

DEFINICIONES Y PROBLEMÁTICA EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA EN ASPECTOS DE FITOREMEDIACIÓN DE SUELOS

DEFINITIONS AND DIFFICULTIES IN SCIENTIFIC RESEARCH REGARDING ASPECTS OF SOIL PHYTOREMEDIATION

González-Chávez M.C.A.^{1*}; Carrillo-González R.¹; Sánchez-López A.S.¹

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, km 36.5. Carretera México-Texcoco, Texcoco Estado de México 56230.

Autor de Correspondencia: carmeng@colpos.mx

RESUMEN

Dentro de la terminología que se utiliza en la fitorremediación existen muchas expresiones ambiguas que conducen frecuentemente a la confusión en la comunidad científica sobre la interpretación, discusión, transmisión y aplicación de la información del tema, así como de la difusión de las tecnologías de fitorremediación a otros sectores de la sociedad. En el presente trabajo se intenta aclarar el uso y significado de las expresiones más comunes con la finalidad de adoptar terminología objetiva, clara, correcta y estandarizada en relación con la contaminación y fitorremediación de sitios contaminados con elementos potencialmente tóxicos, conocidos comúnmente como metales pesados.

Palabras clave: remediación, metales pesados, contaminación conceptos

ABSTRACT

Within the terminology used in phytoremediation, there are many ambiguous terms that frequently lead to confusion in the scientific community language about the interpretation, discussion, transmission and application of information about the theme, as well as the diffusion of the phytoremediation technologies to other sectors of society. In this study we attempt to clarify the use and meaning of the most common terms with the aim of adopting objective, clear, correct and standardized terminology related to contamination and phytoremediation of sites polluted with potentially toxic elements, also known commonly as heavy metals.

Keywords: remediation, heavy metals, contamination concepts.

INTRODUCCIÓN

Definiciones más pertinentes de los metales pesados

En el estudio de elementos contaminantes se han integrado varios términos que aluden al mismo concepto: metales pesados, elementos traza o elementos potencialmente tóxicos. Metales pesados es un término químico que se refiere a elementos que tienen densidad mayor de 5 g cm^{-3} . Sin embargo, en varios casos, al describir al metal pesado, no se incluyen a elementos metálicos que son tóxicos, como el aluminio, cuya densidad es de 2.6 g cm^{-3} . Tampoco incluye a metaloides, tales como el arsénico o el antimonio, los cuales no son propiamente metales, con densidad de 5.7 y 6.6 g cm^{-3} , respectivamente. Elemento traza es un término que en general se refiere a aquellos que están presentes en un medio o sistema en concentraciones muy bajas. Algo similar ocurre con el vocablo micro-elemento. En nutrición vegetal generalmente se incluye dentro de este término a los elementos que tienen función fisiológica conocida en la planta y que se requieren en bajas concentraciones para la supervivencia de ésta (Aubert y Pinta, 1977). También se les llama elementos menores o microelementos, refiriendo la cantidad en que usualmente se encuentran. En geología se refiere a los elementos en la biosfera que no se encuentran dentro de los ocho más abundantes (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg) y generalmente están presentes en concentraciones menores de 0.1 % en la corteza terrestre (Jenkins y Wyn, 1980), mientras que en contaminación ambiental el término elemento traza se refiere a los elementos presentes en pequeñas cantidades en sistemas naturales o perturbados y que su concentración disponible es suficiente para ser tóxicos para los organismos (Adriano, 2001). Otros autores proponen el uso del término: elementos potencialmente tóxicos (Carrillo-González, 2005), que incluye cualquier elemento (esencial o no), e inclusive metaloides o elementos ligeros, como el antimonio, los cuales en cierta concentración pueden causar daños a los organismos. En este documento se empleará el término elementos potencialmente tóxicos (EPT). Este trata, por tanto, de dar una definición de los contaminantes en mención, abordando criterios de toxicidad, independientemente de otras propiedades químicas o características geoquímicas. Los principales elementos contaminantes son: arsénico (As), plata (Ag), boro (B), bario (Ba), berilio (Be), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), flúor (F), mercurio (Hg), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb), selenio (Se), estaño (Sn), talio (Tl), vanadio (V) y zinc (Zn) (Adriano, 2001). Otros autores incluyen elementos

