo di biomassa, derivante dalla spesa energetica necessaria per sostenere i meccanismi fisiologici che le proteggono dai metalli in eccesso presenti nel suolo (Boyd, 1998); apparato radicale poco esteso; necessità di determinate condizioni climatiche per il loro sviluppo ottimale; necessità di pratiche agronomiche per ottimizzare il processo di bioaccumulo e selettività di assorbimento (Ensley *et al.*, 1999). I tempi di bonifica variano, da 1 a 20 anni (Kumar *et al.*, 1995), in funzione del tipo e della gravità dell'inquinamento, della durata dello sviluppo della pianta e dall'efficienza estrattiva.

Per questi motivi, al fine di massimizzare le quantità di metalli estratti dal suolo, recentemente la ricerca si è indirizzata maggiormente verso specie ad alta produzione di biomassa, piuttosto che specie iperaccumulatrici (fig. 2).

Tra le specie a rapido accrescimento la Canna comune (*Arundo donax L.*), o canna domestica, è senz'altro una delle più interessanti.

La sua area di origine si estende dal bacino del Mediterraneo al Medio Oriente fino all'India, ma attualmente si può rinvenire, sia piantata che naturalizzata, nelle regioni temperate e subtropicali di entrambi gli emisferi.

Rispetto alle specie annuali, le colture erbacee perenni, come l'Arundo, presentano vantaggi energetici significativi, permettendo di ammortizzare i costi d'impianto (pari al 50% dell'energia totale spesa per la coltura) lungo l'intera durata della coltivazione, che può superare i 20 anni. Il limitato bisogno di lavorazioni del terreno, la prolungata ed intensa copertura del suolo e la resistenza alla trazione delle radici, rendono questa specie capace di incrementare la sostanza organica del suolo e ridurre i processi erosivi.

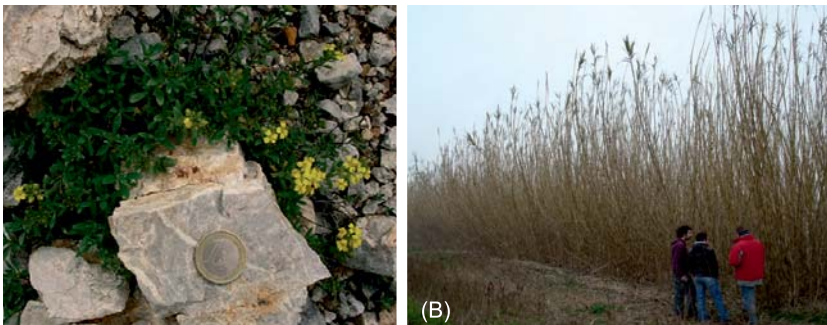


Figura 2. Differenze di habitus vegetativo tra specie iperaccumulatrici, *Alyssum wulfenianum* (A) e specie ad alta produttività di biomassa, *Arundo donax* (B)



La sua spiccata rusticità legata alla bassa esigenza di elementi nutritivi, alta resistenza a patogeni/parassiti, ed a stress idrici e termici rende inoltre l'Arundo adattabile ad ambienti molto poco ospitali e marginali come i substrati a forte concentrazione salina oppure inquinati.

Alcuni studi hanno recentemente messo in evidenza le capacità di *A. donax* per il risanamento o decontaminazione ambientale di siti fortemente inquinati da sostanze organiche o metalli pesanti mediante il loro assorbimento, degradazione e stabilizzazione come soluzione efficace e sostenibile da un punto di vista economico e ambientale. La canna comune presenta, inoltre, il vantaggio ecologico di non essere appetita dagli animali, e quindi evita la diffusione di sostanze tossiche e persistenti nella catena alimentare.

