

Fitorremediación: l'usu de plantes na descontaminación de suelos

Por Aida González, Rebeca Fernández, Daniel Fernández-Fuego,
Alejandro Navazas, Ana Bertrand

Departamentu de Biología d'Organismos y Sistemes (Fisiología Vexetal)
Universidá d'Uviéu

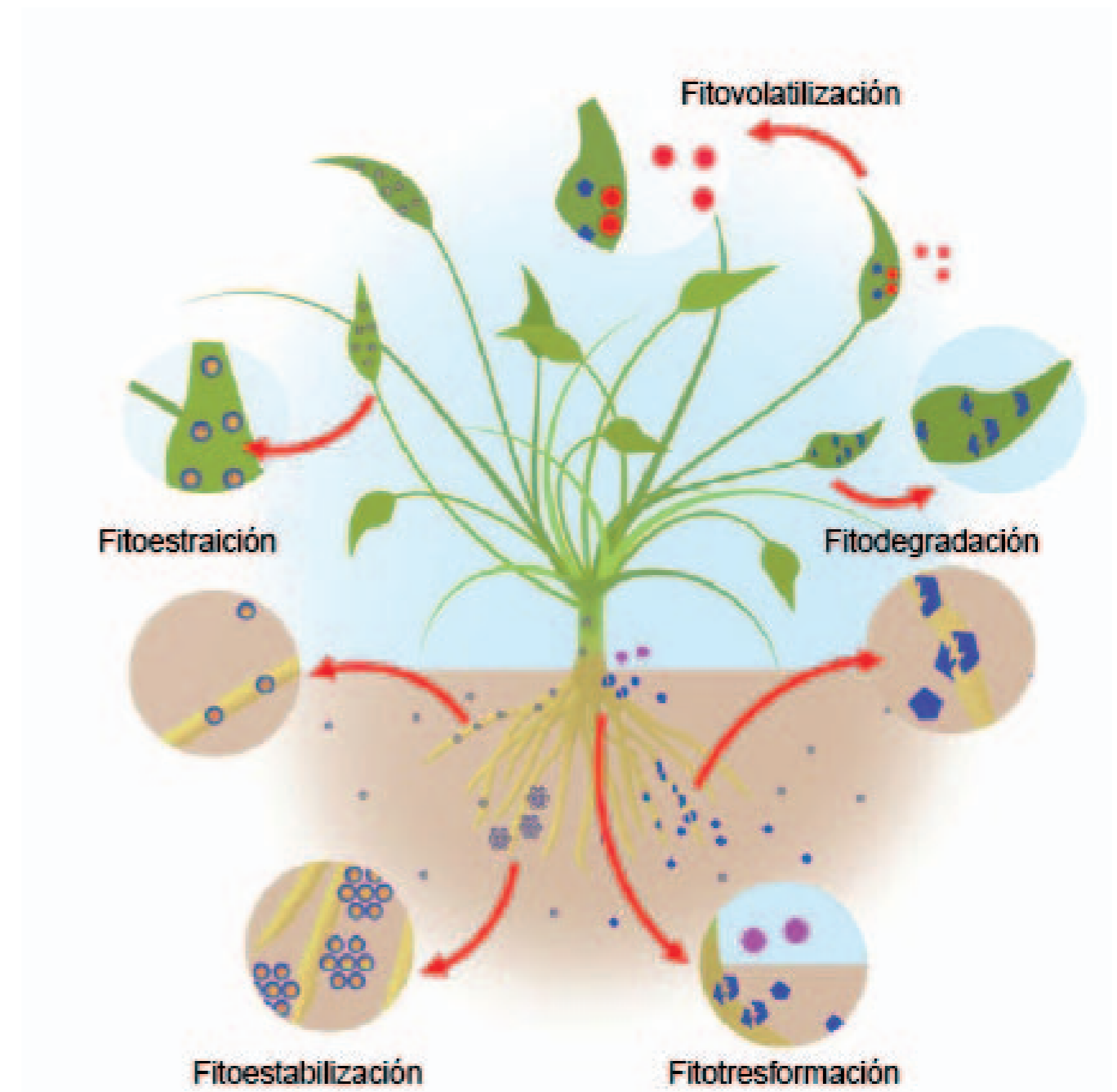


Figura 1. Representación esquemática de los tipos de fitorremediación. (Tomado de Parmar y Singh, 2015)

L'actividá minera ya industrial, el desendolcu teunolóxicu, la mala xestión y utilización de productos venceyaos con llabores agrícolas ya industriales y en xeneral cuasi toles actividaes humanas contribuyeron a un deterioru del medioambiente como un efeutu collateral al desendolcu industrial y teunolóxicu. La migración d'estos contaminantes a otres zones y el so espardimientu contribúin a la contaminación de los ecosistemas tanto terrestres como acuáticos qu'en mayor o menor midida afeuta a tolos países desarrollaos. La contaminación d'estos suelos ye muy variada: ún de los principales problemes colos que nos atopamos ye que nunca tán contaminaos con un únicu elementu o compuestu tóxicu, sinón que son dellos los que contaminen al empar estos terrenos (hidrocarburos, metales pesaos, compuestos fenólicos, etc.). Por mor de vertíos abondo estremaos y dispersos, les concentraciones de caún d'estos compuestos son mui diverses y desiguales. Nel casu d'Asturies, les explotaciones industriales y, sobre manera, les males práutiques de dómines pasaes produxeron restos con altes concentraciones de metales pesaos que planteguen un importante problema tanto a nivel medioambiental como de la salú humana, yá que pueden entrar na cadena trófica y provocar malures non solo pola so inxesta, sinón tamién pola esposición crónica a estos contaminantes. Amás, el so peligrosu vese agraváu pola so persistencia nel tiempu qu'en dellos casos ye de miles d'años y n'especial pola so dificultá pa desanicialos.

