

SIGNIFICANT ROLES OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI IN PHYTOREMEDIATION OF HEAVY METALS CONTAMINATED SOILS

Mihaela GĂLEAN

Babeş-Bolyai University, Cluj-Napoca, Faculty of Biology and Geology

*Corresponding author e-mail: galean_mihaela@yahoo.com

Received 13 December 2020; accepted 23 December 2020

ABSTRACT

One major problem nowadays is soil, water and air pollution caused by heavy metals. This can get into the food chain and affect human health, thus leading to various diseases. Phytoremediation is an efficient and eco-friendly solution for the restoration of soils contaminated with heavy metals. Moreover, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can be used as a biotechnological tool to ensure the success of phytostabilization and phytoextraction processes. AMF are wide- spread in nature. Besides this, they naturally appear in heavy metals contaminated soils where they establish mutualistic symbiosis with the roots of plants. The ideal combination between plant and fungus species is required. There are distinctive mechanisms by which AMF provide plant tolerance to heavy metals stress and sustain a proper development and growth on polluted soils. This review highlights the importance of AMF in phytostabilization and in phytoextraction of heavy metals.

KEYWORDS: heavy metals, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), phytostabilization, phytoextraction.

INTRODUCERE

Metalele grele reprezintă o sursă îngrijorătoare de poluare a mediului natural. Acestea sunt elemente chimice cu densitatea mai mare de 5 g/ cm³, capabile să formeze sulfuri (Gaur & Adholeya, 2004). Unele dintre aceste metale grele- precum Zn, Cu, Mn, Ni - constituie micronutrienți pentru plante (Davies et al. 2001; Miransari, 2011), prin urmare sunt necesare organismelor vegetale în cantități reduse. De pildă, Cu și Zn joacă un rol important în creșterea plantelor, înflorire și ulterior formarea semințelor (Javaid, 2011). În schimb, metale precum Cd, Pb, Hg și Cr nu prezintă nicio importanță pentru desăvârșirea funcțiilor biologice ale plantelor (Gaur & Adholeya, 2004). Indiferent că sunt sau nu esențiale, metalele grele au efecte negative asupra organismelor vii atunci când se acumulează în concentrații ridicate. Aceste elemente chimice nu se degradează în sol, ci se acumulează de-a lungul timpului sub formă de ioni metalici liberi, complexe metalice sau compuși insolubili precum oxizi, carbonați și hidroxizi (Davies et al. 2001). Spre exemplu Pb, unul dintre cele mai toxice metale grele, are un timp de retenție în sol de aproximativ 150- 5000 de ani (Mani & Kumar, 2014). În cazul solurilor

agricole, problema abundenței, persistenței și toxicității acestor contaminanți se pune și mai acut întrucât absorbția lor la nivelul plantelor duce la o scădere a calității și siguranței alimentelor. Prin pătrunderea în lanțul trofic, este afectată sănătatea plantelor, animalelor și implicit, sănătatea oamenilor (Riaz et al. 2020). La plante, toxicitatea metalelor grele survine prin mai multe mecanisme. Sunt perturbate procese metabolice vitale și este redusă activitatea enzimelor antioxidante (Azcon et al. 2009). Se produc specii reactive de oxigen (ROS) în cantități care periclitează integritatea celulară, sunt înlocuiți anumiți ioni din structura biomacromoleculilor și se induc modificări în permeabilitatea membranei plasmatică, de altfel foarte vulnerabilă la acumularea de metale grele (Javaid, 2011). De pildă, Zn în cantități excesive inhibă creșterea sistemului radicular, absorbția fosforului și induce apariția clorozei (Nagajyoti et al. 2010). Cd poate inhiba enzima nitrat-reductaza, responsabilă de reducerea nitratului la nitrit, după cum s-a observat în plantele de *Silene cucubalus* (Mathys, 1975).