no tan comunes, como litio (Li), rubidio (Rb), cesio (Cs), estroncio (Sr), aluminio (Al), antimonio (Sb), galio (Ga), indio (Y), escandio (Sc), germanio (Ge), titanio (Ti), zirconio (Zr), bismuto (Bi), niobio (Nb), polonio (Po) y platino (Pt) (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Recientemente se han hecho revisiones del potencial contaminante y fitotóxico de otros elementos poco comunes (elementos raros), como tungsteno (W), torio (Th), cerio (Ce) (Babula *et al.*, 2008) o lantano (La) (Shan *et al.*, 2003; Lai *et al.*, 2006). Sin embargo, poco se conoce de las funciones ecofisiológicas, rutas de entrada a las plantas y criterios apropiados para definir su riesgo (van der Ent *et al.*, 2013), por lo que es necesario realizar investigaciones que ayuden a aclarar los puntos en mención. Varios de los EPT causan severos daños a los organismos del suelo y agua, así como al funcionamiento del ecosistema. Por ello, su remediación es necesaria aun cuando su concentración sea baja. A diferencia de los contaminantes orgánicos, como el dicloro difenil tricloroetano (DDT) o los plaguicidas, los EPT son inmutables; es decir, no se degradan y solo puede cambiarse su estado químico. En el suelo, la vida media de los EPT es de 150 a 500 años (Sobolov y Begonia, 2008), por lo que se dice que son virtualmente permanentes en el ambiente.

Factores de bioacumulación y translocación

Comúnmente, para la elección de especies vegetales útiles en la remediación, las variables de interés que se han utilizado son la concentración de EPT en la parte aérea y radical, y los factores de bioacumulación. De esta forma, si se opta por la fitoestabilización se recomienda que las plantas sean exclusoras de EPT (o acumulen muy bajas concentraciones) en su parte aérea. Con esto se busca que la mayor concentración de los EPT esté inmovilizada en la rizósfera (parte de influencia de la raíz) o en la raíz misma. Pero, en el caso de la fitoextracción, se sugiere que las plantas acumulen alta concentración de EPT en la parte aérea (plantas acumuladoras). Idealmente, para una extracción eficiente y económicamente reductible, las plantas deben ser hiperacumuladoras (Arthur *et al.*, 2005). Para poder clasificar a las plantas bajo este contexto, lo que se hace generalmente es determinar la concentración de EPT en la raíz y la parte aérea, así como en el suelo o residuo. A partir de esta información se pueden obtener factores de bioacumulación. Los más comunes son el factor de bioconcentración (FBC) y el de translocación (FT). El FBC es la relación de la concentración de EPT en el suelo entre la concentración en

tejido vegetal. Sin embargo, no hay acuerdo en la forma de calcularlo. Algunos autores sugieren que se tome en cuenta la concentración de EPT en la raíz (Lorestani *et al.*, 2011; Nouri *et al.*, 2011), mientras que otros —siendo la mayoría— mencionan que el FBC se calcule con la concentración en la parte aérea. Situación similar ocurre con la concentración en suelo. La mayoría de los autores emplean la concentración total, pero como es un indicador pobre de la toxicidad y riesgo de EPT, otros autores usan la concentración de EPT en la fracción disponible (Barbafieri *et al.*, 2011; Cortés-Jiménez *et al.*, 2013) o en la extraída con DTPA (Carrillo-González y González-Chávez, 2006). Con base en lo anterior se sugiere emplear la fórmula siguiente:

$$FBC = \frac{\text{Concentración de EPT en parte aérea}}{\text{Concentración de EPT disponible o extraída con DTPA en el suelo}}$$

El FT es la relación de la concentración de EPT en la parte aérea respecto a la concentración en la raíz. Si el valor de FT es menor de 1, la mayor parte del contaminante se acumula en la raíz y no se transloca (mueve) hacia la parte aérea. En este caso la planta es exclusora (Deng *et al.*, 2004). Si por el contrario el FT es mayor de 1, el contaminante se almacena principalmente en la parte aérea y no en la raíz; entonces, se trata de una planta acumuladora (Yoon *et al.*, 2006). Se menciona que cuando el FBC y el FT (ambos) son mayores de 1, la planta se clasifica como acumuladora. Si el FBC y FT son menores de 1, es una planta exclusora. Otros investigadores concluyen que el estudio de la concentración de EPT en la planta no debería ser el único factor que determine si una planta es exclusora o no (Dickinson *et al.*, 2009). En muchos casos, tal vez por confusión, acumulación e hiperacumulación se manejan como sinónimos; sin embargo, son conceptos diferentes. Como se mencionó anteriormente, las plantas hiperacumuladoras son capaces de acumular cantidades excesivas de EPT en su follaje. Erróneamente se clasifica como hiperacumuladora a aquella planta que acumula en su raíz altas concentraciones de EPT. Lo correcto es considerar la acumulación en la parte aérea de la planta. Para que se considere como tal, la acumulación de EPT en la parte aérea debe ser >1 % del peso seco de la planta (Cuadro 1) (van der Ent *et al.*, 2013).