METALES PESAOS

Magar que pueda paecer estraño, nun hai una definición concreta per parte de los organismos responsables nin una referencia clara y esautada de les propiedaes o carauterístiques qu'ha tener un metal pesao. Defínense en función de la so alta densidá, pesu o númberu atómicu, de les sos propiedaes químiques y sobre manera en función de la so toxicidá. El términu «metal pesao» úsase pa facer mención, d'una manera non mui precisa, a ciertos elementos metálicos a los que se-yos atribúin determinaos efeutos de contaminación ambiental y toxicidá. Del total d'elementos de la tabla periódica, 49 tán clasificaos como metales pesaos ente los que podemos destacar: arsénicu (As), cadmiu (Cd), cromu (Cr), fierro (Fe), manganesu (Mn), mercuriu (Hg), molibdenu (Mo), níquel (Ni), plata (Ag), plomu (Pb) y zinc (Zn), pero non toos son igual de tóxicos nin tienen la mesma importancia biolóxica. D'algunos d'estos elementos son nutrientes esenciales pa la medría y espoxigue de les plantes que viven nestos terrenos como ye'l casu de Fe, Mn, Mo y Zn; sicasí, otros (As, Cd, Cr, Hg, Pb) nun tienen una función conocida y son abondo tóxicos pa plantes, microorganismos, animales y pal home. L'arsénicu y el seleniu son elementos que nun pueden ser catalogaos como metales, yá que son metaloides, por más que tienen carauterístiques asemeyaes a los metales pesaos. Por eso utilízase anguaño'l términu metal(oid)es pesaos (MP) qu'engloba mesmo a los metales qu'a los metaloides. Les plantes que xorrecen en presencia d'estos MP necesitan mecanismos que-yos dexen conservar les concentraciones d'elementos esenciales ente les llendes de deficiencia y toxicidá y les de los MP non esenciales per debaxo del nivel de toxicidá.

FITORREMIEDIACIÓN

La revexetación o remediación de los suelos contaminaos foi un retu munchos años a nivel mundial nel que fracasaron numerosos intentos tanto de recuperar la vexetación orixinal como de llantar especies d'interés comercial por cuenta de les condiciones edáfiques adverses que tienen estos suelos: niveles tóxicos de MP y otros contaminantes, predominiu de roques de distinta granulometría que mengüen la disponibilidad d'agua, escasos nutrientes o falta de microorganismos beneficiosos.

Tradicionalmente, les téuniques que se vienen utilizando pal desaniacu de los contaminantes del suelu inclúin, ente otres, la escavación y almacenamientu de suelos, el llaváu, la estraición con disolventes, la oxidación química, el bombéu y posterior tratamientu físico-químicu. Sicasí, toes elles presenten un refileru d'inconvenientes ente los qu'habría sollíñase'l riesgu de manipulación, l'eleváu costu por cuenta de la necesidá d'equipos especializaos y l'alteración de l'actividá biolóxica de los ecosistemas. Amás, hai que se decatar de qu'en munches ocasiones les zones afeutaes son grandes estensiones de terrén, polo qu'estes téuniques resulten complexes y males d'aplicar. Por too esto, ye necesaria una solución efeutiva y teunolóxicamente viable que nos dexa desendolcar nueves téuniques más rentables, de baxu consumu enerxéticu, segures ya inocues col mediu que nos arrodia. Equí ye onde surge la fitorremediación como una téunica biolóxica verde, non agresiva col medioambiente, que se basa nel usu de plantes, tanto herbales como lleñoses, y los sos microorganismos rizoféricos asociaos, p'amenorgar, desanicar, degradar o inmovilizar contaminantes del suelu o agua col fin de restaurar los terrenos o l'agua contaminao.

Güei tán desendolcándose dellos tipos de fitorremediación (Figura 1 n'entamu d'artículu) ente los qu'hai de destacar la fitoestraición y la fitoestabilización. La primera considérase la más eficiente y rentable: básase na capacidá de ciertas plantes pa desanicar los MP del suelu per aciu de l'absorción pelos raigones. El so tresporte y acumulamientu posterior na parte aérea. La fitoestabilización busca inmovilizar los contaminantes en suelu pa prevenir la so lixiviación al agua soterraño y torgar qu'entren na cadena trófica.

La fitorremediación convirtióse, poro, nuna téunica versátil con munches aplicaciones potenciales y con puxu en toles naciones industrializaes. Ente les sos grandes ventayes ha rescampase:

- el so baxu costu;
- nun alteria la biodiversidá del suelu, sinón qu'ameyora les sos propiedaes físiques y químiques por mor de la formación d'una cubrición vexetal;
- xenera menos contaminantes ambientales y menos restos;
- ye una teunoloxía cenciella y con gran atractivu social;
- nun tien falta de consumu enerxéticu;
- pue usase en suelu, agua y aire.

Sicasí, a pesar de toes estes ventayes, la fitorremediación enfrentase a delles torgues pa la so aceutación o usu d'afechu como son:

- la necesidá de llargos periodos de tiempu;
- la so capacidá de descontaminación ta condicionada al ciclu de vida de les plantes, yá que ye dependiente de les estaciones;
- ta condicionada pola disponibilidad de los contaminantes en suelu y pola fondura a la qu'estos tean; la mayor tasa de descontaminación tien llugar a escasos 2 m de la superficie, magar qu'esto ye variable acordies col tipu de planta que s'utilice.

Dalgunes plantes, a pesar de qu'atropen cantidaes bien altes de metal(oid)es pesaos nun son amañoses pa usales en fitorremediación por mor del so pequenu tamañu y biomasa. Ye'l casu de *Noccaea caerulescens* que s'usa fundamentalmente como planta modelu pa facer estudios d'hiperacumulación de metales pesaos

Por tolo espuesto, ye necesario demostrar eficacia y costu-efectividad a los propietarios, consultores y llexisladores, rompiendo amás barreres y preuicios ya incluyendo lleis medioambientales que favorezan aquellos teunoloxíes que nun seyan agresives pa col suelu y que potencien la diversidá d'esti pa nun alterar les sos condiciones naturales.

ESCOYETA DE PLANTES

Magar los grandes problemes que presenten estes zones contaminaes pa dexar que s'instale una vexetación sobre la so superficie, viose qu'hai plantes qu'espoixuen con normalidá y completen el so ciclu de vida nestos terrenes, yá que son pa escluyir o atropar MP nos sos texíos y almacenalos nes vacuoles y otros orgánulos p'amenorgar la so toxicidá y seguir cola medría. Aquelles plantes que los esclúin, ye dicir que nun dexen la entrada de contaminantes al interior del raigañu, denómense **esclusores**, mentanto que les que los atropen principalmente nes fueyes o raigones reciben el nome de plantes **acumuladores** o **hiperacumuladores** en función de la concentración de MP acumulaos. Amás son pa colonizar y xorrecer en suelos contaminaos con As, Cd, Fe, Hg, Pb, Zn, etc. Estes plantes acumuladores o hiperacumuladores son les amañoses pa usar na descontaminación de suelos.