Sursele de contaminare a solului cu metalele grele sunt reprezentate de diverse activități antropogene: utilizarea excesivă a fertilizatorilor și pesticidelor, gestionarea necorespunzătoare a deșeurilor industriale și a celor menajere, activitățile miniere etc. (Mahar et al. 2016). Metodele tradiționale de restaurare a solurilor contaminate presupun excavarea acestora, urmată de depozitarea în spații special amenajate, spălarea solurilor sau reînhumarea (Ikram et al. 2018). Aceste metode fizico-chimice sunt însă laborioase și extrem de costisitoare. Pe lângă aceasta, afectează considerabil activitatea biologică a solurilor, făcându-le mai puțin valoroase pentru creșterea plantelor (Gaur & Adholeya, 2004).

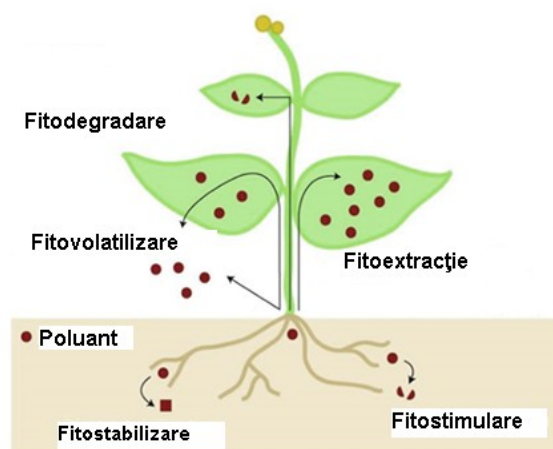
Fitoremedierea reprezintă o modalitate eficientă de îmbunătățire a calității mediului înconjurător prin intermediul plantelor și al microorganismelor asociate cu acestea (Pilon-Smits, 2005). Cu alte cuvinte, fitoremedierea este utilizată pentru îndepărtarea diferiților agenți poluanți, organici sau anorganici, prezenți în sol, apă sau aer (Smith, 1998). Este utilizată cu succes în restaurarea solurilor poluate cu metale grele. Această tehnologie este eficientă și mai ușor de implementat comparativ cu mijloacele tradiționale (Ali et al. 2013). Există diferite căi de fitoremediere (fig 1):

- fitostabilizare- presupune imobilizarea contaminanților și reducerea disponibilității acestora; se împiedică în felul acesta răspândirea poluanților prin intermediul vântului și ploii (Meier et al. 2012);
- fitoextracție- utilizează plante pentru absorbția metalelor grele din sol în rădăcini și ulterior transferul acestora în organele supraterane (Mahar et al. 2016); după recoltare, plantele sunt incinerate, iar metalele grele recuperate și utilizate în diverse scopuri;

- fitovolatilizare- presupune volatilizarea poluanților și eliberarea lor ulterioară din plante (Smith, 1998);
- fitostimulare/ rizofiltrare- implică degradarea contaminanților de către microorganismele din rizosferă (Pilon-Smits, 2005);
- fitodegradare- presupune absorbția agenților poluanți și degradare acestora în interiorul plantelor, sub acțiunea anumitor enzime (Mani & Kumar, 2014).

Acest articol vizează utilizarea plantelor și a diferitelor specii de funghi, care formează micorize arbusculare (MA), în procesele de fitoextracție și fitostabilizare.

FIG. 1. Diferite căi de fitoremediere (adaptat după Pilon-Smits, 2005)



MICORIZELE ARBUSCULARE- GENERALITĂȚI

GĂLEAN: Significant roles of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metals contaminated soils

