

## PIOPPICOLTURA A TURNO DI TAGLIO BREVE PER BIOENERGIA E FITORIMEDIO

di Angelo Massacci\*, Daniele Bianconi\*, Pierluigi Paris\*

L'esistenza di siti contaminati, in numero sempre crescente, pone seri problemi di gestione e comporta spesso la perdita di risorse importanti, sotto forma di suoli e acque che non possono essere utilizzati. Il risanamento con tecnologie convenzionali è a volte proibitivo per motivi economici o per la resistenza dell'opinione pubblica, ma rimane spesso l'unica possibilità. Sono da diversi anni studiate tecnologie biologiche di risanamento, biorimedio e fitorimedio, che possono fornire risultati accettabili con un minore impatto ambientale, anche se a volte con tempi più lunghi. In particolare, l'uso di piante superiori per la decontaminazione è limitato per mancanze normative, ma anche per la mancanza di specie vegetali veramente efficaci nei confronti di determinati inquinanti. In questa pubblicazione è esaminata la potenzialità di risanamento ambientale attraverso la piantumazione a turno breve in di pioppi selezionati per la produzione di biomassa per energia e per l'esigenza specifica di contaminazione in due siti contaminate di interesse nazionale in Italia: 1) suolo agricolo inquinato da lindano e suoi isomeri nella Valle del Sacco in provincia di Roma e 2) suolo dell'area industriale dell'Isola dei Petroli (ENI) a Porto Marghera inquinato da metalli pesanti. È inoltre riportato e valutato un esempio di smaltimento di reflui zootecnici mediante spandimento in un impianto di pioppi presso un'azienda agricola di Torre in Pietra nell'Agro Romano.

*The presence of contaminated sites in ever increasing numbers brings several management problems and often leads to a waste of important resources, such as soils and water which cannot be utilised. Remediation with conventional technologies is sometimes unfeasible due to economic reasons or for the opposition of the public opinion, but it is often the only available alternative. Since many years, biological techniques for remediation, bioremediation and phytoremediation, have been studied; they can give acceptable results with a lower environmental impact, even if with longer time periods. In particular, the use of higher plants in decontamination has been limited by legislation constraints, and also for lack of plant species, which can be really effective towards specific contaminants. In this paper the remediation potential of a short rotation coppicing with poplars selected for bioenergy production and for specific remediation needs of two national interest contaminated sites: 1) the agricultur-*

\* Ricercatori presso l'Istituto di Ricerca sulle Acque e l'Istituto di Biologia Agro-ambientale e Forestale del Consiglio Nazionale delle Ricerche, sede a Porano (Terni) e sede a Monterotondo in Via Salaria Km 29,300 (Roma).



*al soil polluted with lindane and isomers in the River Sacco valley in the roman province, 2) the soil of the industrial area of the ENI Oil Island by Porto Marghera, polluted by multiple heavy metals. It is also shown and evaluated an example of manure spreading on a poplar plantation by a farm of Torre in Pietra in the Agro Romano.*

## Introduzione

In Italia sono stati accertati circa 9000 siti contaminati da metalli pesanti e composti organici molto tossici per i sistemi biologici (Tassoni, 1999; Legambiente e WWF, 2004). Tale situazione di pericolosità è affrontata per legge con l'obbligo della messa in sicurezza e/o bonifica delle aree contaminate, sia per le autorità pubbliche e sia per i proprietari delle aree stesse. A questo scopo sono normalmente utilizzati, in modo "ex situ", metodi chimici e fisici di rimozione o distruzione dei contaminanti (US EPA, 2003). Nel caso di siti con superfici molto estese (nella lista compilata da Legambiente, per esempio, se ne trovano molti di qualche centinaia di ettari) le attività di bonifica richiedono costi proibitivi ([www.epareachit.org](http://www.epareachit.org)) e hanno spesso un impatto molto forte e prolungato sull'ambiente (Russel et al., 1991). Negli ultimi due decenni in alternativa a queste tecnologie si sono studiati e valutati con molto interesse nuovi approcci, con tecnologie e biotecnologie "in situ" basate su attività di microrganismi e piante (Marmioli et al., 2003, 2011). Queste biotecnologie sono però al momento applicabili solo a condizioni di contaminazioni moderate. Inoltre, sono poche le piante conosciute che sono in grado di estrarre rapidamente metalli o degradare completamente sostanze organiche, presenti nell'ambiente appena sopra i limiti di tossicità. Per rendere l'uso di queste biotecnologie competitivo ed efficiente occorre quindi avere specie vegetali utili per il risanamento ambientale e in grado di crescere in varie zone climatiche (Massacci et al., 2001). Gli studi effettuati negli ultimi anni sulle specie iper-accumulatrici di metalli pesanti e su quelle in grado di colonizzare aree contaminate da sostanze organiche hanno fornito qualche importante indicazione sulle caratteristiche che possono ritenersi utili in piante eleggibili per tali scopi (Baker et al., 2000). In particolare, per la decontaminazione di metalli pesanti sembra importante



che la pianta accumuli rapidamente tanta biomassa e, contemporaneamente, sia in grado di traslocare alla parte aerea il metallo assorbito dalle radici e di neutralizzarne la tossicità (Pollard et al. 2002). Una strategia in sintonia con queste esigenze potrebbe essere quella di ricercare queste caratteristiche sulle specie arboree, ed in particolare sulle specie ad elevato accumulo di biomassa. Almeno 45 famiglie di piante superiori comprendono specie con caratteristiche che si avvicinano a quelle di iperaccumulatrici e tolleranti di metalli pesanti (Schnoor, 2002). Nel caso di decontaminazione di sostanze organiche, è noto che le piante sono in grado di assorbire e metabolizzare quelle con proprietà moderatamente idrofobiche. Sia per la decontaminazione di metalli pesanti che di sostanze organiche, le salicacee potrebbero, quindi, possedere quei caratteri di elevata biomassa e traspirazione e costituire una parte del materiale vegetale su cui eventualmente ricercare genotipi in grado di traslocare alcuni metalli pesanti nella parte aerea e tollerarne la tossicità. Le specie dei generi *Populus* spp. e *Salix* spp negli ultimi anni sono state proposte per la capacità di accumulare metalli pesanti (Robinson et al., 2000) e numerosi composti organici tossici (Lunackova et al., 2004; Hinchman et al., 1996), inclusi atrazina (Burken and Schnoor, 1997), idrocarburi (Jordahl et al., 1997), erbicidi (Gullner et al., 2001) e tricloroetilene (Newman et al., 1997) appartengono a questa famiglia. I meccanismi alla base della capacità decontaminante da parte di pioppi e salici non sono comunque ben conosciuti (Lux et al., 2004).