Ún de los aspectos más complexos de la que

DERECHA

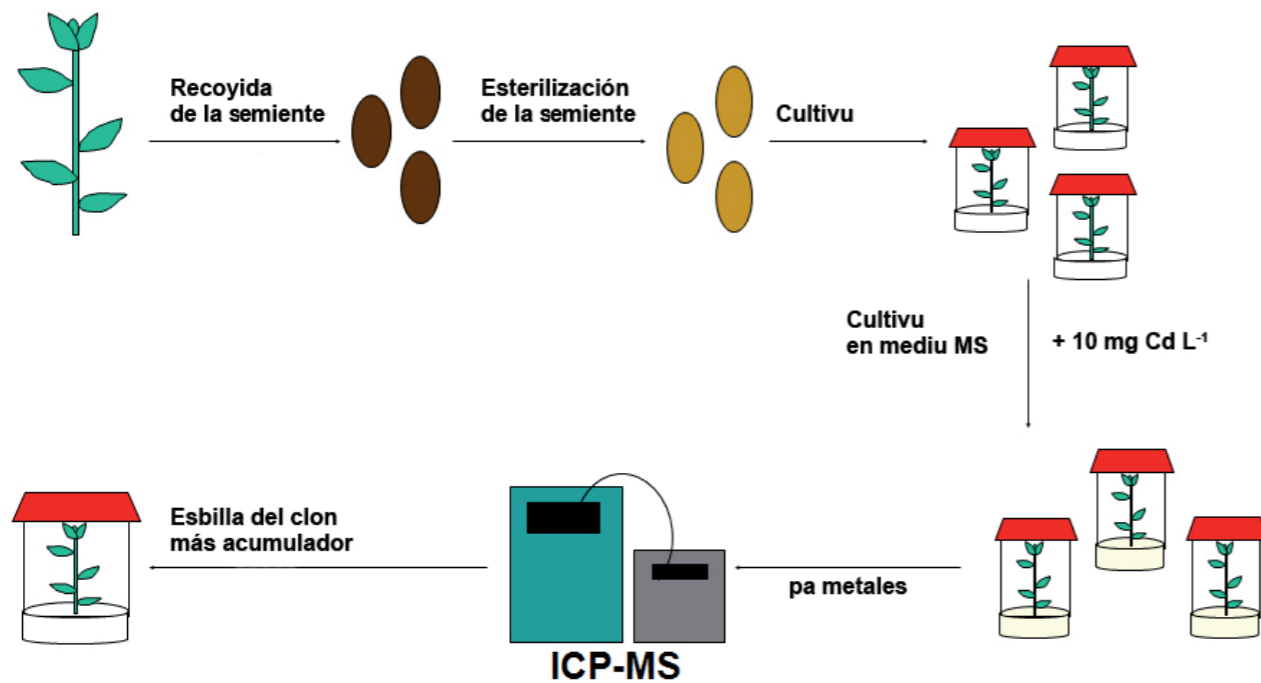
Tabla 1. Acumulamientu de dalgunes plantes usaes en fitorremediación de metal(oid)es pesaos. Les semeyes amuesen l'aspeutu de les plantes amentaes na tabla.

se desendolca un programa de fitorremediación ye la escoyeta de les plantes que se van a utilizar, yá que d'ella depende l'éxitu o'l fracasu del procesu. Cualquier planta que vaya usase na descontaminación de suelos tien de cumplir una serie de requisitos como:

- ser pa tolerar y atropar altes concentraciones de contaminantes, sobre manera na so parte aérea;
- presentar biomasa alto, xorrecimientu rápidu y un sistema radical bien desenveltu y fondu que dexen esplorar y algamar la mayor cantidá de suelu posible;
- ser fácilmente recolectables. Ye dicir, que la parte aérea pueda podase y la planta vuelva brotar de nuevo;
- potenciar güei que les plantes que s'utilicen seyan plantes autóctones, yá que se faen muncho meyor a les condiciones edafo-climátiques del lugar.

Especie vexetal	Elementu	Concentración elementu	Altor planta	Referencia
<i>Noccaea caerulescens</i> (a)	Zn Cd	40000 mg Kg ⁻¹ 18000 mg Kg ⁻¹	25-30 cm	Dinh <i>et al.</i> , 2015
<i>Pteris vittata</i> (b)	As	20000 mg Kg ⁻¹	100 cm	Ma <i>et al.</i> , 2001
<i>Dittrichia viscosa</i> (c) (olivarda)	Cd	1400 mg Kg ⁻¹	120-130 cm	Fernández <i>et al.</i> , 2008
<i>Melilotus alba</i> (d)	Pb	1200 mg Kg ⁻¹	150 cm	Fernández <i>et al.</i> , 2012
<i>Eupatorium cannabinum</i> (e)	As	58 (fueyes) 3500 (raíces)	170 -180 cm	González <i>et al.</i> , (2019)
<i>Betula celtibérica</i> (f) (abeduriu)	Zn Cd	1200 mg Kg ⁻¹ 460 mg Kg ⁻¹	12-15 m	Fdez-Fuego <i>et al.</i> , 2017 Fernández <i>et al.</i> , 2008
<i>Salix atrocinerea</i> (g) (salgueru)	As	230 (fueyes) 2400 (raíces)	10-12 m	Navazas <i>et al.</i> , 2019





ARRIBA

Figura 2. Esquema del llugru del clon más acumulador dende semiente atopao en terrenos contaminaos.

Teniendo en cuenta estos requisitos, las plantas herbales de gran porte y los árboles son, potencialmente, los que mejor funcionarían, ya que pueden tener un sistema radical bien ramificado, crecer en terrenos de poca calidad, aprovechar la madera y generar gran cantidad de biomasa, que puede fradarse desaniciando'l contaminante ensin perjudicar el terrén.

Normalmente las plantas nun pueden absorber tolos contaminantes del suelo, sinón que suelen ser específicas pa ún o dos elementos. Na Tabla 1 cítense dalgunes de les más de 400 especies descrites como acumuladores o hiperacumuladores y que podemos atopar fácilmente n'Asturies. Dalgunes d'estes plantas, a pesar de qu'atropen cantidaes bien altes de MP nun son amañoses pa usales en fitorremediación por mor del so pequeñu tamaño y biomasa. Esti ye'l casu

de *Noccaea caerulea* (enantes denominada *Thlaspi caerulea*), que s'usa fundamentalmente como planta modelu pa facer estudios d'hiperacumulación de metales pesaos. N'otros casos, las plantas presenten unos requerimientos nutricionales o ambientales que nun dexen que s'adauten a tolos terrenos, como ye'l casu de los felechos. Too ello fai que'l factor individual más importante pa llograr una fitorremediación productible seya la escoyeta de plantas que se van utilizar.

Las plantas absorben los metal(oid)es pesaos del suelo al traviés de los raigaños, pero nun tienen transportadores nin mecanismos específicos pa la so absorción sinón que se «peñeren» aprovechando que presenten propiedades químiques asemeyaes a otros elementos que sí son esenciales y pa los que la planta sí tien

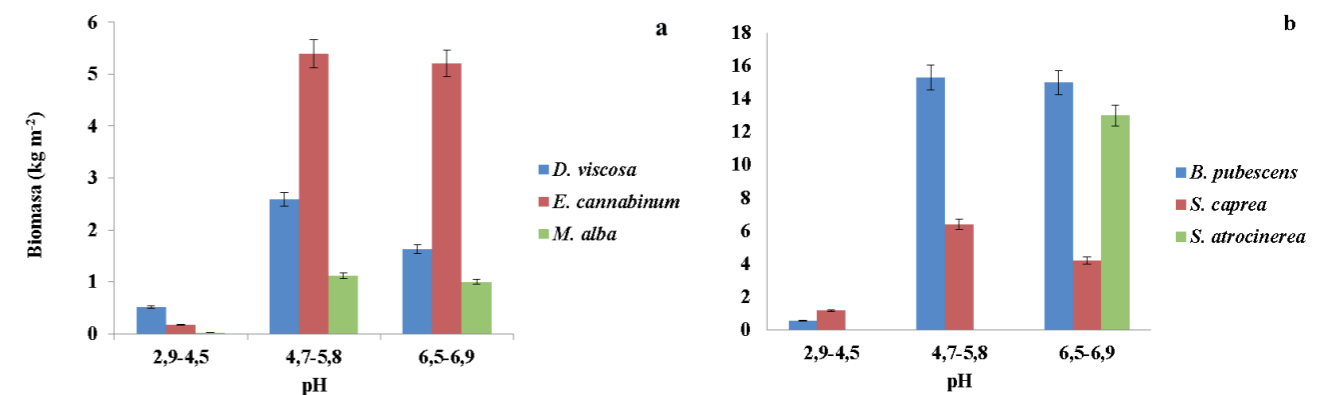
mecanismos específicos d'entrada. L'absorción d'estos MP per parte de les plantas depende de munchos factores: de les condiciones ambientales, de la especie vexetal, del desendolcu del sistema radical, del pH, de les propiedades del suelo, lo mesmo que de la forma na que s'atope'l contaminante y de la so biodisponibilidad.

Nel nuesu casu, toles plantas que s'utilizaron pa poner nes parcelas espermentales son clones escoyíos pola so alta tolerancia y acumulamentu de los distintos MP, al igual que pol so tamaño y biomasa. Na Figura 2 amuésase un esquema del procesu siguíu pa la so esbilla. Recoyóse grana de distintes plantas nos terrenos contaminaos, esterilizóse ya introduxose en cultivu *in vitro*. Cada semilla granada dio llugar a una plántula y esta tresfirióse individualmente, en condiciones estériles, a un «potín» que contenía otu mediu de cultivu. Darréu d'ello, una vegada yá crecies, cada plántula micropropagóse per independiente constituyendo la so multiplicación un clon. Pa llograr la plántula más acumuladora, tomáronse esplantos apicales que se cultivaron

en presencia de distintes concentraciones de MP (As, Cd, Pb, etc.), dexáronse xorrecer y midióse la so medría, biomasa y la cantidá de MP acumulao tanto nel raigañu como na parte aérea per aciu d'espectrometría de masas (ICP-MS). Escoyóse'l clon qu'atropaba más MP y, al empar, presentaba la mayor biomasa.

ESTRATEGIAS PA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN

Anque yá sabemos qu'hai plantas que son pa xorrecer y desenvolvese en suelos contaminaos y atopar MP nos sos texíos, haciendo posible la recuperación d'esos suelos, nos últimos años —pa incrementar y acelerar la eficiencia del procesu— ta apostándose pola combinación d'esta teunoloxía sostenible medioambientalmente, que ye la fitorremediación, con delles estrategias agronómiques y bioteunolóxiques, como l'aplicación de fertilizantes, la fradadura adicional, la densidá de plantíu, el pH del suelo, la micorrización y la bioaugmentación con bacteries. Nesti trabayu vamos desglosar dalgunes d'elles.



ARRIBA

Figura 3. Efeutu del pH del suelo sobre la biomasa de plantas herbáceas (a) y lleñosas (b).

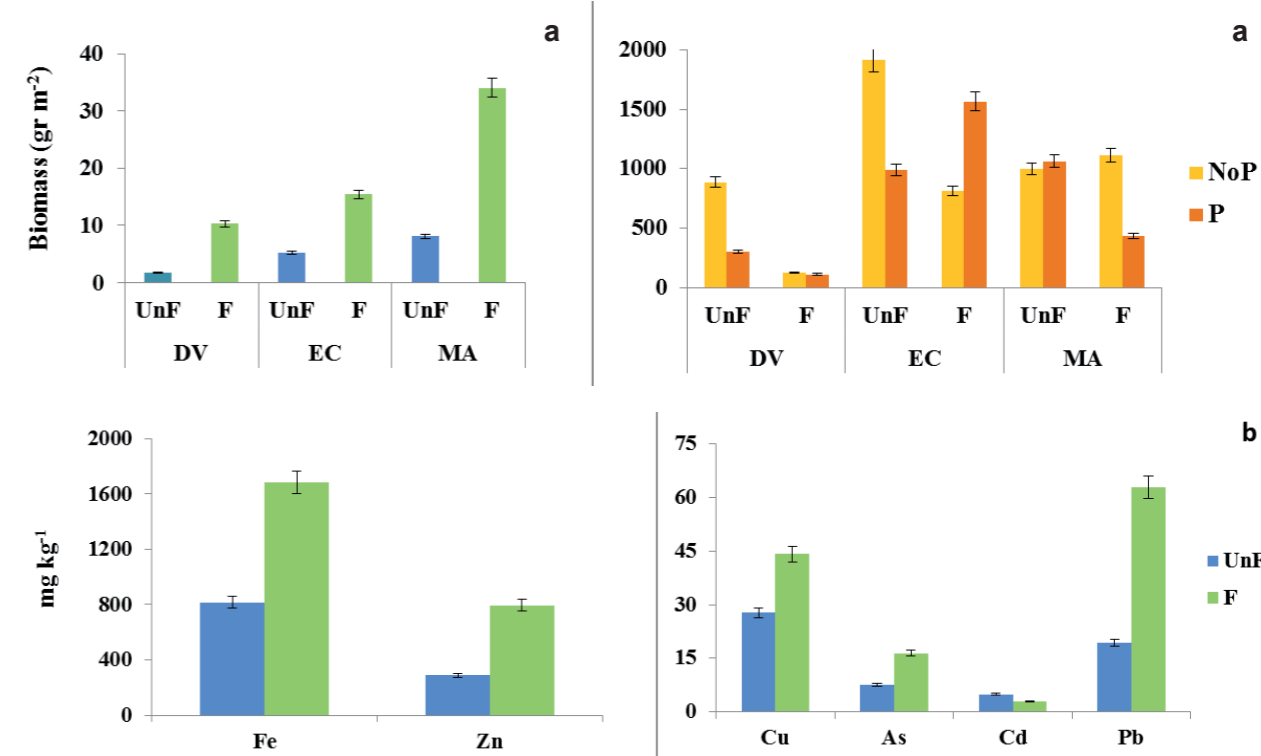
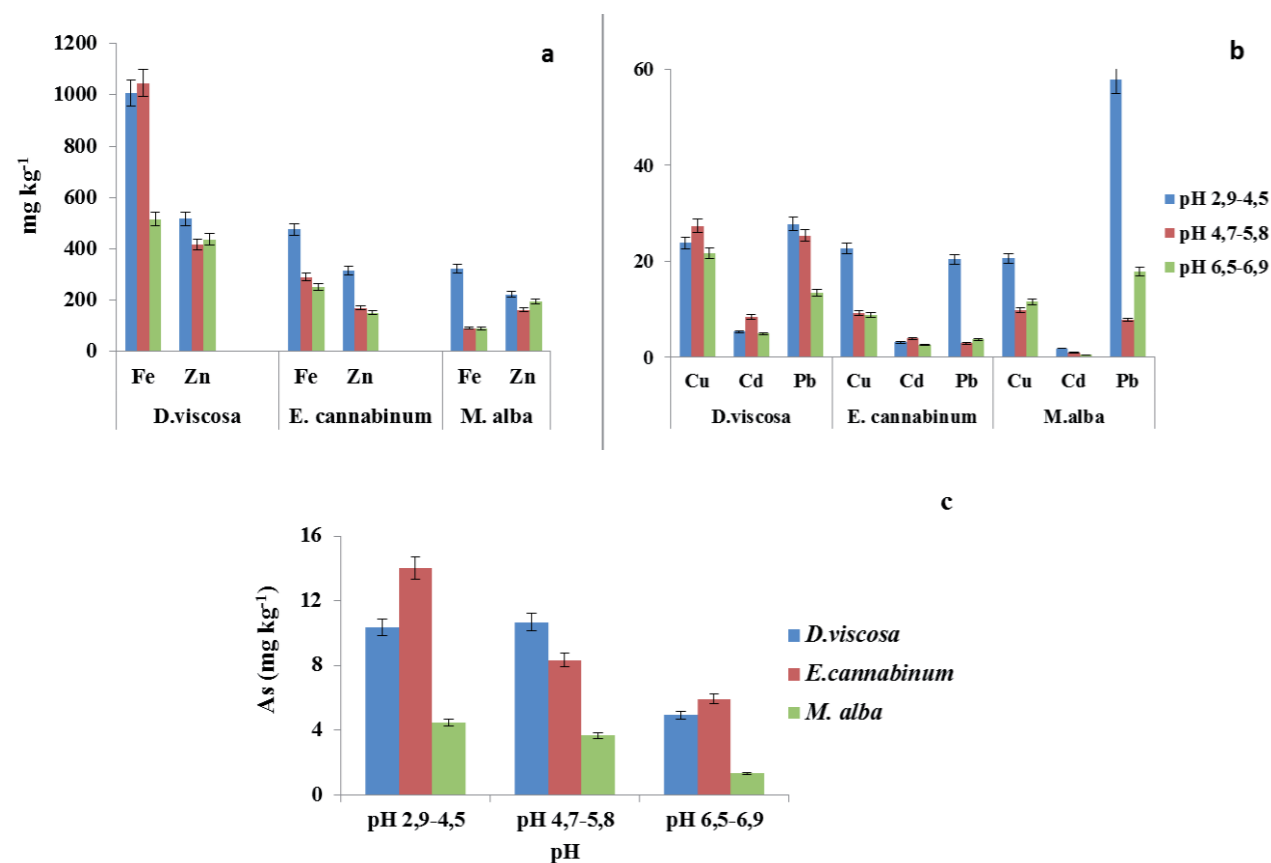
Efeutu del pH del suelu

Ensayáronse distintos valores de pH del suelu que diben dende bien ácidos (2.9) hasta próximos a la neutralidá (6.9). Los resultaos amosaron que tanto la biomasa algamao poles plantes como l'acumulamientu de MP ta mui influyíu pol pH del suelu. Los pH fuertemente ácidos inhibieron la biomasa, mentanto que los moderadamente ácidos dexaron una meyor medría tanto en plantes herbales como lleñoses (Figura 3). En rrelación cola acumulación de MP viose que cuando'l pH ye mui ácidu les plantes amuesen el mayor acumulamientu (Figura 4) pero medren menos y, poro, presenten menor biomasa (Figura 3). Nes más de les plantes analizaes viose una gradación na acumulación de MP, darréu que la concentración foi siempre más alta nel raigañu

que na parte aérea y nes fueyes. Foi mayor nes fueyes vieyes que nes nueves, lo que da una idea de la inmovilidad d'estos metales pesaos, yá que n'algamando les fueyes, pa que nun interfieran na fotosíntesis y otros procesos metabólicos, axúntense a componentes de la parede celular o almacénense nes vacuoles y, por tanto, nun se tresportaríen a les fueyes más nueves en desarrollu.

ABAXO

Figura 4. Efeutu del pH del suelu sobre l'acumulamientu de MP en fueyes d'estremaes plantes herbácees. (a) Fe y Zn; (b) Cu, Cd y Pb; (c) As.



ARRIBA

Figura 5. Efeutu de la fertilización sobre: a) la biomasa de *D. viscosa* (DV), *E. cannabinum* (EC) y *M. alba* (MA); b) l'acumulamientu de MP en fueyes de *D. viscosa*. F, plantes fertilizaes; UnF, non fertilizaes.

Los tallos, polo xeneral, atropen mui poques cantidaes de los distintos MP, yá que pueden considerase como un muérganu de tresferencia o «pasu» ente les raigones y les fueyes. D'ende qu'esta madera pueda aprovecharse como biomasa u otros usos ensin causar problemes pal medioambiente o la salú.

Efeutu de l'amestadura de fertilizantes

L'amestadura d'un fertilizante orgánicu (N:P:K) al suelu incrementó la biomasa en toles plantes ensayaes (Figura 5a). Sicasí, ye importante rescamplar qu'una única aplicación al entamu del cultivu nun ye abondo pa tener una alta tasa de medría a lo llargo del so ciclu de vida, polo que convién amestar el fertilizante dacuando en vez (cada 2 meses), yá que de lo contrario, por

mor de qu'estos suelos contaminaos son bien probes dende'l puntu de vista nutricional, les plantes amenorguen el so espoxigue y al cabu de 3 meses presenten tases de medría asemeyaes a aquelles a les que nun se-yos amestó'l fertilizante.

Tocante a los MP, vemos un aumentu nel acumulamientu de Cu, As y Pb nes plantes fertilizaes de *Ditrichia viscosa* (olivarda) (Figura 5b) al igual que tamién de Fe y Zn n'otres non reflexaes nesta figura. Estos resultaos indiquen que l'aporte de nutrientes al suelu non solo ameyora la medría de la planta, sinón qu'esti mayor xorrecimientu repercute nuna mayor absorción y acumulación de MP, lo que la asitia como una estratexa positiva pa potenciar la fitorremediación d'estos suelos degradaos polos contaminantes.

Efeutu de la micorrización

La micorrización defínese como una simbiosis mutualista ente'l raigañu de les plantes y los fungos. Numberosos trabayos demostraron que si se revexeten zones degradaes con árboles micorrizaos llógrense tases de supervivencia y desendolcu mui superior a les algamaes con árboles ensin micorrizar. Esto ye por mor de que la micorrización, y sobre manera aquella que se fai con fungos esbillaos, dexa una meyor nutrición de les plantes, yá que les hifes del fungu pueden llegar a sitios mui pequeños a los que les raíces nun podríen aportar y d'esta miente pueden esplorar una mayor cantidá de suelu, daqué que-yos dexa captar mayor númberu de nutrientes, facese meyor a les condiciones desfavorables y amenorgar la so mortalidá. Too ello redunda nuna mayor biomasa que pue aprovecharse pa otros fines.

Con estos antecedentes micorrizamos plantes d'abeduriu p'analizar el so efeutu sobre la fitorremediación. Estes plantes, procedentes de clones escoyíos *in vitro*, micorrizáronse con un fungu, *Paxillus ammoniavirescens* (Figura 6) aislao de cuerpos granibles recoyíos nos terrenos contaminaos y escoyío nel llaboratoriu pola so tolerancia y acumulamientu de MP. Les plantes consérvense en condiciones estériles per unes selmanes nuna cámara de medría con lluz y temperatura controlao y en comprobando que los abedurios taben micorrizados pasáronse a tierra y aclimatáronse a les condiciones d'ivernaderu.

Los resultaos amosaron que cuando les plantes se micorricen *in vitro* y se conserven n'ivernaderu aumenta tanto la biomasa como l'acumulamientu de Cd (Tabla 2, Figura 7). Sicasí, cuando los ensayos se fixeron direutamente nel

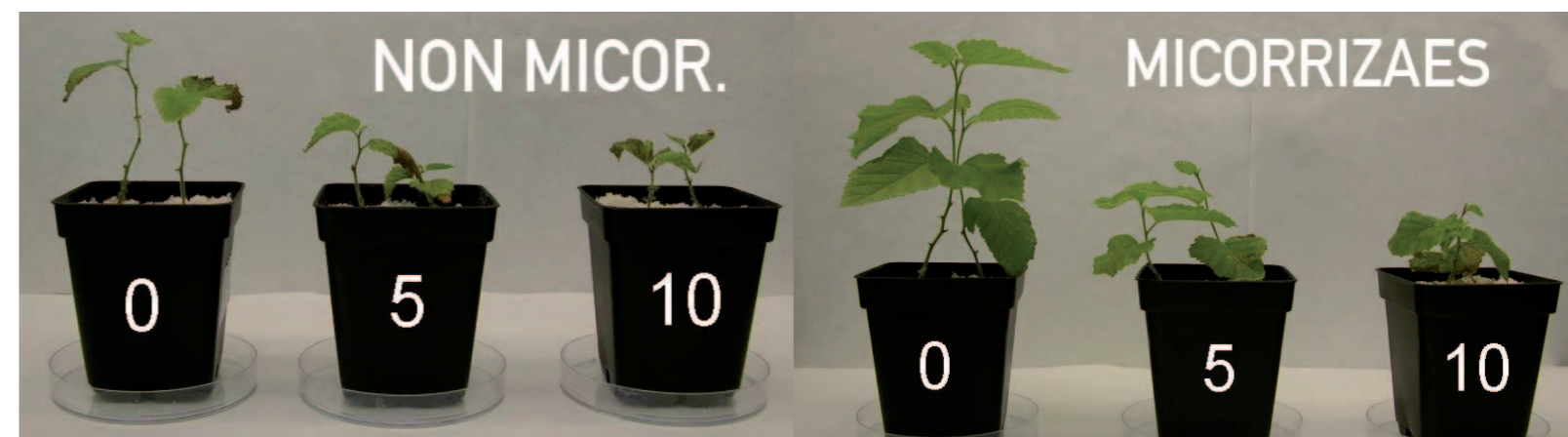


ARRIBA
Figura 6. Aspeutu del fungu *Paxillus ammoniavirescens* en campu.

ABAXO
Figura 7. Efeutu de la micorrización sobre la medría y l'acumulamientu de Cd en plantes d'abeduriu cultivaes en presencia de Cd.

[Cd]	Biomasa (mg)		Conteníu Cd (mg kg ⁻¹)		
	P. aérea	raigañu	p. aérea	raigañu	planta
M 0	240 ± 20 a	40 ± 6 a	0.34 ± 0.24 a	0.30 ± 0.03 a	0.40 ± 0.22 a
5	152 ± 10 b	28 ± 2 b	59 ± 2 b	228 ± 7 b	92.04 ± 0.2 b
10	123 ± 10 c	25 ± 3 b	162 ± 6 c	453 ± 15 c	226.8 ± 9 c
NM 0	88 ± 10 d	15 ± 3 c	0.07 ± 0.01 d	0.29 ± 0.06 a	0.10 ± 0.01 a
5	65 ± 10 d	12 ± 2 c	59 ± 6 b	220 ± 7 b	72.29 ± 7 b
10	79 ± 6 d	16 ± 2 c	99 ± 5 e	391 ± 11 d	141.12 ± 8 d

ARRIBA
Tabla 2. Biomasa y acumulamientu de Cd n'abeduriu micorrizáu (M) y non micorrizáu (NM) cultiváu n'estremaes concentraciones d'esti metal.



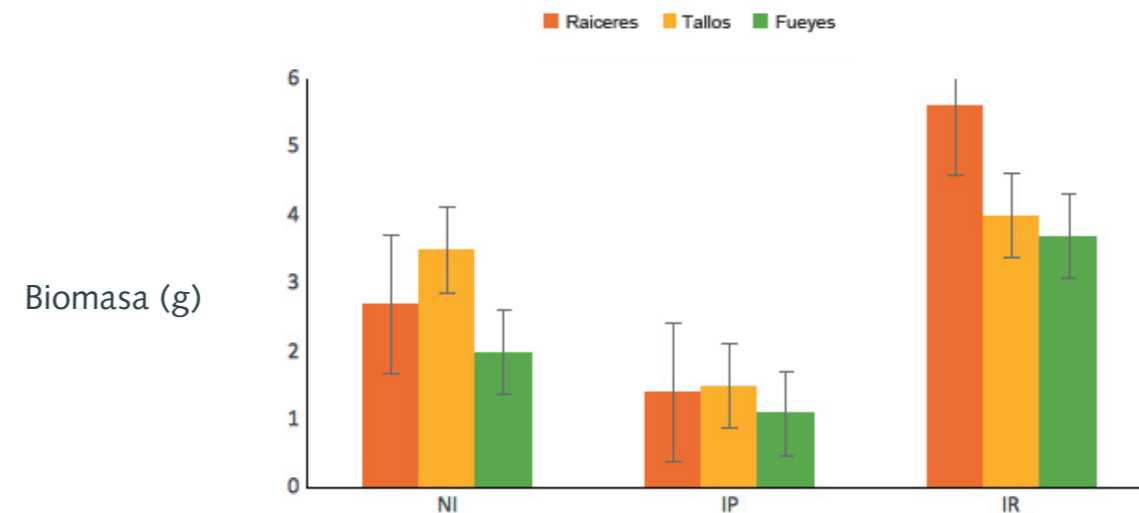


ARRIBA

Figura 8. Aspeutu d'abedurios micorrizaos (M) y non micorrizaos (NM) dempués de 3 años de cultivu nun terrén contamináu. Ha notase que nun hai diferencies en cuantes a medría y biomasa ente entrambos tratamientos.

ARRIBA DERECHA

Figura 9. Biomasa de raíces, tallos y fueyes de plantes *S. atrocinerea* non inoculaes (NI), inoculaes con *Pantoea* (IP) ya inoculaes con *R. erythropolis* (IR) dempués de 6 meses de cultivu nun terrén contamináu.



llugar contamináu viose que, al cabu de 6 meses, aumentó la medría de los abedurios, pero les plantes micorrizaes conteníen menos MP que les non micorrizaes (datos non amosaos). Esta inesperada baxada na acumulación de MP ye por cuenta de que'l fungu absorbe estos MP y atrópalos nes sos hifes, nun los tresfiriendo al raigañu de la planta. Ye una forma de protexese la planta d'estos elementos tóxicos pa que nun afeuten al so metabolismu. Esta ye tamién una de les razones poles que les plantes micorrizaes xorrecen meyor nestos terrenos degradaos pola contaminación. A más llargu plazu (3 años), vimos que tampoco nun había diferencies na biomasa ente les plantes micorrizaes y non micorrizaes (Figura 8) lo que nos llevó a pensar que posiblemente los fungos colos que se micorrizaren primero nun se conservaron a lo llargo del tiempu. Pa ello, desenterráronse los raigones, tomáronse amueses d'estes ya identificáronse los fungos que taben presentes nesi momentu per aciu de bioloxía molecular. Los resultaos amosaron que, na mayoría de los casos, *Paxillus ammoniavirescens* (que yera'l fungu col que micorrizáremos de primeres el cultivu) nun taba presente nel raigañu sinón que lu colonizaron y micorrizaron otros fungos (*Inocibe*, *Hebelona* y *Lactarius*) que movieren a *Paxillus* por ser más abondosos y tar meyor fechos a esi suelu. Sicasí, hai que sollíñar que *P. ammoniavirescens* sí taba presente naquelles plantes que taben xorreciendo en parcelas con una con-

taminación mui alto y nes qu'otros fungos, por mor de la toxicidá de los contaminantes del suelu, nun podíen abondar y micorrizar de forma natural les plantes. Por tanto, podemos rematar resaltando que la micorrización ye una estratexa útil p'ayudar al establecimientu y supervivencia de les plantes nes primeres etapes de medría nun suelu contamináu, pero que tamién se micorricen llueu de forma natural en campu polo que, sacante situaciones de llugares altamente contaminaos, nun sedría necesaria una micorrización previa en llaboratoriu.