Aunque parece sencillo aplicar los criterios de clasificación, en la realidad puede no serlo. Un intento de esquematizarlo se presenta en el Cuadro 2. Ahí se observa que cuando ambos FBC y FT, son mayores de 1, la planta es acumuladora. Si ambos valores son menores de 1 será una planta exclusora. Sin embargo, en el caso de que el FBC sea mayor de 1 y el FT menor de 1 o viceversa, ¿qué mecanismo está implicado: exclusión o estabilización?. También se menciona que con FBC mucho mayor de 1 se trata de una planta acumuladora, lo cual es una aseveración ambigua. No es lo mismo FBC de 10 que de 30; ambos son mayores de 1 y las plantas no están acumulando EPT en la misma magnitud. Retomando el ejemplo de FBC de 20, ¿dicho valor es suficiente para considerar a una planta como hiperacumuladora? Estos son cabos sueltos que permanecen en el área de investigación. Existen otros factores que pueden afectar los valores de FBC. Por ejemplo, las plantas que crecen en un suelo con deficiencia de nutrientes pueden presentar valores muy altos porque los nutrientes se absorben continuamente por ser requeridos para el metabolismo de la planta y la concentración en el suelo es muy baja, lo que resulta en alto FBC. Otros criterios que son de ayuda en el estudio de plantas con uso potencial para la fitorremediación son los umbrales de fitotoxicidad y de hiperacumulación (Cuadro 1). En el Cuadro 1 se presentaron los umbrales para algunos de los EPT más estudiados. Como ya se señaló, hay una gran cantidad de elementos que apenas comienzan a estudiarse; para estos aún no existen criterios de acumulación en plantas. Los factores de bioacumulación y los umbrales de fitotoxicidad o hiperacumulación

Cuadro 1. Criterios de clasificación de plantas de acuerdo con su concentración de EPTs en biomasa aérea.

Clasificación	Zn	Cd	Pb	Ni	Co	Cu
	mg kg ⁻¹ *					
Normal en sitios no contaminados (Alloway, 1995)	1-400	0.1-2.4	0.2-20	0.02-5	0.02-1	5-20
Fitotóxico (Vameralli <i>et al.</i> , 2010)	150-200	5-10	10-20	20-30	60-170	15-20
Hiperacumulación (Brooks, 2000)	10,000	100	1,000	1,000	1,000	1,000
Hiperacumulación Nueva propuesta (van der Ent <i>et al.</i> , 2013)	3,000	100	1,000	1,000	300	300

* Con base en peso seco

por sí solos no pueden ayudar a la determinación del comportamiento de una planta respecto a la acumulación de EPT, sino que se deben analizar en conjunto. Sin embargo, hay que mencionar que los umbrales de fitotoxicidad pueden variar y no son únicos en todas las especies vegetales.

Cabe mencionar que para evaluar la concentración de EPT es conveniente diferenciar entre suelo o residuos rizosféricos de los no rizosféricos. Las condiciones fisicoquímicas que presentan son diferentes si el material de análisis es rizosférico o no; por ejemplo, en el pH o en la concentración de EPT, por lo que el cálculo del FBC puede variar. Se recomienda tomar en cuenta los valores de suelo o residuos rizosféricos, ya que esta es el área (rizósfera) donde se llevan a cabo activamente (por la planta y microorganismos asociados) los fenómenos de absorción, precipitación y otros relacionados con los EPT (Kuiper *et al.*, 2004).