Il genere *Populus* è caratterizzato da elevata variabilità genetica con circa 30 specie distribuite nell'emisfero Boreale. L'adattamento a diversi ambienti inerenti l'ampia distribuzione geografica delle specie e il polimorfismo genetico intraspecifico, anche a livello di singola popolazione, offrono una risorsa ricca di variabilità per la selezione di piante candidate per il fitorimedio di varie sostanze xenobiotiche. Inoltre, per le caratteristiche evidenziate in alcuni ibridi di crescere vigorosamente specialmente nella fase giovanile, questo genere si presta particolarmente per realizzare piantagioni ad alta densità di piante per ettaro (5-10.000) e a turno di rotazione molto breve (o *Short Rotation Forestry*).

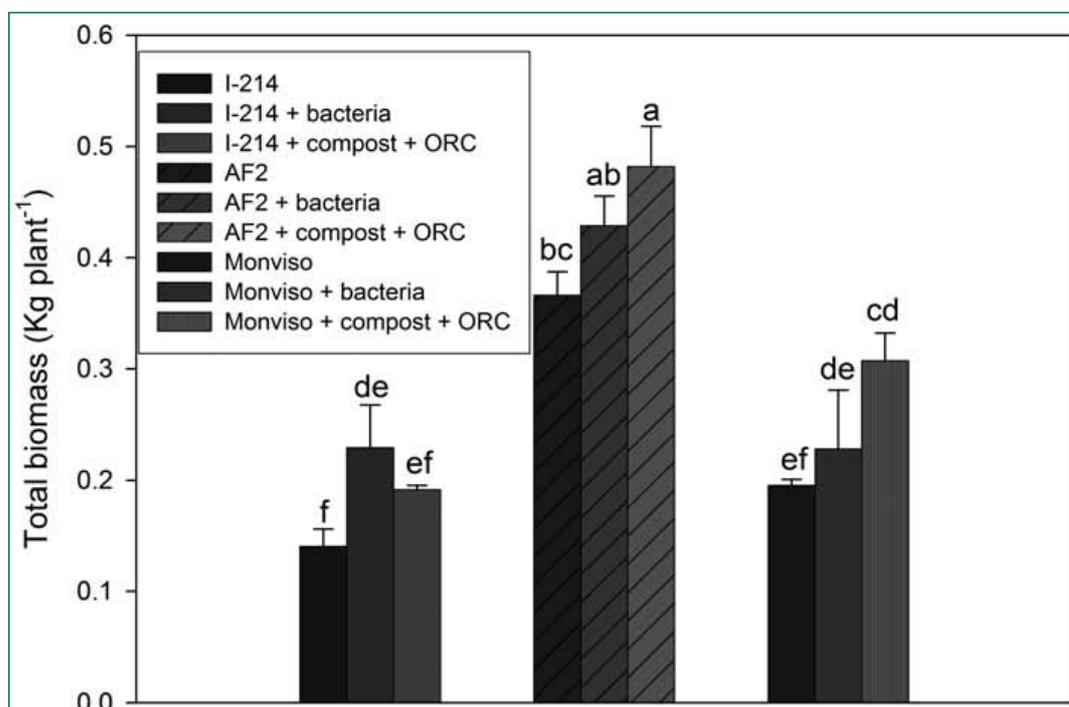


## SRF di pioppo e fitorimediazione

Le piantagioni Srf di pioppo stanno in questo periodo destando l'interesse degli agricoltori italiani per la produzione di biomassa lignocellulosica per la successiva alimentazione di centrali e/o caldaie per la generazione di energia termica e/o elettrica. C'è inoltre la possibilità di usare la biomassa legnosa per la produzione del bio-etanolo da cellulosa, biocarburante di seconda generazione ad alta efficienza.

Recenti ricerche hanno evidenziato che le piantagioni di pioppo Srf possono avere capacità produttive anche molte elevate, con selezioni di nuovi cloni spiccatamente adatti alle caratteristiche della coltura (Fig. 1; Paris et al., 2001). Queste piantagioni possono essere usate per funzioni non solo produttive ma anche ambientali, che vanno ad aggiungersi e completare quella di mitigazione dell'effetto serra attraverso la sostituzione dei combustibili fossili. Queste funzioni ambientali possono essere raggruppate nell'ambito del fitorimediazione, cioè nell'uso delle piante per il disinquinamento ambientale, attraverso l'assorbimento o la degradazione o la stabilizzazione di varie forme di composti pericolosi presenti nel suolo, nell'acqua e nell'aria (Lichta, Isebrands, 2005). I composti pericolosi che possono essere disattivati attraverso il fitorimediazione sono i più vari: gli elementi nutrienti per le piante o fito-nutrienti (in primis azoto- N, e fosforo -P), molti metalli pesanti (Cu, Cd, Zn, Pb), molti inquinanti organici, idrocarburi petroliferi (Lichta, Isebrands, 2005, Rockwood et al., 2004). I meccanismi che stanno alla base del fitorimediazione delle Srf di pioppo vanno ricondotti alla capacità delle piante di acquisire i composti pericolosi attraverso l'assorbimento radicale, oppure di favorire l'attività di microrganismi della rizosfera che degradano i suddetti prodotti pericolosi. L'efficacia del fitorimediazione dipende dalla velocità di accrescimento della pianta, che si traduce in alti tassi di traspirazione e quindi di assorbimento dei composti pericolosi, e da un denso ed articolato sistema radicale che esplora ampi volumi di terreno e che funge da supporto ai microrganismi degradatori. Il pioppo, unitamente ai salici, presenta tutte le suddette caratteristiche in modo molto marcato. È infatti, tra le specie arboree delle zone temperate, quella a più





Produzione di biomassa primo anno. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra le medie per  $p < 0.05$  (Anova) LSD multiple range Test. I valori sono la media di cinque repliche. La barra di errore indica l'errore standard.

rapido accrescimento, con tassi di traspirazione molto alti, e con un capillizio radicale molto sviluppato; il rapporto tra biomassa epigea (fusto, rami e foglie) e biomassa ipogea (radici) è, rispetto alle piante erbacee, molto alto, facendo sì che una porzione significativa della biomassa che ha assorbito il composto pericoloso è al di sopra del suolo e quindi facilmente utilizzabile ed asportabile.