Efeutu de la bioaugmentación con bacteries

Darréu que nos últimos años son numerosos los trabayos que destaquen el papel beneficiosu que tienen les bacteries na remediación de suelos contaminaos con hidrocarburos, analizóse'l comportamientu de plantes inoculaes y non inoculaes con bacteries recoyíes nos terrenos contaminaos y escoyíes en llaboratoriu pola so tolerancia al As y la so capacidá pa promover el xorrecimientu de les plantes. Partimos d'un clon de salgueru (*Salix atrocinerea*), escoyíu tamién pola so alta tolerancia al As, inoculáu con dos cepes bacterianes, una endófitu (*Pantoea* sp.) y otra de la rizosfera (*Rodococcus erythropolis*). Al cabu de 6 meses en campu, los resultaos amosaron que *R. erythropolis* promovió'l xorrecimientu tanto de fueyes como de raigones y tallos (Figura 9) cuando se compara coles

plantes inoculaes con *Pantoea* o non inoculaes. Sicasí, en rrellación a l'acumulación de MP, foi la inoculación con *Pantoea* cola que se llograron los meyores resultaos (Tabla 3) principalmente d'As y Pb, magar qu'hai que destacar que *R. erythropolis* tamién aumentó l'acumulamientu

al respetive de les plantes non inoculaes. Estos resultaos encnten la hipótesis de que los procesos de fitoextraición de MP pueden incrementase usando la fitorremediación asistida por bioaugmentación de bacteries.

Muérganu	Elementu	Tratamientu		
		NI	IP	IR
Raigañu	Fe	4900 ± 489a	5400 ± 238 a	2510 ± 284 b
	Cu	115 ± 40 a	182 ± 14 a	112 ± 6 b
	Zn	230 ± 28 c	382 ± 39 a	304 ± 9 b
	As	30 ± 11	75 ± 10 a	50 ± 2.5 b
	Cd	4,5 ± 0.4 c	6 ± 0.47 a	2,5 ± 0.1 b
	Hg	1,1± 0.1 b	2,2 ± 0.15 a	0.9 ± 0.1 b
	Pb	180 ± 98c	550 ± 116 a	238 ± 23 b
Fueyes	Fe	314 ± 30 c	1900 ± 503 a	605 ± 27 b
	Cu	10 ± 1.2 b	23 ± 4,2 a	12± 2.2 b
	Zn	480 ± 45 c	1155 ± 70b	1375 ± 38 a
	As	2.62 ± 0.5 c	19.64 ± 1.64 a	6.11 ± 0.40 b
	Cd	3,9 ± 0.4 c	9.13 ± 1.52 a	8.16 ± 0.69 b
	Hg	0,5 ± 0.04b	1,3 ± 0.03 a	0,7 ± 0.04 b
	Pb	8,9± 0.2 c	124± 16 a	27 ± 2.2 b

ARRIBA

Tabla 3. Acumulamientu de MP (mg kg⁻¹) en raigañu y fueyes de *S. atrocinerea* non inoculaes (NI) ya inoculaes con *Pantoea* (IP) o con *R. erythropolis* (IR) dempués de 6 meses de cultivu nun terrén contamináu.

CONCLUSIONES

Acordies con tolo dicho, podemos concluir diciendo qu'aquelles plantes acumuladores o hiperacumuladores de MP y que presenten alta biomasa son les más afayadices pa usar na descontaminación de suelos. Hai que rescampilar qu'esa biomasa producío ha recoyese y tratase amañosamente y nunca habría dexase que cayere otra vegada en suelu porque nun amenorgaríamos la contaminación. La fitorremediación ye, por tanto, una téunica segura, inocua y amigable col medioambiente, pero la so eficiencia vien determinada poles carauterístiques de la planta, d'ende la importancia d'escoyer el clon afayadizu, acordies cola biodisponibilidá del contaminante nel suelu,

colos microorganismos presentes na rizosfera, al empar que colos numerosos factores bióticos y abióticos que la arrodeen. Anguaño, p'aumentar la so eficiencia ta apostándose pola combinación d'esta téunica con otres más innovadores, como ye l'aplicación al suelu de distintos tipos d'enmiendes como biochar, o la novedosa nanoremediación, que consiste na aplicación de nanopartículas d'óxidu de grafenu (GO) o de fierro cero valente (ZVI) que demostraron, gracias a la so elevada superficie específica y reactividá, una gran efeutividá pa llograr la inmovilización de los contaminantes, magar el so efeutu sobre les plantes ta n'estudiu.

Referencies bibliográfiques

Dinh, N.T.; Vu, D.T.; Mulligan, D.; Nguyen, A.V. (2015). Accumulation and distribution of zinc in the leaves and roots of the hyperaccumulator *Noccaea caerulea*. *Environmental and Experimental Botany* 110: 85-95.

Fernández, R.; Bertrand, A.; Casares, A.; García, R.; González, A.; Tamés, R.S. (2008). Cadmium accumulation and its effect on the *in vitro* growth of woody fleabane and mycorrhized white birch. *Environmental Pollution* 152: 522-529.

Fernández, R., Bertrand, A., García, J.I., Tamés, R.S., González, A. (2012). Lead accumulation and synthesis of non-protein thiolic peptides in selected clones of *Melilotus alba* and *Melilotus officinalis*. *Environmental Experimental Botany* 78: 18-24.

Fernández-Fuego, D.; Bertrand, A.; González, A. (2017). Metal accumulation and detoxification mechanisms in mycorrhizal *Betula pubescens*. *Environmental Pollution* 231: 1153-1162.

González, H.; Fernández-Fuego, D.; Bertrand, A.; González, A. (2019). Effect of pH and citric acid on the growth, arsenic accumulation and phytochelatin synthesis in *Eupatorium cannabinum* L., a promising plant for phytostabilization. *Environmental Science and Pollution Research* 26: 26242-26253.

Ma, L.Q.; Komar, K.M.; Tu, C.; Zhang, W.H.; Cai, Y.; Kennelley, Ed. (2001). A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature* 409: 579.

Navazas, A.; Hendrix, S.; Cuypers, A.; González, A. (2019). Integrative response of arsenic uptake, speciation and detoxification by *Salix atrocinerea*. *Science of the Total Environment* 689: 422-433.

Parmar, S.; Singh, V. (2015). Phytoremediation approaches for heavy metal pollution: a review. *Journal of Plant Science Research* 2(2): 139.