Datos de campo vs experimentos en invernadero

En la literatura existe amplia información en relación con plantas, EPT y remediación. Sin embargo, pocas investigaciones tienen bases metodológicas bien establecidas, datos experimentales robustos y que aporten conclusiones relevantes que se basen en los resultados experimentales obtenidos. En contraste, muchos artículos tienen conclusiones equivocadas porque hacen generalizaciones de experimentos cortos con suelos donde se adicionaron sales de EPT sin incubación para su estabilización; se hicieron en hidroponía, etcétera. Por ejemplo, existe investigación donde se toman hojas de una planta, estas se ponen en contacto con soluciones de ciertos EPT durante algunos minutos, se hacen análisis bioquímicos y se concluye que la planta es tolerante, que posee mecanismos de tolerancia, y se afirma que son útiles en la fitorremediación. En general, trabajos de invernadero están asociados a experimentos hidropónicos. En muchas ocasiones la solución nutritiva que se usa tiene concentraciones excesivas del elemento estudiado que no reflejan lo que sucede en el suelo, por lo que la absorción de EPT es forzada o inducida, lo que no corresponde al comportamiento real de la planta (van der Ent *et al.*, 2013). Generalmente, en estos experimentos, a las soluciones nutritivas se les adi-

ciona solo un EPT en dosis creciente; la interacción de dos o más EPT se estudia poco, mientras que en condiciones naturales simultáneamente se encuentran varios elementos contaminantes. Los reportes adolecen de considerar la interacción química de cationes y aniones, y la actividad real de los iones en la solución del suelo. Situación similar sucede con suelos contaminados artificialmente (Dickinson *et al.*, 2009). Si se realizan experimentos de invernadero es recomendable usar re-

siduos o suelos naturales o incubados adecuadamente (van der Ent *et al.*, 2013). Otra situación que puede ser problemática en experimentos hidropónicos o de adición de contaminantes al suelo es que no se tiene entendimiento claro de las reacciones probables con otros iones presentes (Adriano *et*

al., 2004), ni con otros componentes del suelo, lo que determina la forma química en que se encontrarán los contaminantes, ya sea en la fracción líquida del mismo (especiación química) o en la forma en que están distribuidos en la parte sólida del suelo (fraccionamiento). Probablemente el EPT estudiado reaccione y se forme una especie química no asimilable por la planta. De este modo, se pueden adicionar cantidades altas y reportar que la planta es tolerante, llegando a conclusiones que no corresponden a la realidad. En este tipo de experimentos es necesario realizar estudios que determinen la especiación y el fraccionamiento de EPT, después de la adición artificial de los contaminantes, para así determinar con precisión las condiciones disponibles de toxicidad a las que está expuesta la planta. Asimismo, la evaluación del efecto a los EPT suele realizarse en un punto específico del desarrollo de la planta y no se reporta el comportamiento durante su ciclo completo, por lo que no se obtiene referencia clara y completa de la capacidad que tienen las especies vegetales estudiadas para sobrevivir en ambientes contaminados a nivel de especie. Con las explicaciones anteriores no se menciona que las investigaciones llevadas a cabo en condiciones artificiales no sean válidas. Solo hay que tener cautela en la interpretación y extrapolación de los resultados, así como de las conclusiones a las que se llegan. Se prefiere la confirmación experimental usando suelos contaminados que los estudios con hidroponía. De igual manera, los suelos con adición de sales de EPT difícilmente reflejan los enriquecidos con EPT, ya sea

Cuadro 2. Criterios de clasificación de plantas por su comportamiento en la acumulación de EPT basados en el factor de translocación (FT) y el factor de bioacumulación (FB).

		FBC	
		>1	<1
FT	>1	Acumuladora (>1 hiperacumuladora)	-
	<1	-	Exclusora

en forma natural o por contaminación inducida por el hombre.

CONCLUSIONES

Existe el uso inadecuado de varios términos utilizados en la fitorremediación. Por ello, el uso de terminología estandarizada y conceptos claros es fundamental para la comunicación correcta de ideas y propuestas objetivas dentro de la comunidad científica, aún más importante al momento de transferir las tecnologías a sitios contaminados en campo para el éxito de los proyectos de fitorremediación.

LITERATURA CITADA

- Adriano D.C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. (2° ed). Springer Verlag. USA. 866 p.
- Arthur E.L., Rice P.J., Rice P.J., Anderson T.A., Baladi S.M., Henderson K.L., Coats J.R. 2005. Phytoremediation: an overview. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24: 109-122.
- Aubert H., Pinta M. 1977. Trace elements in soils. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. The Netherlands. 395 p.
- