

Συμβολή ποωδών ειδών στη βιοθεραπεία εδάφους με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων

Π. Κωστοπούλου, Μ. Καρατάσιου και Β. Νοϊτσάκης

Εργαστήριο Δασικών Βοσκοτόπων (236), Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη,
e-mail: giotakos@for.auth.gr

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη ανάπτυξη στον τομέα της απομάκρυνσης των μετάλλων από το έδαφος έχει βρει η τεχνική της βιοθεραπείας με τη χρήση ποωδών, κατά κύριο λόγο, φυτών (φυτοθεραπεία). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πρόκειται για μία μόνιμη, οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο που δεν αλλοιώνει αισθητικά το τοπίο. Ως κατάλληλα για βιοθεραπεία φυτικά είδη θεωρούνται εκείνα τα οποία διακρίνονται για την ικανότητα συσσώρευσης βαρέων μετάλλων, τον υψηλό ρυθμό ανάπτυξης, την υψηλή παραγωγικότητα και το εκτεταμένο ριζικό τους σύστημα. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση των κυριότερων μεθόδων απομάκρυνσης μετάλλων από το έδαφος με τη χρήση κυρίως ποωδών φυτικών ειδών.

Λέξεις κλειδιά: φυτοθεραπεία, φυτοεξαγωγή, φυτοεξαέρωση, υπερσυσσωρευτές

Εισαγωγή

Ο όρος βαρέα μέταλλα αποδίδεται σε μία μεγάλη ομάδα ιχνοστοιχείων τα οποία είναι σημαντικά τόσο από βιομηχανική όσο και από βιολογική άποψη (Alloway 1995). Ορισμένα βαρέα μέταλλα όταν βρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις θεωρούνται απαραίτητα για τους φυτικούς οργανισμούς (π.χ. Fe, Cu, Mn, Zn, Ni), ενώ όταν η συγκέντρωσή τους υπερβεί ένα όριο, ανάλογα με το μέταλλο και το φυτικό είδος, παρεμποδίζουν το μεταβολισμό με αποτέλεσμα την εμφάνιση συμπτωμάτων οξείας ή χρόνιας τοξικότητας (Lasat 2002). Τα μέταλλα εισέρχονται στα οικοσυστήματα τόσο εξαιτίας φυσικών (αποσάθρωση πετρωμάτων, ηφαιστειακές εκρήξεις, θαλάσσια αεροζόλ, μεταφορά και απόθεση σκόνης) όσο και ανθρωπογενών διεργασιών (καύση ορυκτών καυσίμων, εξόρυξη και χύτευση μεταλλευμάτων, χρήση λιπασμάτων και εντομοκτόνων, αστικά και βιομηχανικά λύματα) (Seaward and Richardson 1990). Το έδαφος, επειδή αποτελεί το υπόστρωμα, πάνω στο οποίο λειτουργούν τα φυσικά και αγρονομικά συστήματα, δέχεται την είσοδο βαρέων μετάλλων από διάφορες πηγές. Τα μέταλλα είναι παρόντα στο έδαφος με τη μορφή ελεύθερων μεταλλικών ιόντων, διαλυτών μεταλλικών ενώσεων, ανταλλάξιμων μεταλλικών ιόντων, οργανικά δεσμευμένων μετάλλων, αδιάλυτων ενώσεων όπως είναι τα οξείδια, τα ανθρακικά και τα υδροξείδια ή μπορεί να συμμετέχουν στη δομή κυρίως πυριτικών ορυκτών (Alloway 1995). Η τοξικότητα των μετάλλων στο έδαφος εξαρτάται από τη βιοδιαθεσιμότητα τους, η οποία ορίζεται ως η ικανότητά τους να μεταφέρονται από το έδαφος σε ένα ζωντανό οργανισμό. Η βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων είναι συνάρτηση όχι μόνο της ολικής συγκέντρωσής τους στο έδαφος, αλλά και φυσικο-χημικών και βιολογικών παραγόντων (Leyval et al. 1997).

Τα μέταλλα δεν βιοδιασπώνται, με αποτέλεσμα να βιοσυσσωρεύονται στην τροφική αλυσίδα., γεγονός που καθιστά επιτακτική την απομάκρυνση τους από το έδαφος. Οι συμβατικές τεχνικές απομάκρυνσης των μετάλλων περιλαμβάνουν εκσκαφή ή έκπλυση του εδάφους, ακολουθούμενη από φυσική ή χημική απομάκρυνση των μετάλλων (Wood 1997) με κόστος συχνά αρκετά υψηλό και συνεπώς περιοριστικό (Prasad 2004). Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη ανάπτυξη στον τομέα της απομάκρυνσης των μετάλλων από το έδαφος έχει βρει η

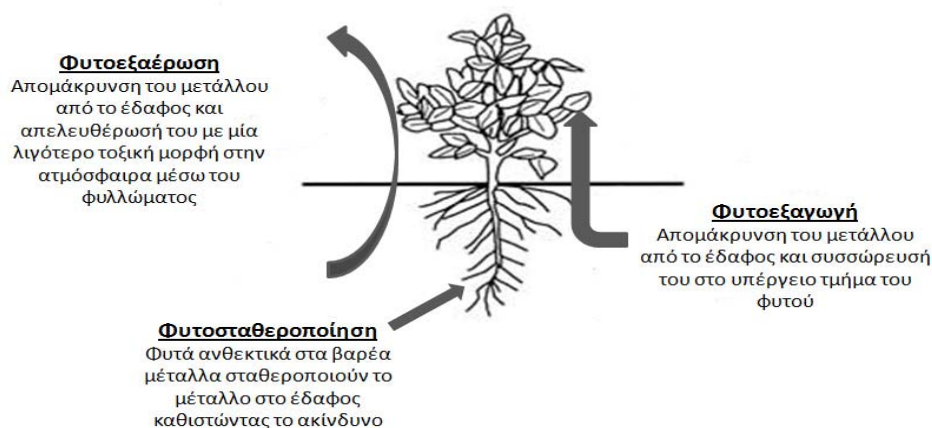
τεχνική της βιοθεραπείας με χρήση φυτικών ειδών (ξύλων, ποωδών), με σκοπό την απομάκρυνση, καταστροφή ή δέσμευση επικίνδυνων ρύπων, όπως είναι τα μέταλλα από το έδαφος (φυτοθεραπεία).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση των κυριοτέρων μεθόδων απομάκρυνσης των μετάλλων από το έδαφος με τη χρήση κυρίως ποωδών φυτικών ειδών.

Τεχνικές φυτοθεραπείας εδάφους

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από το είδος των μετάλλων και από τις συνθήκες της περιοχής που πρόκειται να αποκατασταθεί. Τα μέταλλα που μπορούν να απομακρυνθούν με τη μέθοδο της φυτοθεραπείας είναι τα Cd, Pb, Zn, Ni, Cr, Cu, Se και Hg (Nagendran et al. 2006). Στις κυριότερες τεχνικές φυτοθεραπείας εδάφους από την παρουσία βαρέων μετάλλων περιλαμβάνονται (Εικόνα 1):

α) Φυτοεξαγωγή (phytoextraction). Σκοπός της φυτοεξαγωγής είναι η εκμετάλλευση του συστήματος πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων που διαθέτουν τα φυτά, έτσι ώστε να επιτευχθεί μέγιστη συσσώρευση ρυπογόνων ιχνοστοιχείων στα υπέργεια τμήματα του φυτού. Η υπέργεια βιομάζα στη συνέχεια αποκόπτεται, με αποτέλεσμα μετά από μερικές αυξητικές περιόδους να απομακρύνεται ο ρύπος από την περιοχή. Το φυτικό υλικό που απομακρύνεται μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την ανακύκλωση του μετάλλου ή να συγκεντρωθεί σε ειδικούς χώρους απόθεσης (Krämer and Chardonnens 2001).



Εικόνα 1. Κύριες τεχνικές φυτοθεραπείας εδάφους από βαρέα μέταλλα.

β) **Φυτοσταθεροποίηση (phytostabilisation)**. Στην τεχνική της φυτοσταθεροποίησης, φυτά τα οποία είναι ανθεκτικά στα βαρέα μέταλλα σταθεροποιούν το μέταλλο στο έδαφος, καθιστώντας το απρόσληπτο από τα άλλα φυτά και συνεπώς ακίνδυνο (Nagendran et al. 2006).

γ) **Φυτοεξαέρωση (phytovolatilisation)**. Στην τεχνική της φυτοεξαέρωσης, ορισμένα μέταλλα (π.χ. Hg, Se) αντί να συσσωρεύονται μέσα στο φυτό, μετατρέπονται με τη βοήθεια ενζύμων σε λιγότερο τοξικές, αέριες ενώσεις, οι οποίες απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μέσω του φυλλώματος (Meagher 2000).