Speciile de funghi, care formează MA, sunt microorganisme din sol ce se asociază cu rădăcinile a peste 80% din plantele terestre, stabilind relații simbiotice (Bonfate & Perotto, 1995; Javaid, 2011; Ianovici et al, 2011; Riaz et al. 2020). Prin urmare, aceste specii sunt obligat biotrofe. În absența plantelor, spori pot germina, însă miceliul poate să se dezvolte și să producă rețeaua extinsă de hife numai în prezența unei plante gazdă (Akiyama et al. 2005; Miransari, 2017). MA sunt clasificate în categoria endomicorizelor (Bonfate & Perotto, 1995), dar miceliul se extinde considerabil și în sol, exploatănd arii noi pentru colonizare și absorbție de nutrienți (Rillig, 2004). În rădăcini, hife ale miceliului pătrund între și în celulele epidermice și corticale, celelalte tipuri de țesuturi- de conducere, meristematic- prezentând rezistență la dezvoltarea de micorize (Bonfate & Perotto, 1995). La nivel intracelular, se formează structuri fungice specifice, precum arbuscule, cu rol în schimbul de nutrienți cu planta gazdă (Rillig, 2004), și vezicule ce se constituie ca organe de stocare a nutrienților, dar și a lipidelor necesare ciupercii (Rillig, 2004; Ianovici, 2010b; Javaid, 2011). Aceste asociații simbiotice asigură o serie de beneficii plantelor gazdă: ameliorează absorbția nutrienților, cresc rezistența la diferiți agenți patogeni, dar și la stresul indus de factori abiotici precum metale grele, salinitate etc. și de asemenea, îmbunătățesc structura solului (Gosling et al. 2006; Ianovici et al, 2009; Ianovici, 2010a). Figura 2 ilustrează aceste beneficii comparativ cu plantele lipsite de MA.

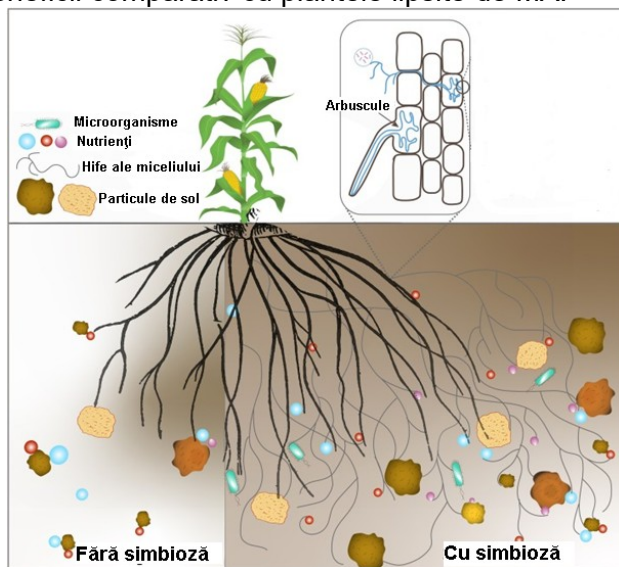


FIG. 2. Structura solului în absența, respectiv prezența simbiozelor realizate de MA cu rădăcinile plantelor (adaptat după Riaz et al. 2020).

Aproximativ toate speciile de funghi care formează MA fac parte din Încregătura Glomeromycota, iar printre genurile cele mai cunoscute se

numără: *Glomus*, *Acaulospora*, *Ambispora*, *Paraglomus*, *Scutellospora*, *Kuklospora*, *Fuscutata* etc. (Javaid, 2011). Aceste specii au capacitatea de a crește rapid și de a produce un număr mare de spori (Abdelhameed & Metwally, 2019). Anumite specii au fost identificate pe solurile contaminate cu metale grele, sugerându-se faptul că au dobândit toleranță față de acești contaminanți. Astfel, s-au identificat concentrații ridicate de Zn în cazul genului *Glomus*: peste 1200 mg/ kg la *Glomus mosseae* și peste 600 mg/ kg la *Glomus versiforme* (Gaur & Adholeya, 2004). Tot *Glomus mosseae* a fost identificat în rădăcinile de *Fragaria vesca*, contribuind la susținerea creșterii acestei plante pe solurile contaminate cu Zn, iar *Scutellospora purpurascens* în rădăcinile de *Agrostis capillaris* (Gaur & Adholeya, 2004). Unele specii de fungi cresc absorbția metalelor grele și transportul acestora dinspre rădăcină spre celelalte țesuturi, iar altele împiedică acest proces prin imobilizarea poluanților în diferite structuri (Javaid, 2011). În felul acesta, MA pot fi folosite diferit în procesul de fitoremediere.