Esempi applicativi di fitorimedio con pioppo e salice sono i più vari: le fasce tampone arborate lungo i corpi idrici (fossi, canali, stagni, ecc.); gli impianti di *short rotation* per il filtraggio di acque reflue di diversa origine (urbana, zootecnica, industriale) e di percolato da discarica di rifiuti urbani; i "cappelli vegetazionali" (o *vegetation caps*) per il tombamento di discariche in sostituzione di materiali impermeabile sintetici o di argilla. Per molti di questi esempi, la Svezia e gli USA sono all'avanguardia, anche perché sono i paesi dove presero avvio le ricerche sulle Srf nella seconda metà del 1900.

Per massimizzare la funzione di fitorimedio delle Srf, attraverso l'assorbimento del contaminante e successiva asportazione della



biomassa epigea, è necessario scegliere con molta accuratezza il modello colturale. Infatti, in Italia, sono in questo momento diffusi tre modelli di Srf di pioppo. Gli impianti Srf possono essere a ciclo quinquennale, biennale ed annuale, con densità d'impianto modulate in funzione della lunghezza del ciclo di taglio (Facciotto, 2006). Gli impianti quinquennali hanno densità d'impianto relativamente basse (1100 piante ha<sup>-1</sup>) che determinano dimensioni dei fusti a fine ciclo con diametri medi superiori ai 10 cm. Nei biennali, le densità d'impianto sono ben superiori a quelle dei precedenti con 5-6000 piante per ha, disposte a file singole distanziate di 2,8-3 m; le dimensioni medie dei polloni al taglio sono ben al disotto dei 10 cm. Negli annuali, le densità sono circa di 14000 piante ad ha e le file sono doppie o binate con piante molto ravvicinate tra loro; al momento del taglio le dimensioni medie dei diametri di questi polloni sono di pochi centimetri. La dimensione media dei fusti ha importanti conseguenze sulla capacità di fitorimedio della piantagione, con quelle annuali che, a parità di biomassa prodotta, hanno maggiori capacità di asportazione dei contaminanti che si vogliono rimuovere dal sito. Nei paragrafi seguenti saranno esposte tre differenti attività di ricerca applicativa per l'uso delle piantagioni di Srf in diversi approcci di fitorimedio.

### **Fitostabilizzazione e controllo idrologico in un sito multicontaminato da metalli pesanti nell'area industriale di Porto Marghera**

L'utilizzo di essenze arboree Salicaceae (*Populus* e *Salix spp.*) come pompe idrauliche naturali per rimuovere l'eccesso di acqua dal suolo è legato alla loro notevole capacità di evapotraspirazione che può assommare, in piante di cinque anni, a 100 litri al giorno. Inoltre alle Salicacee sono riconosciute capacità di fitorimedio nei confronti di diversi metalli grazie soprattutto alla loro rapida velocità di crescita, all'estensione dell'apparato radicale e alla capacità specifica di alcuni cloni di accumulare diversi metalli nelle radici e nella parte aerea. Alcuni studi di laboratorio e di campo hanno mostrato l'elevata variabilità fra specie e cloni rispetto alla capacità di gestire un inquinamento da metalli; i pioppi sono generalmente capaci di accumulare: Zn e Cd nei



tessuti fogliari (Gallagher et al., 2008; Chang, et al., 2008), e sono stati anche usati come bioindicatori per l'inquinamento di As nel suolo; alcuni cloni di salice hanno mostrato buone capacità di rilocalizzazione di Zn and Cd nelle foglie e rami [Rosselli et al., 2003]. Alcuni pioppi sembrano inoltre ben tollerare la presenza di alcuni metalli pesanti nel suolo riuscendo a mantenere un buon tasso di crescita anche in suoli fortemente degradati dalla presenza di questi inquinanti.

In base a queste conoscenze è stato pianificato, nell'ambito di una ricerca ambientale commissionata da Eni, lo studio della capacità delle salicacee di mitigare il rischio di percolazione dagli orizzonti superficiali del suolo alla falda sottostante di As, Cd, Pb e Zn. Il sito sperimentale scelto è stato un' area insulare, denominata "Isola dei Petroli", sita nel distretto industriale della laguna di Venezia, ove attualmente insistono strutture di raffineria, già interessata da operazioni di messa in sicurezza (isolamento idraulico tramite palancole). All'interno di questa area è stato realizzata una piantagione con 2 cloni di *Populus deltoides* Bartr. Ex Marsch. (Dvina and Lena), 1 di *Populus .x canadensis* Moench. (Neva), 2 clone di *Salix matsudana* Koidz. (S76-005 and S76-008), e 1 di *Salix alba* L. (SI64-017), secondo uno schema a blocchi randomizzati con 3 repliche, ad una densità (1 m x 1.5 m) tipica di una *Short Rotation Forestry*; ciascuna unità sperimentale consisteva in una fila di 40 piante di ciascun clone. Una parcella contigua colonizzata da essenze erbacee spontanee ha avuto la funzione di tesi controllo.

Per studiare l'effetto dell'impianto arboreo sul bilancio idrico del sito, l'area sperimentale è stata attrezzata con diversi strumenti e sensori. Le precipitazioni sono state misurate tramite pluviometro, l'umidità del suolo con sensori (TDR, CS615 and CS616, Campbell Inc., USA), installati sia sotto gli alberi che nella parcella di controllo; le variazioni di livello della falda superficiale sono state registrate con un diver (TecnoEl) installato in un piezometro all'interno dell'area sperimentale. La traspirazione è stata misurata con sensori di Granier (UPS, Germany), inseriti in piante di 2 anni rappresentative del vigore medio di ciascun clone. Il suolo è stato campionato per diverse profondità con diverse repliche, campioni di organi delle piante sono stati presi



all'inizio ed alla fine stagione vegetativa mentre 12 piezometri sono stati installati nell'area per monitorare l'acqua di prima falda (0-5 m). Sui campioni di suolo essiccati e vagliati a 2 mm sono stati determinati il contenuto dei metalli tramite ICP (Thermo Jarrell, Ash Iris Advantage). La crescita dei cloni di pioppo e salice è stata determinata misurando parametri dendrometrici (diametro, altezza) e l'attività fotosintetica con camera fogliare (dati non mostrati).

Il bilancio idrico è stato determinato per gli anni 2007 and 2008. Nonostante i due anni di monitoraggio siano stati abbastanza diversi da un punto di vista climatico, con il 2007 relativamente più secco (ETP eccedente le precipitazioni) del 2008, la traspirazione dell'impianto è stata simile e capace di restituire in atmosfera l'80% circa delle precipitazioni verificatesi durante la stagione vegetativa. Se alla misurazione effettuata si aggiungono le perdite per evaporazione diretta (acqua intercettata dalla chioma e direttamente evaporata in atmosfera senza che raggiunga il suolo), il cui valore tipico per le SRC è circa il 20% delle precipitazioni, si suppone che tutta l'acqua piovana sia stata utilizzata durante la stagione vegetativa riducendo così il rischio di percolazione dei metalli rispetto ad una situazione non vegetata.

Riguardo all'asportazione dei metalli pesanti i cloni di pioppo mostrano valori più elevati dei salici per ogni singolo inquinante con Lena e Neva che segnano concentrazioni più elevate rispetto a Dvina. Come comportamento generale Pb and As tendono a concentrarsi maggiormente nelle radici mentre Zn and Cd nelle parti aeree, confermando quanto reperito in letteratura rispetto alla capacità di assorbimento e rilocalizzazione di questi metalli in *Populus* e *Salix spp.* (Gallagher et al. 2008; Rosselli et al. 2003; Uterbrunner et al.; 2007). Dai dati di produzione di biomassa (stimata) e di accumulo metalli del clone Neva una pianta di tre anni è in grado di accumulare circa 5 mg Pb, 12 mg Cd, 825 mg Zn e 1 mg As nelle foglie; 824 mg Pb, 62 mg Cd, 2343 mg Zn e 16 mg As nel fusto e rami; 365 mg Pb, 8 mg Cd, 439 mg Zn and 6 mg As nelle radici. La stima conseguente delle asportazioni per anno e per ettaro dà luogo a risultati modesti.

In generale si può affermare che la migliore gestione dell'inquinamento, applicabile allo specifico sito, è quella di sfruttare la



capacità evapotraspirativa delle piante per migliorare il bilancio idrico si da ridurre il movimento degli inquinanti nel profilo del suolo. Fra le due specie in prova il pioppo ha mostrato, pur con una variabilità fra i cloni, ritmi di accrescimento soddisfacenti e capacità evapotraspirative migliori rispetto al salice.

D'altra parte una strategia di bonifica dei metalli sotto le concentrazioni soglia di contaminazione tramite la fitoestrazione con le salicacee non sembra un'opzione applicabile considerando le asportazioni modeste e i tempi, teoricamente molto lunghi, per portare gli spot inquinati sotto tali limiti. Potrebbe essere invece interessante l'applicazione del fitorimedia con le salicacee agendo sulla frazione più biodisponibile dei metalli dopo un attenta analisi di rischio.

### **Esperienze di bonifica del suolo agricolo dal lindano nella Valle del Sacco**

La Valle Latina o Valle del Sacco è una regione del Lazio meridionale, situata in massima parte nella provincia di Frosinone e per un breve tratto in quella di Roma. L'emergenza ambientale della Valle del Sacco sale alla ribalta solo dopo che nel marzo 2005 l'Istituto Zooprofilattico Sperimentale delle Regioni Lazio e Toscana (IZSLT) riscontrò in un campione di latte di un'azienda bovina da latte sita in Gavignano (RM), livelli di  $\beta$ -esaclorocicloesano ( $\beta$ -HCH) di 0,062 mg/Kg (circa 30 volte superiore ai livelli limite di legge per la matrice considerata, ovvero 0,003 mg/kg) (Centro studi regionale per l'analisi e la valutazione del rischio alimentare, <http://195.45.99.79/csra/>). L'esaclorocicloesano (HCH) e in particolare il lindano ( $\gamma$ -esaclorocicloesano) è uno dei composti organoclorurati più comunemente incontrato (Sala et al. 1999) considerato che in tutto il mondo, sin dal 1940 sono state usate approssimativamente 10 milioni di tonnellate di HCH tecnico come insetticida (Li 1999; IHPA, 2006). Il lindano (e gli isomeri non insetticidi  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\delta$ -), pur non essendo più prodotto ed utilizzato, continua a porre problemi ambientali e di salute poiché biodegrada lentamente e tende ad accumularsi nell'ambiente (Malaiyandi et al. 1982; Huhnerfuss et al. 1992). Diversi studi dell'Istituto Superiore di Sanità (Traiana et al. 2001)



e di altri enti simili di molti Paesi (Spagna, India, America) hanno confermato che gli isomeri del lindano sono presenti nella vegetazione cresciuta su terreni inquinati ed entrano così nella catena alimentare attraverso la catena dei grassi con grave rischio di cancerogenesi per l'uomo. Per questo motivo a partire dal 2005 una consistente area agricola, di circa 800 ettari lungo le sponde del Fiume Sacco, oltre al comprensorio industriale di circa 1000 ettari, è stata dichiarata Sito d'Interesse Nazionale per inquinamento da lindano, assegnandone la gestione esclusiva all'Ufficio commissariale per la Valle del fiume Sacco. La presenza degli isomeri dell'HCH rilevata nei prodotti alimentari viene messa in relazione all'attività industriale (cronicità dell'inquinamento), al dilavamento di terreni/manufatti contaminati presenti all'interno del comprensorio industriale di Colleferro e al ciclo delle acque superficiali (in prevalenza). L'inquinante si è poi diffuso sui terreni della valle attraverso le periodiche e frequenti esondazioni e la distribuzione delle acque irrigue per le colture foraggere.

Nell'ambito della bonifica da lindano nella Valle del Sacco il nostro gruppo di ricerca ha svolto degli studi, sia preliminari in laboratorio sia di applicazione in pieno campo, con l'obiettivo di: 1) valutare l'efficienza di un intervento di rizorimedio, tramite l'utilizzo di diversi cloni di pioppo che abbiano mostrato caratteristiche disinquinanti proprie o in associazione con microrganismi; 2) ottenere una produzione di biomassa legnosa qualitativamente e quantitativamente idonea a sostenere processi di filiera di conversione energetica, in modo tale da poter offrire agli agricoltori un parziale indennizzo economico per l'interdizione dei loro terreni dall'esercizio di attività agricole (Bianconi et al. 2011).

La prima fase sperimentale dell'attività è stata condotta in laboratorio con l'obiettivo la selezione di cloni di pioppi, che risultassero idonei alla coltivazione ad alta densità in *SRF* e ad una applicazione di fitorimedio dei suoli contaminati della Valle del Sacco. Contemporaneamente alla selezione delle piante si sono sperimentati diversi trattamenti sia biologici che chimici, noti per le potenziali capacità degradative, che potessero aiutare la pianta nell'attecchimento, nello sviluppo radicale e nella produ-



zione di biomassa. In particolare sono state approfondite le capacità degradative di batteri già studiati in precedenti esperimenti con sostanze organiche clorurate. L'azione di questi batteri avviene sia in condizioni di presenza e di assenza di ossigeno, ma la degradazione totale avviene solo con ossigeno. Inoltre, per aumentare le capacità di recupero naturale del suolo stesso è stato sperimentato il trattamento con perossido di calcio (ORC) e compost: il primo è, infatti, un ammendante del suolo in grado di rilasciare gradualmente ossigeno in presenza di umidità, già sperimentato nella degradazione di composti organici clorinati; il compost commerciale invece, con la sua alta carica microbica, è stato usato come fonte di carbonio organico (Arienzo 2000; Cassidy and Irvine, 1999). Tale sperimentazione, della durata di due mesi, è stata effettuata in serra su suoli contaminati derivanti dal sito del futuro campo sperimentale.

I trattamenti di rizorimediazione testati direttamente in campo sono stati: i) cloni di pioppo SRC inoculati con i ceppi di batteri selezionati in laboratorio; ii) pioppo associato a suolo trattato con compost commerciale e perossido di calcio; iii) il solo pioppo SRC. I suddetti trattamenti sono stati applicati in un'area sperimentale nella Valle del Sacco, costituita nel 2009 su mandato dell'Ufficio Commissariale. Sono stati usati tre cloni di pioppo ibrido (I-214; Monviso e AF2), prima selezionati in laboratorio. I cloni Monviso e AF2 sono recenti cloni da SRC già in uso in piantagioni SRC commerciali realizzate nella Valle del Sacco, l'I-214 è invece un clone tradizionale della pioppicoltura italiana, utilizzato come "modello" in numerose studi e che nella sperimentazione preliminare, in scala di laboratorio, ha dimostrato buone capacità di rizorimediazione del lindano.

Ad un anno dall'inizio degli esperimenti di applicazione delle tecniche di rizorimediazione in pieno campo c'è stata una forte interazione tra trattamenti di rizorimediazione e cloni di pioppo. L'inoculo con i batteri e con il Compost + perossido di calcio sono stati i trattamenti con maggiore frequenza di successo nella degradazione del lindano totale, espressa come media dei quattro isomeri analizzati (Figura 2). I migliori risultati sono stati ottenuti con il clone Monviso, associato all'inoculo con batteri ed al Compost + perossido di calcio. Con il primo trattamento siamo arri-



vati alla degradazione di quasi il 40% del lindano totale in un solo anno. La maggiore efficacia del Monviso nella degradazione significativa su tutti gli isomeri dell'HCH potrebbe essere associata ad una maggiore produzione di biomassa a livello radicale. Quindi il clone potrebbe aver messo a disposizione più metaboliti in grado di sostenere la proliferazione e l'attività dei ceppi batterici inoculati nella rizosfera. Infatti nel corso della sperimentazione è stata monitorata la popolazione microbica del suolo imperturbato dai trattamenti e la rizosfera delle piante batterizzate con le specie di batteri; da tale monitoraggio si è potuto constatare che la popolazione batterica presente nella rizosfera di tutti i cloni di pioppo ha subito un incremento notevole, in particolare nella rizosfera del clone Monviso.

Infine è da sottolineare che la produzione di biomassa (Figura 3) dei tre cloni di pioppo utilizzati nel campo sperimentale e sottoposti a trattamento con batteri e ammendanti è risultata simile, per i cloni AF2 e Monviso, a quella ottenuta nella stessa area della Valle del Sacco non esposta alla contaminazione da HCH. Questi dati sono puramente indicativi sulle potenzialità produttive del pioppo Src nella zona contaminata.

I suddetti risultati preliminari sull'efficacia del rizzorimedio da lindano con pioppo SRC sono molto incoraggianti, ma richiedono comunque una prosecuzione delle attività di ricerca per chiarire ancora numerose problematiche, tra cui la verifica dei tempi per la degradazione del 100% del lindano nel suolo, i limiti di contaminazione della biomassa per la combustione, ed infine sistemi economici di inoculo dei batteri, utilizzando macchinari e pratiche agricole correnti (iniettori o irrigazione a goccia sub-superficiale).

## **Spandimento di liquami zootecnici su impianto di pioppo**

### *Liquami zootecnici*

L'azoto (N) è, tra i fitonutrienti, il principale fattore limitante per la produttività delle colture sia erbacee, sia arboree. Questo è anche valido per le piantagioni legnose, e lo è ancor di più per le piantagioni Srf, per la forte relazione tra il contenuto percentuale di N nel legno di polloni di pioppo ed il diametro della sezio-



ne del fusto stesso. Minore è la sezione del fusto e maggiore è il contenuto percentuale di N nel legno. Ad esempio, per sezioni di 2 cm l'N del legno è di circa l'1%; per fusti con sezione di 4 cm di diametro il contenuto di N è di circa lo 0,5%. Questo perché il contenuto percentuale di N è maggiore nei tessuti legnosi più giovanili. Inoltre nei fusti giovani e più sottili la corteccia rappresenta una porzione molto significativa della massa totale raccolta (Guidi et al., 2008); e la corteccia, in genere, ha un contenuto percentuale di N doppio rispetto al legno (Paris et al., 2010). Ricerche specifiche in piantagioni sperimentali di cloni di pioppo ibrido da Srf sono state effettuate per la determinazione delle asportazioni di N con la raccolta della biomassa legnosa in relazione a diverse produttività della coltura, in diverse stazioni, campionando in base alla suddivisione dei polloni del popolamento in classi diametriche. Alcuni risultati di queste ricerche sono sintetizzati nella tabella 1. Questa tabella riporta il contenuto percentuale di N nelle produzioni di biomassa di due popolamenti di pioppo Srf; un primo popolamento, utilizzato alla fine del primo ciclo biennale e con livello produttivo medio-basso (21 t di biomassa fresca per ha e per anno, umidità del 55%); un secondo popolamento, valutato alla fine del secondo ciclo biennale, con origine cedua del popolamento, cioè con numerosi polloni per ceppaia, e con livello produttivo più alto del precedente (33 t di biomassa fresca per ha e per anno, umidità del 55%). Le asportazioni in N con la raccolta della biomassa di questi due casi studio di pioppo Srf sono confrontate nella tabella con il contenuto percentuale di N e le relative asportazioni del raccolto di mais e di grano, nonché con i dati relativi alla pioppicoltura tradizionale. La tabella evidenzia bene come il pioppo Srf asporti N in modo molto più alto rispetto alla pioppicoltura tradizionale, dove il diametro delle piante al taglio è in genere di circa 30 cm, con turni di utilizzazione di circa 10 anni e densità di circa 300 fusti per ha. Le asportazioni di N con la raccolta di cippato legnoso dalle piantagioni di pioppo Srf si avvicinano alle asportazioni delle principali colture erbacee, sia grano che mais, a secondo del caso di studio del pioppo Srf. Le piantagioni legnose Srf, con destinazione no food della produzione di biomassa, si adattano bene alle fitodepurazione di



acque reflue urbane ed da attività zootecniche, ricche d'elementi fertilizzanti (nitrati e fosfati), tanto più che la fitodepurazione può avere un ruolo determinante a favore della redditività della coltura. Esperienze positive, sia dal punto di vista tecnico che economico, di fitodepurazione di liquami urbani e zootecnici sono state condotte in paesi del nord Europa, dove la pratica è oramai comunemente adottata nella gestione di piantagioni commerciali Srf.

### *Somministrazione di reflui zootecnici*

Il problema del corretto smaltimento dei reflui zootecnici sulle superfici agrarie è di grande attualità a causa della Direttiva Nitrati, che pone limiti molto rigorosi al carico di N somministrabile ai terreni con limiti di 300 kg di N per ha e per anno; tale valore si riduce a 170 Kg di N per le zone vulnerabili.

Per una corretta somministrazione dei liquami è necessario, in primo luogo, impostare un adeguato calcolo del bilancio dell'N che determina la dose di N da apportare ( $N_{nex}$ ) in base all'asportazione delle coltura ( $N_a$ ), ed alla disponibilità dell'elemento sia residuale che da apporti naturali. La formula più frequentemente usata è la seguente:

$$N_{nex} = N_a - (N_p + N_m + N_r + N_o),$$

con  $N_p$  che è l'azoto prontamente disponibile nel suolo, che in genere è l'1% dell'azoto totale;  $N_m$  è la quota di azoto mineralizzato a partire dalla sostanza organica nel suolo;  $N_r$  è l'azoto derivante dai residui della coltura precedente;  $N_o$  è la stima dell'azoto proveniente dalle concimazioni organiche antecedenti.

L'azoto apportato con i liquami dipende da due fattori principali: il tipo di liquame e le modalità di applicazione. Il tipo di liquame dipende a sua volta da fattori quali la specie di animali allevati (bovini, suini, avi-cunicoli), il loro regime di stallatico, le modalità di stoccaggio di conservazione dello stesso. Il liquame bovino ha un valore medio di N percentuale sul tal quale di circa l'1%. Ciò vuol dire che su di una tonnellata di liquame ci sono mediamente 10 kg di N. Di questa quantità totale il 40% è N minerale ad azione immediata, il 30% è N organico facilmente mineralizzabile, il 30% è N organico residuale. Le modalità di distribuzione del liquame dipendono dalle attrezzature disponi-



Coltura	Prodotto	Resa (t ha <sup>-1</sup> )	SS (%)	N% in SS	Asportazione N (kg ha <sup>-1</sup> anno <sup>-1</sup> )
Mais <sup>1</sup>	granella	9	84,5	1,7	182
	stocchi e foglie	15	50	0,7	
Frumento <sup>1</sup>	granella	5	86	2,3	117
	paglia	4	88	0,5	
Pioppicoltura (turno 10-13 anni) <sup>2</sup>	Legname da industria	200	50	0,4	40-31
Pioppo SRF, 1° taglio biennale	Biomassa da energia	42	45	0,7	70
Pioppo SRF, 2° taglio biennale	Biomassa da energia	66	45	1,01	151

Confronto delle asportazioni d'azoto (N) nella SRF di pioppo, in due casi studio, rispetto ai dati bibliografici per la pioppicoltura ed alcune delle più comuni colture erbacee. Le produzioni delle colture sono espresse in sostanza secca (SS)<sup>1</sup>. Giardini L., 1986; 2. AA.VV., 1987. Da Paris et al., 2007.

bili, ed influenzano fortemente il coefficiente di efficacia (C.e., in %), cioè la quota percentuale di N che viene effettivamente applicato alla coltura, al netto delle perdite. L'applicazione da carbotte con bocchettone posteriore è tra le meno efficaci in quanto si hanno notevoli perdite di azoto in forma ammoniacale gassosa. Per questo tipo di applicazione il C.e. è basso, con valori di circa il 35%. Questo significa che sui 10 kg di N di 1 t di liquame, quelli che effettivamente sono applicati alla coltura sono 3,5 kg. L'interramento dei liquami è la forma più efficace di somministrazione che minimizza le perdite, con valori di C.e. di circa il 67%.

Sono state condotte delle simulazioni di applicazione di liquame bovino, con tenore percentuale di N sul tal quale di 1% a due casi studio di pioppo SRF, ripresi dalla tabella 1. Per il calcolo del bilancio dell'azoto, i valori degli apporti naturali sono stati estrapolati da condizione medie del mais in pianura Padana. Questo perché al momento mancano dei dati specifici sugli apporti residui di N nelle Srf di pioppo. Nelle simulazioni si sono considerati due livelli estremi per il Ce, del 35%, per l'aspersione da carbotte, e del 67% per l'interramento del liquame. Per il primo livello di Ce si sono ottenuti volumi di liquamazione tra le 140 e le 170 t di liquame bovino. Per il livello più efficiente di Ce (interramento) i volumi di liquamazione sono stati stimati tra le 75 e le 90 t di liquame, con minor perdite di azoto in fase gassosa. È bene precisare che queste simulazioni sono prudenziali, sia per le rese produttive del pioppo Srf sia per il ciclo N nelle piantagioni suddette. Per le pro-



duzioni del pioppo Srf si sono ottenute produzioni molto più alte rispetto a quelle riportate in questa sede, sino a  $50 \text{ t ha}^{-1}\text{anno}^{-1}$  di biomassa fresca (Mareschi et al, 2005; Paris et al, 2011), di cui però non conosciamo il tenore di N. Per il ciclo dell'azoto in piantagioni di pioppo Srf a regime, sono in corso le analisi su prove sperimentali con liquamazioni bovine iniziate nel 2006.

## Bibliografia

- AA.VV., 1987. Pioppicoltura. SAF-ENCC, Roma, 69 pagg.
- Arienzo M. (2000). Degradation of 2,4,6-trinitrotoluene in water and soil slurry utilizing a calcium peroxide compound. *Chemosphere* 40(4):331-337.
- Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Reeves, R.D., Smith, J.A.C. 2000. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. In "Phytoremediation of contaminated soil and water" Ed. by Terry N. and Banuelos G. Lewis Publishers. Boca Raton pp 85-108.
- Bergante S., Facciotto S., 2006. Impianti annuali, biennali, quinquennali. *Sherwood*, 128: 25-30.
- Bianconi D., De Paolis M.R., Agnello A.C., Lippi D., Pietrini F., Zacchini M., Polcaro C., Donati E., Paris P., Spina S. and Massacci A. (2011). Field – Scale Rhizoremediation of a Contaminated Soil with Hexachlorocyclohexane (HCH) Isomers: The Potential of Poplars for Environmental Restoration and Economical Sustainability. In: Ivan A. Golubev(ed) *Handbook of Phytoremediation*, Chapter 31, Ed. 2011, Nova Science Publishers, Inc., ISBN: 978-1-61728-753-4.
- Burken, J.G., Schnoor, J.L. 1997. Uptake and Metabolism of Atrazine by Poplar Trees. *Environ. Sci. Technol.* 31: 1399-1406.
- Cassidy D.P. & Irvine R.L. (1999). Use of calcium peroxide to provide oxygen for contaminant biodegradation in a saturated soil. *Journal of Hazardous Materials* 69(1): 25-39.
- Centro studi regionale per l'analisi e la valutazione del rischio alimentare: <http://195.45.99.79/csra/>
- Chang P., J.Y Kim, K.W Kim. (2005) "Concentration of arsenic and heavy metals in vegetation at two abandoned mine tailings



in South Korea”, *Environmental Geochemistry and Health* 27,109-119

Gallagher F.J., I.Pechmann, J.D. Bogden, J. Grabosky, P.Weis (2008) “Soil metal concentrations and vegetative assemblage structure in an urban brownfield”, *Environmental Pollution* 153, 351-361

Giardini L., 1986. *Agronomia generale*. Patron Editore, Bologna, pagg 597

Guidi W., Piccioni E., Ginanni M., Bonari E., 2008. Bark content estimation in poplar (*Populus deltoides* L.) short rotation coppice in Central Italy. *Biomass and >Bioenergy*, 32 : 518-524.

Gullner, G., Komives, T., Rennenberg, H. 2001. Enhanced tolerance of transgenic poplar plants overexpressing g-glutamyl-cysteine synthetase towards chloroacetanilide herbicides. *J Exp Bot* 52:971-979.

Hinchman, R.R., Negri, M.C., Gatliff, E.G. 1996. Phytoremediation using green plants to clean up contaminated soil, groundwater and wastewater. In “Phytoremediation” Argonne National Laboratory Applied Natural Sciences, Inc pp. 1-10.

Huhnerfuss H., Faller J., König W.A., Ludwig P. (1992). Gas chromatographic separation of the enantiomers of marine pollutants. 4. Fate of Hexachlorocyclohexane isomers in the Baltic and North Sea. *Environ Sci Technol* 26: 2127–2133.

IHPA. (2006). The Legacy of Lindane HCH Isomer Production. A global Overview of residue Management, Formulation and Disposal. *International HCH & Pesticides Association* www.ihpa.info.

Jordahl, J.L., Foster, L., Schnoor, J.L., Alvarez, P.J.J. 1997. Effect of Hybrid Poplar Trees on Microbial Populations Important to Hazardous Waste Bioremediation. *Environ.Toxicol.Chem.*16(6):1318-1321.

Legambiente e Wwf - Lo stato di salute del mare “Elaborazione dei dati del piano triennale di monitoraggio marino-costiero 2001-2004 del Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio” Roma, aprile 2004 pp.1-56.

LI Y.F. (1999). Global technical hexachlorocyclohexane usage and its contamination consequences in the environment: from 1948 to 1997. *Sci. Total Environ.* 232, 121–15.



Licht L.A., Isebrands J.G. (2005). Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities. *Biomass and Bioenergy* 28, 203-218.

Lunackova, L., Sotnikova, A., Masarovicova, E., Lux, A., Strosso, V. 2004. Comparison of cadmium effect on willow and poplar in response to different cultivation conditions. *Biologia Plantarum* 47 (3): 403-411.

Lux, A., Sotnikova, A., Opatrna, J. Greger, M. 2004. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. *Physiologia Plantarum* 120: 537-545.

Madejon P., T. Maranon, J.M.Murillo, B. Robinson (2004) "White poplar (*Populus alba*) as a biomonitor of trace elements in contaminated riparian forests", *Environmental Pollution* 132, 145-155

Malaiyandi M., Shah S.M., Lee P. (1982). Fate of alpha- and gamma-hexachlorocyclohexane isomers under simulated environmental conditions. *J Environ Sci Health, Part AA17*: 283-297.

Mareschi L., Paris P., Sabatti M., Nardin F., Giovanardi R., Manazzone S., Scarascia Mugnozza G., 2005. Le nuove varietà di pioppo da biomassa garantiscono produttività interessanti. *L'Informatore Agrario*, 18: 49-53.

Marmioli, M, Pietrini F, Maestri E, Zacchini M, Marmioli N and Massacci A (2011) Growth, physiological and molecular traits in Salicaceae trees investigated for phytoremediation of heavy metals and organics. *Tree Physiol Tree Physiology* 31, 1319-1334

Marmioli, N., Maestri, E., Tissut, M. 2003. Phytoremediation and phytotechnologies: basic data. In Vanek, T., Schwitzguébel, J.P (Eds.), *Inventory COST Action 837* view. Hlaváček tisk pp.1-9.

Massacci, A., Pietrini, F., Iannelli, M.A. 2001. Remediation of wetlands by *Phragmites australis*: the biological basis. *Minerva Biotecnologica* 13:135-140.

Newman, L.A., Strand, S.E., Choe, N., Duffy, J., Ekuan, G., Ruzaj, M., Shurtleff, B.B., Wilmoth, J., Heilman, P., Gordon, M.P. 1997. Uptake and Biotransformation of Trichloroethylene by Hybrid Poplars. *Environ. Sci. Technol.* 31: 1062-1067.



Paris P., Mareschi L., Ecosse A., 2010. Pioppo, fertilizzare quanto il mais per avere una buona produttività. *Terra e Vita* (suppl. Bioenergie), 7: 36-38.

Paris P., Mareschi L., Ecosse A., Pisanelli A., Sabatti M., Scarascia Mugnozza G., 2011. Comparing Hybrid Populus Clones For SRF Across Northern Italy After Two Biennial Rotations: Survival, Growth And Yield. *Biomass and Bioenergy*, 35:1524-1532.

Paris P., Mareschi L., Sabatti M., Breccia L., de Luca S., Tarchi M., Ecosse A., Scarascia Mugnozza G. (2007). Asportazioni di azoto con la raccolta di biomassa. *Linea Ecologica-EM 1*, 2-8.

Pollard, A.J., Powell, K.D., Harper, F.A., Smith, J.A.C. 2002. The genetic basis of metal hyperaccumulation in plants. *Critic. Rev. Plant Sci.*, 21: 1-28.

Robinson, B.H., Mills, T.M., Petit, D., Fung, L.E., Green, S.R. and Clothier, B.E. 2000. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation. *Plant and Soil*, 227: 301-306.

Rockwood D.L., Naidu C.V., Carter D.R., Rahmani M., Spriggs T.A., Lin C., Alker G.R., Isebrands J.G. and Segrest S.A. (2004). Short-rotation woody crops and phytoremediation: Opportunities for agroforestry? *Agroforestry Systems* 61, 51-63.

Rosselli W., C.Keller, K.Boschi (2003) "Phytoextraction capacity of trees growing on a metal contaminated soil", *Plant and Soil* 256, 265-272

Russel, M., Colglazier, E.V., English, M.R.1991. Hazardous waste remediation: the task ahead. *Waste Management Research and Education Institute, Univ of Tennessee, Knoxville, TN.*

Sala M., Sunyer J., Otero R., Santiago-Silva M., Camps C., Grimalt J.O. (1999). Organochlorine compound concentration in the serum of inhabitants living near an electrochemical factory. *Occup Environ Med.*, 56:152-158.

Schnoor, J.L. 2002. Phytoremediation of Soil and Groundwater. *Technology Evaluation Report TE 02-01, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center (GWRTAC).*

Tassoni, E. 1999. Tema prioritario: bonifica aree e siti industriali inquinati. Nuovo piano nazionale per lo sviluppo sostenibile. Ministero dell'Ambiente - ENEA, 24 p.



Traiana M.E., Urbani E., Rescia M., Mantovani A. (2001). L'insetticida lindano: identificazione dei rischi possibili per la riproduzione umana. *Rapporto Istituto Superiore di Sanità*. 59 p. Rapporti ISTISAN 01/3. ISSN 1123-3117.

Unterbrunner R., M. Puschenreiter, P. Sommer, G. Wieshammer, P. Tlustos, M. Zupan, W.W. Wenzel (2007) "Heavy metal accumulation in trees growing on contaminated sites in Central Europe", *Environmental Pollution* 148,107-114

US Environmental Protection Agency, Annual status report remediation database. 2003 <http://cfpub.epa.gov/asr/index.cfm>