Συζήτηση

α) Ταυτοποίηση ποωδών φυτών για φυτοθεραπεία

Δύο είναι τα χαρακτηριστικά επιλογής ποωδών ειδών για φυτοθεραπεία: α) η υπερσυσσώρευση βαρέων μετάλλων, και β) η αντοχή στα βαρέα μέταλλα. Ορισμένα ποώδη είδη (υπερσυσσωρευτές) έχουν ικανότητα συσσώρευσης μετάλλων στα υπέργεια τμήματα τους σε συγκεντρώσεις έως 100 φορές υψηλότερες από φυτά μη συσσωρευτές που αναπτύσσονται στην ίδια περιοχή. Ένα φυτό υπερσυσσωρευτής περιέχει στους ιστούς του

περισσότερο από 10 ppm Hg, 100 ppm Cd, 1000 ppm Co, Cr, Cu και Pb, 10.000 ppm Ni και Zn. Μέχρι σήμερα έχουν αναφερθεί 400 περίπου φυτικά είδη που ανήκουν σε 45 οικογένειες, τα οποία υπερσυσσωρεύουν βαρέα μέταλλα (Prasad 2004). Τα περισσότερα φυτά υπερσυσσωρευτές ανήκουν στις οικογένειες Asteraceae, Brassicaceae, Cyperaceae, Caryophyllaceae, Fabaceae, Poaceae, Violaceae και Lamiaceae (Prasad 2004). Φυτικά είδη ανθεκτικά σε βαρέα μέταλλα έχουν την ικανότητα συνέχισης των μεταβολικών τους δραστηριοτήτων, ακόμα και κάτω από υψηλές συγκεντρώσεις ενός ή περισσοτέρων μετάλλων. Ειδικότερα για την οικογένεια των αγρωστωδών τα είδη *Anthoxanthum odoratum*, *Agrostis capillaris*, *A. gigantea*, *A. stolonifera*, *A. tenuis*, *Arrhenatherum pratensis*, *Avenella flexuosa*, *Brachypodium sylvaticum*, *Bromus ramosus*, *Cynodon dactylon*, *Deschampsia caespitosa*, *Festuca rubra*, *Holcus lanatus*, *Lolium multiflorum*, *L. perenne*, *Nardus stricta* και *Sorghum sudanese* αναφέρονται ως ανθεκτικά στα βαρέα μέταλλα (Prasad 2003). Στον πίνακα 1 παραθέτονται ορισμένα από τα φυτικά είδη που διαθέτουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά.

Επιπλέον, για να θεωρηθεί ένα φυτικό είδος κατάλληλο για φυτοθεραπεία θα πρέπει να έχει υψηλό ρυθμό αύξησης, μεγάλη παραγωγή βιομάζας και να αναπτύσσει εκτενές ριζικό σύστημα (Krämer and Chardonnens 2001). Προκειμένου ένα φυτό να θεωρηθεί ως αποτελεσματικό μέσο αποτοξικοποίησης πρέπει να συσσωρεύει μία ποσότητα βαρέως μετάλλου ισοδύναμη με το 1 ή 2% του ξηρού του βάρους (Weatherford et al. 1997). Η επιλογή του κατάλληλου είδους εξαρτάται από τη χημική μορφή του ή των μετάλλων και τις συνθήκες της περιοχής που πρόκειται να αποκατασταθεί. Γενικά, ενδείκνυται η χρήση ενδημικών ειδών (Nagendran et al. 2006).

β) Εμπορευσιμότητα φυτοθεραπευτών

Η εμπορική χρήση των υπερσυσσωρευτών υπολογίζεται με βάση το ρυθμό συσσώρευσης των μετάλλων σε συνδυασμό με το ρυθμό αύξησης των φυτών. Πολλαπλασιάζοντας το ρυθμό συσσώρευσης του μετάλλου (g μετάλλου/ kg φυτικού ιστού) με το ρυθμό αύξησης του φυτού (kg φυτικού ιστού/ha/έτος) προκύπτει ο ρυθμός απομάκρυνσης του μετάλλου από το έδαφος (g ή kg μετάλλου/ha/έτος). Για να είναι εμπορικά βιώσιμη η τεχνική εκτιμάται ότι αυτός ο ρυθμός θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 100-1000 kg/ha/έτος. Με αυτόν το ρυθμό η θεραπεία θα χρειαστεί 15-20 έτη για να ολοκληρωθεί, ανάλογα με την αρχική συγκέντρωση του μετάλλου και το βάθος του εδάφους στο οποίο εκτείνεται η ρύπανση (Prasad 2004).

γ) Πλεονεκτήματα και περιορισμοί βιοθεραπείας

Η φυτοθεραπεία αποτελεί μία τεχνική αποτοξικοποίησης και αποκατάστασης ρυπασμένων περιοχών, η οποία θεωρείται οικονομική, τόσο κατά την εγκατάσταση των φυτών όσο και κατά τις εργασίες συντήρησής τους, φιλική προς το περιβάλλον, εύκολη στην εφαρμογή της, με μεγάλη αποδοχή από το κοινό και με τελικό αποτέλεσμα ένα ευχάριστο από άποψη αισθητικής τοπίο (Boyajian and Carreira 1997). Εντούτοις η εφαρμογή της βρίσκει και κάποιους περιορισμούς.

Προκειμένου να εφαρμοστεί φυτοθεραπεία, τα βαρέα μέταλλα θα πρέπει να βρίσκονται σε βιοδιαθέσιμη μορφή. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με προσθήκη στο έδαφος ειδικών ενώσεων που αυξάνουν τη βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων. Επιπλέον, πιστεύεται ότι ορισμένα βακτήρια αλλά και η παρουσία μυκόρριζας μπορεί να συμβάλλει προς αυτήν την κατεύθυνση. Έναν ακόμα περιορισμό της φυτοθεραπείας αποτελεί το γεγονός ότι η πλειονότητα των υπερσυσσωρευτών εμφανίζει χαμηλό ρυθμό παραγωγής βιομάζας, με αποτέλεσμα η διαδικασία να επιβραδύνεται, καθιστώντας τη φυτοθεραπεία ως μη εμπορεύσιμη. Το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να λυθεί με την επιλογή ή τη δημιουργία νέων ποικιλιών φυτών με υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής. Ήδη σήμερα γίνονται προσπάθειες

μεταφοράς γονιδίων που οδηγούν σε υπερσυσσώρευση βαρέων μετάλλων σε παραγωγικότερα φυτά.

Πίνακας 1. Ορισμένα ποώδη είδη που συσσωρεύουν βαρέα μέταλλα ή έχουν δοκιμαστεί για φυτοθεραπεία εδαφών.

Φυτικό είδος	Μέταλλα	Αναφορά	Φυτικό είδος	Μέταλλα	Αναφορά
<i>Agrostis capillaris</i>	As, Mn, Pb, Zn	McCutcheon and Schnoor (2003)	<i>Helianthus annuus</i>	Pb, Cr	Prasad (2004), Davies et al. (2001)
<i>Albizia amara</i>	Cr	Shanker et al. (2005)	<i>Hibiscus cannabinus</i>	Se	Banuelos et al. (1993)
<i>Alyssum bertoloni</i>	Ni	Boominathan and Doran (2002)	<i>Hydrocotyle umbellata</i>	Pb, Cu, Cd, Fe	Prasad (2004)
<i>Alyssum lesbiacum</i>	Ni	Kerkebe and Kramer (2003)	<i>Juncus usitatus</i>	Pb, Cd	Archer and Caldwell (2004)
<i>Amaranthus blitoides</i>	Zn, Cu, As, Pb	Del Rio et al. (2002)	<i>Lactuca serriola</i>	Se	Wu et al. (2000)
<i>Anchusa azurea</i>	Cu, Zn	Del Rio et al. (2002)	<i>Lavatera cretica</i>	Zn, Cd	Del Rio et al. (2002)
<i>Armeria maritima</i>	Pb	Prasad (2004)	<i>Lemna minor</i>	Pb, Cu, Cd, Fe	Prasad (2004)
<i>Astragalus bisulcatus</i>	Se	Parker et al. (1991)	<i>Lesquerella fendleri</i>	Se	Grieve et al. (2001)
<i>Astragalus racemosus</i>	Se	Parker et al. (1991)	<i>Lomandra longifolia</i>	Pb, Cd	Archer and Caldwell (2004)
<i>Azolla pinnata</i>	Pb, Cu, Cd, Fe	Prasad (2004)	<i>Lotus corniculatus</i>	Se	Banuelos et al. (1993)
<i>Beta vulgaris</i>	Cu, Pb	Del Rio et al. (2002)	<i>Malva nicaeensis</i>	As, Zn	Del Rio et al. (2002)
<i>Brassica juncea</i>	Se, Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	McCutcheon and Schnoor (2003)	<i>Melilotus indica</i>	Se	Wu et al. (2000), Van Mantgem et al. (1996)
<i>Brassica napus</i>	Se	Banuelos and Mayland (2000)	<i>Melilotus officinalis</i>	Se	Kostopoulou et al. (2010)
<i>Brassica nigra</i>	Se, Pb	Prasad (2003)	<i>Phragmites australis</i>	Cd	Fediuc and Erdei (2002)
<i>Brassica oleraceae</i>	Tl	Shah and Nongkynrih (2007)	<i>Raphanus sativus</i>	Cu	Brown et al. (1994)
<i>Centaurea solstitialis</i>	Se	Wu et al. (2000)	<i>Silene vulgaris</i>	Cu, Zn	Brown et al. (1994)
<i>Chamaemelum fuscum</i>	Cu, As, Zn	Del Rio et al. (2002)	<i>Silybum marianum</i>	Zn	Del Rio et al. (2002)
<i>Convolvulus arvensis</i>	As, Pb	Del Rio et al. (2002)	<i>Spartina patens</i>	Se	Banuelos and Lin (2005)
<i>Cynodon dactylon</i>	As, Pb, Cd	Del Rio et al. (2002), Archer and Caldwell (2004)	<i>Sporobolus airoides</i>	Se	Banuelos and Lin (2005)
<i>Diplotaxis virgata</i>	Zn	Del Rio et al. (2002)	<i>Thlaspi caerulescens</i>	Zn, Cd, Pb	Brown et al. (1994)
<i>Erodium aethiopicum</i>	Zn	Del Rio et al. (2002)	<i>Typha latifolia</i>	Cd	Fediuc and Erdei (2002)
<i>Festuca arundinacea</i>	Se	Banuelos et al. (1993), Van Mantgem et al. (1996)			

Βιβλιογραφία

- Alloway, B.J. 1995. Heavy Metals in Soils. 2nd Edition. Blackie Academic & Professional, London, pp. 368
- Archer, M.J.G. and R.A. Caldwell. 2004. Response of six Australian plant species to heavy metal contamination at an abandoned mine site. *Water Air Soil Poll.*, 157: 257-267.
- Bañuelos, G.S. and H.F. Mayland. 2000. Absorption and distribution of selenium in animals consuming canola grown for selenium phytoremediation. *Ecotox. Environ. Saf.*, 46: 322-328.
- Bañuelos, G.S. and Z.-Q. Lin. 2005. Phytoremediation management of selenium-laden drainage sediments in the San Luis Drain: a greenhouse feasibility study. *Ecotox. Environ. Saf.*, 62: 309-316.

- Bañuelos, G.S., G.E. Cardon, C.J. Phene, L. Wu, S. Akohoue and S. Zambrzuski. 1993. Soil boron and selenium removal by three plant species. *Plant Soil*, 148: 253-263.
- Boominathan, R. and P.M. Doran. 2002. Ni-induced oxidative stress in roots of the Ni hyperaccumulator, *Alyssum bertolonii*. *New Phytol.*, 156: 206-215.
- Boyajian, G.E. and L.H. Carreira. 1997. Phytoremediation: a clean transition from laboratory to marketplace? *Nature Biotechnol.*, 15: 127-128.
- Brown, S.L., R.L. Chaney, J.S. Angle and A.J.M. Baker. 1994. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc- and cadmium-contaminated soil. *J Environ. Qual.*, 23: 1151-1157.
- Davies, F.T., J.D. Puryear, R.J. Newton, J.N. Egilla and J.A. Saraiva Grossi. 2001. Mycorrhizal fungi enhance accumulation and tolerance of chromium in sunflower (*Helianthus annuus*). *J. Plant Physiol.*, 158: 777-786.
- Del Rio, M., R. Font, C. Almela, D. Velez, R. Montoro and A. De Haro Bailon. 2002. Heavy metals and arsenic uptake by wild vegetation in the Guadiamar river area after the toxic spill of the Aznalcollar mine. *J. Biotechnol.*, 98: 125-137.
- Fediuc, E. and L. Erdei. 2002. Physiological and biochemical aspects of cadmium toxicity and protective mechanisms induced in *Phragmites australis* and *Typha latifolia*. *J. Plant Physiol.* 159: 265-271.
- Grieve, C.M., J.A. Poss, D.L. Suarez and D.A. Dierig. 2001. Lesquerella growth and selenium uptake affected by saline irrigation water composition. *Industrial Crops Products*, 13: 57-65.
- Kerkeb, L. and U. Krämer. 2003. The role of free histidine in xylem loading of Nickel in *Alyssum lesbiacum* and *Brassica juncea*. *Plant Physiol.*, 131: 716-724.
- Kostopoulou, P., N. Barbayiannis and B. Noitsakis. 2010. Water relations of yellow sweetclover under the synergy of drought and selenium addition. *Plant Soil*, 330: 65-71.
- Krämer, U. and A.N. Chardonens. 2001. The use of transgenic plants in the bioremediation of soils contaminated with trace elements. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 55: 661-672.
- Lasat, M.M. 2002. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. *J. Environ. Qual.*, 31: 109-120.
- Leyval, C., K. Turnau and K. Haselwandter. 1997. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects. *Mycorrhiza*, 7: 139-153.
- McCutcheon, S.C., and J.L. Schnoor 2003. *Phytoremediation: transformation and control of contaminants*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 987.
- Meagher, R.B. 2000. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 3: 153-162.
- Nagendran, R., A. Selvam, K. Joseph and C. Chiemchaisri. 2006. Phytoremediation and rehabilitation of municipal solid waste landfills and dumpsites: A brief review. *Waste Manage*, 26: 1357-1369.
- Parker, D.R., A.L. Page and D.N. Thomason. 1991. Salinity and boron tolerances of candidate plants for the removal of selenium from soils. *J. Environ. Qual.*, 20: 157-164.
- Prasad, M.N.V. 2003. Phytoremediation of metal-polluted ecosystems: Hype for commercialization. *Russian J. Plant Physiol.*, 50: 686-700.
- Prasad, M.N.V. 2004. Phytoremediation of metals and radionuclides in the environment: the case for natural hyperaccumulators, metal transporters, soil-amending chelators and transgenic plants, p. 345-391. In: *Heavy metal stress in plants* (M.N.V. Prasad, Ed.), Springer-Verlag, Berlin.
- Sadowsky, M.J. 1999. Phytoremediation: past promises and future practices. In: *Proc. 8th Int. Symp. on Microbial Ecology* (C.R. Bell, M. Brylinsky and P. Johnson-Green, Eds.), Atlantic Canada Society for Microbial Ecology, Halifax, Canada.

- Seaward, M.R.D. and D.H.S. Richardson. 1990. Atmospheric sources of metal pollution and effects on vegetation, p. 75-92. In: Heavy metal tolerance in plants: Evolutionary aspects (A.J. Shaw, Ed.), CRC Press, Boca Raton.
- Shah, K. and J.M. Nongkynrih. 2007. Metal hyperaccumulation and bioremediation. *Biol. Plantarum*, 51: 618-634.
- Shanker, A.K., C. Cervantes, H. Loza-Tavera and S. Avudainayagam. 2005. Chromium toxicity in plants. *Environ. Intern.*, 31: 739-753.
- Van Mantgem, P.J., L. Wu and G.S. Banuelos. 1996. Bioextraction of selenium by forage and selected field legume species in selenium-laden soils under minimal field management conditions. *Ecotox. Environ. Saf.*, 34: 228-238.
- Weatherford, J., A. Hammond and J. Ratliff. 1997. Investigation of the ability of plants found in Western Kentucky to hyperaccumulate lead and aluminium from soils. *Microchemical J.*, 56: 93-102.
- Wood, P. 1997. Remediation methods in contaminated sites, p. 47-71. In: Contaminated land and its reclamation (R. Hester, R. Harrison, Eds.), the Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Wu, L., G. Banuelos and X. Guo. 2000. Changes of soil and plant tissue selenium status in an upland grassland contaminated by selenium-rich agricultural drainage sediment after ten years transformed from a wetland habitat. *Ecotox. Environ. Saf.*, 47: 201-209.

Use of herbaceous vegetation for soil bioremediation of heavy metals

P. Kostopoulou, M. karatassiou, B. Noitsakis

Laboratory of Range Science (236), School of Forestry and Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece, e-mail: giotakos@for.auth.gr

Summary

Over the last decades the use of herbaceous vegetation for soil remediation of heavy metals, called phytoremediation, has gained considerable importance because this technique is permanent and environmental friendly, has low cost and does not aesthetically disrupt the landscape. Plant species able to hyperaccumulate and tolerate heavy metals that have high growth rate and biomass production and possess an extensive root system are considered as suitable phytoremediators. Aim of this paper was to present the most significant phytoremediation techniques using herbaceous vegetation.

Key words: Phytoremediation, phytoextraction, phytovolatilization, hyperaccumulators