ROLURILE MICORIZELOR ARBUSCULARE ÎN FITOEXTRACȚIE

Fitoextracția presupune utilizarea plantelor pentru extragerea metalelor grele din sol și acumularea acestora în organele supraterane ale organismelor vegetale (Abdelhameed & Metwally, 2019). Există câteva modalități prin care MA asigură succesul procesului de fitoextracție: 1) creșterea plantelor și producerea semnificativă de biomasă; 2) favorizarea absorbției de metale grele și translocarea lor în țesuturile plantelor; 3) creșterea toleranței la toxicitatea indusă de acești contaminanți (Vamerali et al. 2010). Prezența MA în ecosistem este importantă deoarece cresc absorbția ionilor imobili precum fosforul (P), prin extinderea hifelor dincolo de zona de exploatare a acestui element. Pe lângă P, alți macronutrienți- N, K și Mg - sunt preluați mult mai ușor din sol (Gosling et al. 2006). În felul acesta, în plantă crește rata de sinteză a clorofilei și implicit rata de fotosinteză (Javaid, 2011). De asemenea, MA determină o creștere sănătoasă a sistemului radicular și extinderea suprafeței acestuia chiar și în condițiile de stres (Riaz et al. 2020). Toate acestea conduc la obținerea de biomasă vegetală considerabilă, alături de o toleranță mult mai puternică la excesul de metale grele din solurile contaminate (Gong et al. 2019).

Există plante care în mod natural hiperacumulează metale grele în țesuturile vegetale, acestea fiind cunoscute sub numele de hiperacumulatori sau metalofite (Janeeshma & Puthur, 2019). Hiperacumulatorii absorb la nivelul sistemului radicular metalele grele, le transferă în xilem, iar ulterior sunt translocate în celelalte țesuturi (Miransari, 2011). Aici, există mecanisme prin care organismul vegetal gestionează elementele toxice, și-anume: chelatarea de către metalotioneine (polipeptide de aproximativ 70-80 aminoacizi) sau

GĂLEAN: Significant roles of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metals contaminated soils

depozitarea în vacuole (Miransari, 2017). Totuși, aceste plante nu pot crește semnificativ astfel încât extracția de metale grele să fie realizată cu randament ridicat. Asocierea acestor metalofite cu MA a constituit o soluție ideală pentru creșterea de biomasă și acumularea poluanților (Janeeshma & Puthur, 2019). Pe lângă asigurarea unei cantități mai mari de nutrienți, MA au crescut și disponibilitatea metalelor grele prin diferite mecanisme de acidifiere (producere de acid malic, acid oxalic), procese redox sau prin chelatarea metalelor, urmată de translocare în țesuturile plantei (Teotia et al. 2016). De exemplu, relația simbiotică dintre *Glomus versiforme* și hiperacumulatorul *Solanum nigrum* a condus la o creștere a absorbției de Cd, concomitent cu dezvoltarea normală a acestui metalofit, fiind o asociere perfectă pentru procesul de fitoremediere (Liu et al. 2015). În cazul metalofitului *Pteris vittata*, colonizat cu specia *Glomus mosseae*, s-a constatat o creștere însemnată de P și As, întrucât As funcționează ca un analog al P (Ma et al. 2001).

Metalele grele induc stresul oxidativ la plante prin dezechilibrarea raportului de producere/ utilizare a speciilor reactive de oxigen (ROS) (Yan et al. 2018). Cu alte cuvinte, o modalitate de concretizare a efectului toxic indus de metalele grele este producerea de ROS în concentrații nocive. Plantele dispun de un sistem enzimatic de apărare împotriva stresului oxidativ. Printre cele mai importante enzime se numără superoxid-dismutaza (SOD), peroxidaza (POD) și catalaza (CAT) (Yan et al. 2018). MA declanșează și stimulează acest sistem enzimatic de protecție la plante. *Rhizoglosum intraradices* și *Glomus etunicatum* au redus efectele negative ale ROS la grâu prin creșterea activității celor trei enzime anterior amintite (Sharma et al. 2017). De asemenea, MA promovează sinteza enzimelor antioxidante, mai ales a SOD, evitându-se astfel acumularea ROS și oxidarea lipidelor membranare (Gong et al. 2019). La aceste specii de fungi care formează MA, s-au identificat și anumite gene implicate în toleranța stresului cauzat de metalele grele. Gena GmarMT1 de la *Gigaspora margarita* codifică proteina metalotioneină, implicată în reglarea stresului la plante (Gong et al. 2019). O altă genă, GinZnT1 de la *Glomus intraradices*, codifică pentru o proteină transportor pentru Zn prin care se asigură compartimentarea Zn în vacuole (Meier et al. 2012).

Așadar, prin acțiunea sinergică a celor trei modalități de susținere a creșterii plantelor în pofida acumulării de metale grele, MA se dovedesc a fi de o importanță primordială în fitoextracție.

ROLURILE MICORIZELOR ARBUSCULARE ÎN FITOSTABILIZARE

Fitostabilizarea este un proces prin care nu se elimină metalele grele din mediul înconjurător, dar sunt imobilizate în sol, în structurile arbusculare ale micorizelor sau în rădăcinile plantelor (Abdelhameed & Metwally, 2019). La

fel ca în cazul fitoextracției, MA prezintă anumite mecanisme prin care pot reduce disponibilitatea acestor contaminanți. Una dintre cele mai cunoscute modalități de fitostabilizare este legarea metalelor la nivelul glomalinei. Glomalina este o glicoproteină insolubilă și termostabilă secretată de miceliul fungilor (Javaid, 2011). Este eliberată și în sol, însă în cantități mai mici (<20%), de aceea până în prezent această proteină nu a putut să fie extrasă și purificată complet din sol (Malekzadeh et al. 2016; Janeeshma & Puthur, 2019). O formă complexă a glomalinei numită GRSP (Glomalin-Related-Soil-Protein) protejează plantele de acțiunea directă a metalelor toxice prin legarea acestora și convertirea cationilor metalici la o formă inactivă (Malekzadeh et al. 2016). Interesant este că, deși glomalina a fost clasificată inițial drept o glicoproteină, se consideră că de fapt este o proteină de șoc termic (Heat shock protein). Astfel de proteine de șoc termic sunt înalt conservate pe scara evolutivă, fiind observate, cu mici diferențe în structură, atât la celulele procariote, cât și la cele eucariote, inclusiv celulele umane (Cabral et al. 2015). S-a observat că există o directă proporționalitate între cantitatea de glomalină secretată și cantitatea de metale grele legată, prin urmare speciile care produc această proteină în cantitate mare sunt cele mai utilizate în procesele de fitostabilizare (Janeeshma & Puthur, 2019). Gonzalez-Chavez și colaboratorii (2004) au identificat diferite cantități de metale grele imobilizate la nivelul glomalinei: 0.62-1.12 mg Pb, 1.6- 4.3 mg Cu și 0.02-0.08 mg Cd per gram de glomalină. Într-un experiment, realizat in vitro, specia *Gigaspora rosea* a legat aproximativ 28 mg Cu/ g glomalină. De asemenea, glomalina îmbunătățește structura solului funcționând precum un ligand între particulele fine de sol pe care le stabilizează (Riaz et al. 2020). Structura solului este importantă pentru aportul corect de nutrienți și rezistența plantelor la stresul indus de factori biotici sau abiotici (Riaz et al. 2020). În afara speciilor de fungi din Încregătura Glomeromycota, nu au fost identificate alte specii la care producerea de glomalină să fie în cantitate însemnată (Malekzadeh et al. 2016).

O altă modalitate de imobilizare a metalelor grele este legarea lor de chitină și chitosan, polizaharide din structura peretelui celular. Anumite grupări funcționale, precum hidroxil, carboxil, prezintă sarcini negative care atrag cationii metalici din sol. Această modalitate de fitostabilizare este avantajoasă deoarece reduce concentrația metalelor din sol și în același timp nu permite translocarea lor în țesuturile plantelor (Zhou, 1999; Gong et al. 2019).

S-a constatat că MA secretă la suprafața hifelor anumite substanțe polimerice (carbohidrați, proteine, glicoproteine) care tot prin intermediul unor grupări funcționale libere, chelatează metalele grele și le rețin la suprafața structurilor fungice (More et al. 2014). În același timp, agenții poluanți pot fi

GĂLEAN: Significant roles of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metals contaminated soils

depozitați chiar în arbusculele și veziculele din interiorul celulelor corticale ale rădăcinii, restricționându-se încă o dată transferul către plante. Chen și colaboratorii (2018) au demonstrat lucrul acesta utilizând specia de fungi *Rhizophagus irregularis*, cu care a colonizat rădăcini de *Lotus japonicus*, o leguminoasă sălbatică din familia Fabaceae. Cd s-a acumulat considerabil în structurile arbusculare ale micorizelor, fiind o altă dovadă că MA pot fi utilizate cu succes în fitoremedierea solurilor contaminate cu metale grele.

CONCLUZII

Prezența MA în ecosisteme este de o importanță covârșitoare din multe puncte de vedere. În plus, faptul că se pot dezvolta cu ușurință în mediile poluate cu diverși contaminanți, atrage și mai mult atenția, MA fiind utilizate ca unelte biotehnologice pentru curățarea mediilor naturale. Specii de fungi utilizați pentru susținerea și creșterii plantelor pe soluri contaminate cu metale grele sunt prezentate în tabelul 1. Identificarea combinației potrivite dintre specia de fungi și plantă, pentru eliminarea unui anumit contaminant, este o regulă esențială pentru eficiența fitoremedierii. Consider că cercetări ulterioare în acest domeniu pot furniza soluții și mai promițătoare pentru eliminarea metalelor grele extrem de răspândite în natură din cauza activităților antropogene, situație critică cu care se confruntă omenirea în zilele noastre.

TABEL 1. Specii de fungi ce susțin creșterea plantelor pe solurile contaminate cu metale grele
(adaptat după Riaz et al. 2020)

Metale grele	Speciile de fungi tolerante	Planta gazdă	Tipul mecanismului de fitoremediere	Referințe
Cu	<i>Glomus mosseae</i>	<i>Pteris vittata</i> <i>Trifolium repens</i>	Fitostabilizare	Chen et al. 2007
Cd	<i>Glomus intraradices</i> <i>Glomus mosseae</i> <i>Glomus claroideum</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>	Fitostabilizare	Janouskova et al. 2006
Cd, Mo, Mn, Zn, Cu, Al, As, Ni	<i>Glomus mosseae</i>	<i>Trifolium repens</i>	Fitostabilizare	Azcon et al. 2009
Zn	<i>Glomus deserticola</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	Fitoextracție	Arriagada et al. 2010
Cd, Cr, Ni, Pb	<i>Rhizophagus fasciculatus</i> , <i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>Funneliformis mosseae</i> <i>Glomus aggregatum</i>	<i>Zea mays</i>	Fitoextracție	Singh et al. 2019
Cd	<i>Glomus elunicatum</i> , <i>Glomus versiforme</i>	<i>Medicago sativa</i>	Reducerea absorbției de Cd	Zhang et al. 2019
	<i>Glomus clarum</i> , <i>Gigaspora</i>	<i>Trigonella</i>	Fitostabilizare	Abdelhameed &

Cd	<i>nigra</i>	<i>foenumgraecum</i>		Metwally, 2019
Cr	<i>Glomus mosseae, Glomus intraradices</i>	<i>Caspicum annum</i>	Fitostabilizare	Ruscitti et al. 2011

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

- Abdelhameed R.E., Metwally R.E. 2019. Alleviation of cadmium stress by arbuscular mycorrhizal symbiosis, International Journal of Phytoremediation.
- Akiyama K., Matsuzaki K., Hayashi H. 2005. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. Nature. 435: 824-827.
- Ali H., Khan E., Sajad M.A. 2013. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. Chemosphere. 91: 869–881.
- Arriagada, C., Pereira, G., García-Romera, I., Ocampo, J.A. 2010. Improved zinc tolerance in *Eucalyptus globulus* inoculated with *Glomus deserticola* and *Trametes versicolor* or *Corioloopsis rigida*. Soil Biol. Biochem. 42: 118–124.
- Azcon R., Peralvarez M. del C., Biro B., Roldan A., Ruíz-Lozano J.M. 2009. Antioxidant activities and metal acquisition in mycorrhizal plants growing in a heavy-metal multicontaminated soil amended with treated lignocellulosic agrowaste. Appl. Soil Ecol. 41: 168–177.
- Bonfate P., Perotto S. 1995. Strategies of arbuscular mycorrhizal fungi when infecting host plants. New Phytol. 130: 3-21.
- Cabral L., Soares C., Giachini A., Siqueira J. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of contaminated areas by trace elements: mechanisms and major benefits of their applications. World J Microbiol Biotechnol.
- Chen, B., Xiao, X., Zhu, Y.G., Smith, F.A., Miao Xie, Z., Smith, S.E. 2007. The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* gives contradictory effects on phosphorus and arsenic acquisition by *Medicago sativa* Linn. Sci. Total Environ. 379: 226–234.
- Chen, H., Yang, X., Wang, P., Wang, Z., Li, M., Zhao, F.J. 2018. Dietary cadmium intake from rice and vegetables and potential health risk: A case study in Xiangtan, southern China. Sci. Total Environ. 639: 271–277.
- Davies F.T., Puryear J.D., Newton R.J., Egilla J.N., Saraiva Grossi J.A. 2001. Mycorrhizal fungi enhance accumulation and tolerance of chromium in sunflower (*Helianthus annuus*). J. Plant Physiol. 158: 777–786.
- Gaur A., Adholeya A. 2004. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Curr Sci 86: 528–534.
- Gong X., Dong Q.T. 2019. Study on the effect mechanism of Arbuscular Mycorrhiza on the absorption of heavy metal elements in soil by plants. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 267 052064.
- Gonzalez-Chavez, M.C., Carrillo-Gonzalez, R., Wright, S.F., Nichols, K.A. 2004. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. Environ. Pollut. 130: 317–323.
- Gosling P., Hodge A., Goodlass G., Bending G.D. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. Agriculture, Ecosystems and Environment 113: 17–35.
- Ianovici N. 2010a. Some preliminary data about vesicular – arbuscular mycorrhizas at different species of *Plantago*, Annals of West University of Timișoara, ser. Biology, 13: 129-134

GĂLEAN: Significant roles of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metals contaminated soils

- Ianovici N. 2010b. Preliminary investigations on the arbuscular mycorrhizas in *Plantago lanceolata*. In: Şesan T. (Eds.), Romanian approaches on mycorrhizas in the frame of European Researches, Ed. Universităţii din Bucureşti, p. 61-72
- Ianovici N., Sinitean A., Faur A. 2011. Anatomical properties of *Plantago arenaria*. Annals of West University of Timişoara, ser. Biology, 14: 23-34
- Ianovici N., Tărau G., Mujescu M. 2009. Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization on *Plantago lanceolata* in Zlatna, Valea Rizei and Timişoara, Fungi & Mycotoxins, 3: 291-296
- Ikram M., Ali N., Jan G., Jan F.G., Rahman I.U., Iqbal A. 2018. IAA producing fungal endophyte *Penicillium roqueforti* Thom., enhances stress tolerance and nutrients uptake in wheat plants grown on heavy metal contaminated soils. PLoS ONE. 13 (11): 1-22.
- Janeeshma E., Puthur J.T. 2019. Direct and indirect influence of arbuscular mycorrhizae on enhancing metal tolerance of plants. Springer Nature.
- Janouskova, M., Pavlíkova, D., Vosatka, M. 2006. Potential contribution of arbuscular mycorrhiza to cadmium immobilisation in soil. Chemosphere 65: 1959–1965.
- Javaid A. 2011. Importance of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils. Springer Science. 20: 125-135.
- Liu H., Yuan M., Tan Sh., Yang X., Lan Zh., Jiang Q., Ye Zh., Jing Y. 2015. Enhancement of arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus versiforme*) on the growth and Cd uptake by Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum*. Applied Soil Ecology. 89: 44–49.
- Ma LQ, Komar KM, Tu C, Zhang WH, Cai Y, Kennelley ED. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic. Nature. 409: 579–1579.
- Mahar A., Wang P., Ali A., Awasthi M.K., Lahori A.H., Wang Q., Li R., Zhang Z. 2016. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety. 126: 111–121.
- Malekzadeh E., Aliasgharzad N., Majidi J., Abdolalizadeh J., Aghebati-Maleki L. 2016. Contribution of glomalin to Pb sequestration by arbuscular mycorrhizal fungus in a sand culture system with clover plant. Euro. J. of Soil Biol. 74: 45-51.
- Mani D., Kumar Ch. 2014. Biotechnological advances in bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems: an overview with special reference to phytoremediation. Int. J. Environ. Sci. Technol. 11: 843–872.
- Mathys W. 1975. Enzymes of Heavy-Metal-Resistant and Non-Resistant Populations of *Silene cucubalus* and Their Interaction with Some Heavy Metals *in vitro* and *in vivo*. Physiol. Plant. 33:161-165.
- Meier S., Borie F., Bolan N., Cornejo P. 2012. Phytoremediation of Metal-Polluted Soils by Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 42: 7, 741-775.
- Miransari M. 2011. Hyperaccumulators, arbuscular mycorrhizal fungi and stress of heavy metals. Biotechnol. Adv. 29: 645–653.
- Miransari M. 2017. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Heavy Metal Tolerance in Plants. Springer Nature. 147-161.
- More, T.T., Yadav, J.S.S., Yan, S., Tyagi, R.D., Surampalli, R.Y. 2014. Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications. J. Environ. Manage. 144: 1–25.
- Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. Environ Chem Lett. 8: 199–216.
- Pilon-Smits E. 2005. Phytoremediation. Annu. Rev. Plant. Biol. 56: 15–39.

- Riaz M., Kamran M., Fang Y., Wang Q., Cao H., Yang G., Deng L., Wang Y., Zhou Y., Anastopoulos I., Wang X. 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review. *J. Hazardous Materials* 402.
- Rillig M.C. 2004. Arbuscular mycorrhizae, glomalin and soil quality. *Can J Soil Sci.* 84: 355–363.
- Ruscitti, M., Arango, M., Ronco, M., Beltrano, J. 2011. Inoculation with mycorrhizal fungi modifies praline metabolism and increases chromium tolerance in pepper plants (*Capsicum annuum* L.). *Brazilian J. Plant Physiol.* 23: 15–25.
- Sharma, S., Anand, G., Singh, N., Kapoor, R. 2017. Arbuscular mycorrhiza augments arsenic tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by strengthening antioxidant defense system and thiol metabolism. *Front. Plant Sci.* 8.
- Singh, G., Pankaj, U., Chand, S., Verma, R.K. 2019. Arbuscular Mycorrhizal Fungi- Assisted Phytoextraction of Toxic Metals by *Zea mays* L. From Tannery Sludge. *Soil Sediment Contam.* 28: 729–746.
- Smith R.D., Salt D.E., Raskin I. 1998. Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49: 643–68.
- Teotia P, Kumar V, Kumar M, Shrivastava N, Varma A (2016) Rhizosphere microbes: potassium solubilization and crop productivity– present and future aspects. In: Meena V, Maurya B, Verma J, Meena R (eds) Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture. Springer, India, pp 315–325.
- Vamerali T., Bandiera M., Mosca G. 2010. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environ Chem Lett* 8: 1–17.
- Yan, L., Riaz, M., Wu, X., Du, C., Liu, Y., Lv, B., Jiang, C. 2018. Boron inhibits aluminum-induced toxicity to *Citrus* by stimulating antioxidant enzyme activity. *J. Environ. Sci. Heal. - Part C Environ. Carcinog. Ecotoxicol. Rev.* 36 : 145–163.
- Zhang, F., Liu, M., Li, Y., Che, Y., Xiao, Y. 2019. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and cadmium on the yield and element uptake of *Medicago sativa*. *Sci. Total Environ.* 655: 1150–1158.
- Zhou JL (1999) Zn biosorption by *Rhizopus arrhizus* and other fungi. *Appl Microbiol Biotechnol* 51: 686–693.