Gou e Miao (2010) hanno osservato come la canna comune possieda una forte tolleranza ai metalli pesanti ed in presenza di forti concentrazioni di cadmio e nichel non sono stati osservati effetti depressivi a carico del tasso fotosintetico e della crescita della pianta così come di altri importanti parametri fisiologici, quali conduttanza stomatica, concentrazione intercellulare di CO₂, resistenza stomatica, contenuto e fluorescenza della clorofilla (Papazoglou *et al.*, 2007).

L'*Arundo donax* si presenta quindi come la specie più adatta al nostro scopo, soddisfacendo tutti i requisiti necessari:

- è una specie a rapidissima crescita (tra le migliori al mondo): quasi 10 cm al giorno;
- non necessita di particolari cure colturali;
- si adatta a quasi tutti i tipi di suoli;
- produce, in condizioni ottimali, una notevole quantità di biomassa (fino a 40-50 t ha⁻¹);
- ha un apparato radicale profondo (200 cm);
- impedisce il pascolamento, essendo una specie non pabulare e garantendo una copertura fitta.

Utilizzazione delle biomasse

La biomassa usata per estrarre gli inquinanti, può avere un valore economico se impiegata per produrre energia per combustione o gassificazione seguita da cogenerazione. Le ceneri prodotte, ovviamente ricche in metalli, possono essere destinate, qualora economicamente conveniente, a processi estrattivi per



recuperare i metalli stessi. Tra le tecniche idrometallurgiche usate per estrarre i metalli dalle ceneri, il metodo carrier in pulp potrebbe fornire una soluzione ai problemi connessi al trattamento e recupero dei metalli dalle ceneri prodotte dopo l'incenerimento dei residui vegetali (Alloro *et al.*, 2008). Nel caso in cui ciò non sia possibile tali ceneri possono essere incorporate in conglomerati cementizi (Cunningham e Ow, 1996), in materiali non soggetti a degradazione o, ancora, destinate alla discarica, con il vantaggio di un ridotto volume rispetto alla biomassa tal quale (Kumar *et al.*, 1995; Mosca *et al.*, 2004).

Anche diverse produzioni no food (amido per la produzione di carta, colle, plastiche, olio per la produzione di biodiesel o oli industriali) possono portare ad un possibile ritorno economico, in quanto molte specie sono utilizzate per i semi (es. brassicacee) dai quali si estrae l'olio e molte piante non traslocano i metalli agli organi riproduttivi (Mosca *et al.*, 2004).

Numerose ricerche hanno anche prospettato la possibilità di produrre etanolo dalla biomassa dell'*Arundo donax*, previa separazione della cellulosa, idrolisi, fermentazione alcolica e distillazione. I residui ligninici (20/30% della biomassa iniziale) contenuti i metalli, potrebbero poi essere utilizzati per la produzione energetica, con combustione o meglio pirogassificazione. Quest'ultima tecnologia appare più interessante perché la combustione determina bassissime emissioni di CO₂ in quanto il gas ricco di idrogeno (syngas) in fase di combustione viene ossidato ad H₂O, ed anche perché determina una produzione di ceneri (ricche di metalli) molto più contenuta (5/10%) rispetto alla normale combustione dei termovalorizzatori (20/30%), con evidenti vantaggi sui costi di smaltimento in discarica.

Recenti ricerche ancora in corso (Pirozzi *et al.*, 2010) hanno evidenziato anche la possibilità di utilizzare la biomassa di *A. donax* come substrato per la coltivazione di lieviti oleaginosi dai quali è possibile estrarre lipidi per la produzione di biodiesel. La stessa cellulosa può essere utilizzata come *building block* per lo sviluppo di polimeri biodegradabili.

Al fine di potenziare le capacità dell'*A. donax* di estrarre metalli dai suoli contaminati, nella nostra sperimentazione a scala di campo abbiamo potenziato la fitoestrazione mediante l'aggiunta al suolo di sostanze in grado da un lato di aumentare la biodisponibilità dei metalli pesanti e dall'altro di migliorare l'attività radicale delle piante: ovvero compost e *Trichoderma spp.*



Ruoli del compost

La sostanza organica derivante dall'aggiunta di compost immobilizza i metalli pesanti che poi la mineralizzazione rende biodisponibili successivamente (Mc Grath *et al.*, 2000). In altri termini le sostanze umiche riducono la mobilità passiva (diffusione, trasporto di massa) con il rischio di contaminare i corpi idrici adiacenti, ma aumentano la mobilità attiva (assorbimento radicale) che è mediata dagli acidi organici essudati dalle radici. Infatti, l'aggiunta di sostanze umiche immobilizza i metalli in complessi organo-metallici stabili proteggendoli dalla solubilizzazione, e riducendo così il rischio di lisciviazione e quindi di inquinamento delle falde. In presenza degli acidi organici degli essudati radicali, però, si consente il rilascio e quindi l'assorbimento da parte delle piante fitoestratrici (Piccolo, 1989; Fiorentino *et al.*, 2010; Fiorentino *et al.*, 2012). Inoltre, il compost si è rilevato essere molto adatto nei processi di phytoremediation in quanto è dotato di microrganismi con elevate capacità metaboliche e di biodegradazione nei confronti di molti composti organici tossici come idrocarburi policiclici aromatici, solventi clorurati e pesticidi (Vallini *et al.*, 2002).

Ruoli delle micorrize (Trichoderma spp)

Il *Trichoderma* è un fungo comune della rizosfera. È dimostrato che riesce ad instaurare una simbiosi di tipo mutualistico con la porzione ipogea delle piante e, mediante iperparassitismo, limita fortemente la crescita di funghi patogeni. Infatti, la produzione di metaboliti tossici e la forte azione micoparassitaria lo rende un ottimo antagonista di numerosi funghi patogeni di importanza economica come *F. oxysporum*, *R. solani*, *Phytophthora spp.*, *Verticillium spp.* e altri. Inoltre, i funghi del genere *Trichoderma* esplicano una attività di antibiosi attraverso la produzione di un vasto numero di metaboliti secondari ad attività antibiotica (Harman *et al.*, 2004). Alcuni ceppi stabiliscono forti e durature colonizzazioni delle superfici delle radici penetrando addirittura fino al di sotto dell'epidermide (Woo e Lorito, 2007). Grazie alla produzione di una grossa varietà di enzimi depolimerizzanti, *Trichoderma spp.* sono capaci di utilizzare come fonte di carbonio e azoto un ampio gruppo di composti e ciò, insieme all'abbondante produzione di conidi e all'adattabilità a diverse condizioni ambientali, conferisce a queste specie un'elevata competitività rispetto alla restante microflora del terreno. Altri ceppi di *Trichoderma* interagiscono



attivamente con la pianta promuovendone la crescita delle radici e del fusto (Harman *et al.*, 2004).

Negli ultimi anni è stata dimostrata anche la capacità di alcuni ceppi di *Trichoderma* di biodegradare o comunque tollerare una vasta gamma di inquinanti ambientali, tanto è vero che in letteratura è riportato il suo impiego nella phytoremediation di suoli inquinati da idrocarburi (Harman *et al.*, 2004). Tali ceppi, in virtù delle loro peculiarità, sono stati inseriti anche in programmi di recupero di suoli; essendo microrganismi rizosfera-competenti che contribuiscono alla stabilità delle comunità microbiche nella rizosfera, controllano la microflora patogena e competitiva; insomma, migliorano la salute delle piante e aumentano lo sviluppo e la densità delle radici. Nella fattispecie si è visto che il ceppo T22 di *T. harzianum* aumenta notevolmente l'efficacia delle piante utilizzate per il fitorisanamento e recenti studi hanno dimostrato che il trattamento delle radici di felci con questo fungo determina una drastica riduzione dei livelli di arsenico nei suoli contaminati ed un significativo incremento della biomassa radicale rispetto alle piante controllo (Harman *et al.*, 2004).

Obiettivi della ricerca

Lo scopo della ricerca è stato quello di testare la capacità fitodepuratrice dell'*A-rundo donax* includendola in un protocollo di "fitoestrazione" assistita tramite l'inoculazione con *Trichoderma* e la fertilizzazione con compost.

Sono stati utilizzati materiali facilmente reperibili in commercio ed economici come il compost e un bioregolatore commerciale a base di *Trichoderma* e non si è ritenuto opportuno intervenire con concimazioni minerali ed irrigazioni con l'obiettivo di valutare un protocollo di fitoestrazione assistita a basso costo.

Si è scelto un sito moderatamente inquinato perché rappresenta, in maniera chiara, quella che è la situazione della maggior parte dei siti contaminati in Campania caratterizzati da un inquinamento di tipo diffuso.

Primi risultati di campo

Il campo sperimentale è stato allestito in un'azienda privata e si trova ad Acerera, in provincia di Napoli, località inclusa nel Sito di Interesse Nazionale (SIN) Litorale Domitio Flegreo ed Agro Aversano. Le applicazioni di compost di bassa qualità e la combustione di rifiuti sono state riconosciute come le prin-



cipali fonti di inquinamento da cadmio (ARPAC, 2005). La tessitura del terreno è sabbiosa-limosa (USDA), con un alto contenuto di carbonati (50% in media), un pH sub-alcino (7,7) e un alto tenore di carbonio organico e azoto totale (1,73/0,18% rispettivamente). Il livello di contaminazione è moderato (3,4 mg kg⁻¹), considerata la soglia di 2.0 mg kg⁻¹ prevista dal DLgs 152/06.

La fertilizzazione con il compost e l'inoculazione dei rizomi di *Arundo donax* con *Trichoderma* sono state combinate in modo fattoriale ottenendo i seguenti trattamenti: rizomi non inoculati e non fertilizzati (NT-NC); rizomi inoculati e non fertilizzati (T-NC); rizomi non inoculati e fertilizzati (NT-C) e rizomi inoculati e fertilizzati (T-C).

I trattamenti con compost e *Trichoderma* sono stati disposti in parcelle di 132 m² (6 x 22 m) ed inclusi in uno schema a blocchi randomizzati con tre repliche.

Il compost utilizzato, ottenuto da scarti verdi e frazione organica dei rifiuti solidi urbani (RSU), presentava un bassissimo contenuto in elementi potenzialmente tossici (PTEs) e le sue caratteristiche rientravano nei parametri di legge italiana in materia di fertilizzanti organici (L 784/94, DL 99/92) consentendone l'impiego in agricoltura senza nessuna restrizione. La distribuzione del fertilizzante organico alla dose di 20 Mg ha⁻¹ (FW), corrispondenti a 130 kg N ha⁻¹ è stata effettuata manualmente il 14 aprile 2009 e l'interramento è stato effettuato due giorni dopo a 20 cm con una fresatrice. I rizomi da trapiantare nelle parcelle T-NC e T-C sono stati inoculati con *T. harzianum* A6 immergendoli per 24 h in una sospensione di acqua 100ml/100L e di un bioregolatore commerciale (BioplantGuard[®], Saipan Srl, Cava de' Tirreni, Italia, *T. harzianum* 107 CFU g⁻¹).

Il trapianto è stato effettuato il 17 aprile 2009 ad una profondità di 20 cm con una distanza di 60 cm tra le file con una densità di 2,7 piante m⁻¹.

Le piante sono state irrigate solo dopo il trapianto con l'obiettivo di assicurare un buon contatto tra radici e suolo, mentre durante l'intera stagione di crescita la coltura si è avvantaggiata unicamente dell'acqua meteorica.

I trattamenti sono stati effettuati ad inizio sperimentazione con lo scopo di valutarne gli effetti immediati (prima stagione di crescita) e quelli di medio termine (cicli successivi) legati ad un'unica applicazione.

Gli effetti dei trattamenti sulla produzione di *A. donax* mostrano un'azione sinergica di compost e *Trichoderma*, con un aumento del 38% rispetto alla media degli altri trattamenti (fig. 3).

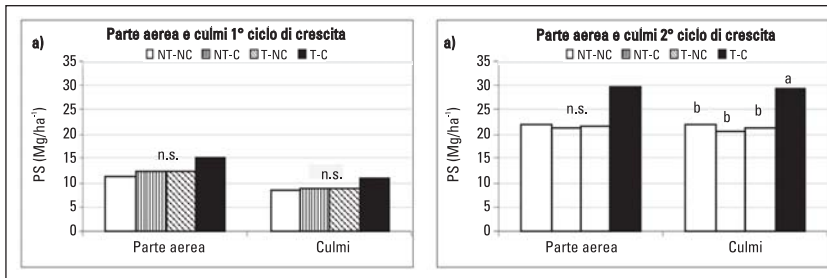


Figura 3 - *Trichoderma x Compost*: effetto sulla produzione di biomassa della parte epigea e dei culmi. Lettere differenti indicano valori diversi per $p < 0,05$

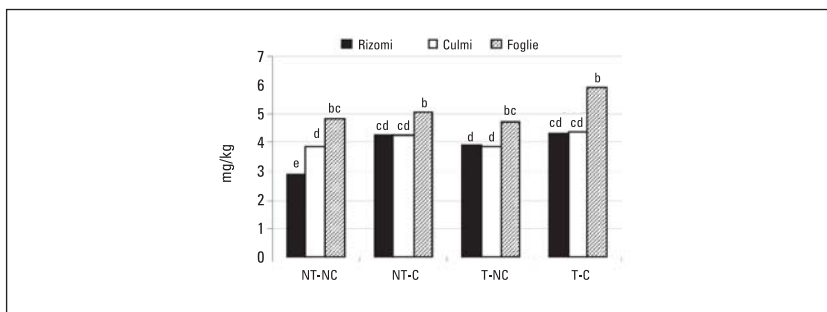


Figura 4 - Concentrazioni di Cadmio nei vari organi della pianta nel primo anno di crescita

I trattamenti (Compost e Trichoderma) hanno consentito di aumentare la fitoestrazione del Cd (fig. 4) soprattutto a carico di foglie (+20%) e rizomi (+30%), consentendo di raggiungere valori più alti di quelli riportati in letteratura: 6 mg kg^{-1} vs. $0,57\text{-}1,42 \text{ mg kg}^{-1}$ (Gou e Miao, 2010) o vs. $2,92\text{-}4,02$ (Kos *et al.*, 2003). Le asportazioni totali di Cadmio, nel primo anno non sono state molto alte ($50\text{-}70 \text{ g ha}^{-1}$), ma in linea con quelli riportati in altri lavori (Kos *et al.*, 2003).

Conclusioni e prospettive future

- 1) L'elevata produzione di biomassa dell'*A. donax*, non condizionata dal contenuto di Cd, apre buone prospettive per l'accoppiamento della fitoestrazione assistita con la produzione di energia o di materie prime per lo sviluppo di chimica verde. Questo consentirebbe di recuperare reddito per gli agricoltori rendendo economicamente produttivi suoli non destinabili alle produzioni alimentari e, in tempi medi, di restituire i suoli alle produzioni ordinarie.
- 2) Le asportazioni di Cd del primo anno fanno supporre che la tecnica di fitoestrazione possa essere utile a bonificare il nostro suolo.



- 3) Un ideale protocollo di bonifica con *Arundo donax* prevede la raccolta annuale della biomassa aerea destinata alla filiera energetica e la raccolta dei rizomi a fine ciclo produttivo (circa 10 anni). Culmi a basso contenuto di metalli possono essere utilizzati in processi ad alto livello tecnologico per la conversione in bioetanolo e biodiesel senza creare problemi all'attività della microflora coinvolta, ma non va scartata l'ipotesi di un utilizzo nella termovalorizzazione. La raccolta invernale potrebbe incrementare l'efficienza di questi processi grazie alla minore presenza di foglie nella biomassa aerea, ma va considerato che sarebbe associata ad un ritorno al suolo di notevoli quantità di metalli.
- 4) L'effetto positivo dell'interramento di compost sulla biodisponibilità dei metalli suggerisce la sua utilizzazione estensiva in protocolli di bonifica pianificati a livello regionale. Questo consentirebbe di recuperare la frazione organica dei rifiuti riducendone le quantità trasportate in discarica per introdurla in un ciclo virtuoso di recupero della fertilità dei suoli.
- 5) Gli effetti del *Trichoderma* sono tangibili in entrambi gli anni di sperimentazione. La sua attitudine a stimolare l'accrescimento della biomassa aerea e quindi ad incrementare i quantitativi di metalli asportabili suggeriscono un suo utilizzo soprattutto se in combinazione con il compost.

Naturalmente sono necessarie alcune condizioni per la realizzazione di una filiera sostenibile:

1) *Esistenza sul territorio di tutti gli attori della filiera entro un raggio critico di 50-70 km*

Trattandosi di un sistema molto complesso, nel quale i costi legati ai trasporti incidono in maniera particolare, è necessario organizzare la presenza sul territorio degli operatori appartenenti a tutti i sistemi produttivi coinvolti:

- sistema agricolo (coltivazione e produzione);
- sistema logistico (raccolta, trasporto, primo stoccaggio, ecc.);
- sistema industriale (trasformazione, gestione ceneri e riciclaggio metalli);
- sistema pubblico di controlli (Enti Locali, Università).

2) *Convenienza economica*

Le industrie sono disposte a pagare le biomasse fino a 40-50 €/t/s.s. Ciò consentirebbe di ottenere redditi agricoli interessanti con PLV pari a circa 1.200-1.500 €/ha/anno. Solo a queste condizioni il sistema risulterebbe autosostenibile.



3) *Sostenibilità ambientale*

Naturalmente è necessario che tutti i segmenti della filiera, dalla coltivazione delle biomasse al trasporto, fino ai processi di trasformazione, siano gestiti in modo da ridurle al minimo l'impatto ambientale.

4) *Fiducia e consenso delle popolazioni*

Un sistema così complesso deve coinvolgere tutti i soggetti presenti sul territorio, attivando operazioni di informazione, divulgazione, pianificazione partecipata, ma soprattutto garantendo la massima trasparenza attraverso un sistema indipendente di controllo e biomonitoraggio, degli impatti.

Bibliografia

Alkorta I., Hernandez-Allica J., Becerril J.M., Amezcaga I., Albizu I., Garbisu C. (2004). Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead and arsenic. *Reviews on Environmental Health* 3, 71-90.

Alorro R.D., Mitani S., Hiroyoshi N., Ito M., Tsunekawa M. (2008). Recovery of heavy metals from MSW molten fly ash by carrier-in-pulp method: Fe powder as carrier. *Minerals Engineering* 21, 1094-1101.

ARPAC (2005). Piano Regionale di Bonifica dei siti inquinati della regione Campania.

Baker A.J.M., Brooks R.R. (1989). Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic elements – Review of their distribution, ecology, and phytochemistry. *Biorecovery* 1, 81-126.

Boyd R.S. (1998). Hyperaccumulation as a plant defensive strategy. In: Brooks R.R. (Ed.) *Plants that hyperaccumulate metals*, CAB International, Wallingford, UK 181-201.

Chaney R.L., Li Y.M., Brown S.L., Angle J.S., Baker A.J.M. (1995). Hyperaccumulator based phytoremediation of metal-rich soils. In: *Will plants have a role in bioremediation? Proceeding of the Fourteenth Annual Symposium, Current Topics in plant biochemistry, physiology and molecular biology*. Aprile 19-22, Columbia MI: 33-34.

Cunningham S.D., Ow D.W. (1996). Promises and prospects of phytoremediation. *Plant Physiology* 110 (3), 715-719.

Enslay B.D., Blylock M.J., Dushenkov S., Kumar N.P.B.A., Kapulnik Y. (1999). Inducing hyperaccumulation of metals in plant shoots. S.U. Patent 5 917 117. Date issued: 29 June 1999.

Fiorentino N., Impagliazzo A., Venterino V., Pepe O., Piccolo A., Fagnano M. (2010). Biomass accumulation and heavy metal uptake of giant reed on polluted soil in southern Italy. *Journal of biotechnology*, 150, S1, 261. doi:10.1016/j.jbiotec.2010.09.155.

Fiorentino N., Fagnano M., Venterino V., Pepe O., Zoina A., Impagliazzo A., Spigno P. (2012). Assisted phytoextraction of heavy metals: compost and *Trichoderma* effects on giant reed uptake and soil quality. *Plant Soil Environ.* (in press).

Glass D.J. (1999). Economic potential of phytoremediation. In: Raskin, I., Enslay, B.D. (Ed.), *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment*. John Wiley & Sons, New York, 15-32.

Gou Z.H., Miao X.F. (2010). Growth changes and tissues anatomical characteristics of giant reed (*Arundo donax* L.) in soil contaminated with arsenic, cadmium and lead. *J. Cent. South Univ. Technol* 17, 770–777.

Harman G.E., Howell C.R., Viterbo A., Chet I., Lorito M. (2004). *Trichoderma* species-opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Review Microbiology* 2, 43-56.

Kos *et al.* (2003). *Plant Soil Environ.*, 49: 548-553.



- Kumar P. B. A. N., Dushenkov V., Motto H., Raskin I. (1995). Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science and Technology* 29, 1232–1238.
- Mc Grath S.P., Zhao F.L., Dunham S.J., Crosland A.R., Coleman K. (2000). Long-term changes in the extractability and bioavailability of Zinc and Cadmium after sludge application. *Environ. Qual.*, 29, 875-883.
- Mosca G., Vamerali T., Ganis A., Coletto L., Bona S. (2004). Miglioramento dell'efficienza agronomica della fitodecontaminazione di metalli pesanti. In: Zerbi G. e Marchiol L. (Ed.) *Fitoestrazione di metalli pesanti, contenimento del rischio ambientale e relazioni suolo-microrganismi-pianta*. Ed. Forum, Udine, 105-135.
- Papazoglou E.G., Serelis K.G., Bouranis D.L. (2007). Impact of high cadmium and nickel soil concentration on selected physiological parameters of *Arundo donax* L. *European J. of Soil Biol.* 43, 207-215.
- Piccolo A. (1989). Reactivity of added humic substances towards plant available heavy metals in soils. *The Sci. of the Total Environ.*, 81/82, 607-614.
- Pirozzi D., Yousuf A., Fagnano M., Mori M., Fiorentino N., Impagliazzo A. (2010). Lipids production by yeast grown on giant reed biomass. *Journal of biotechnology*, 150, S1, 167-168. doi:10.1016/j.jbiotec.2010.08.434.
- Vallini G., De Gregorio S., Pera A., Chuna Queda A.C.F. (2002). Exploitation of composting management for either reclamation of organic wastes or solid-phase treatment of contaminated environmental matrices. *Environmental Reviews/ Dossiers Environ.* 10(4), 195-207.
- Woo S.L., Lorito M. (2007). Exploiting the interactions between fungal antagonists, pathogens and the plant for biocontrol. In: Vurro M., Gressel J. (Eds.), *Novel Biotechnologies for Biocontrol Agent Enhancement and Management*. IOS, Springer Press, Amsterdam, the Netherlands, 107-130.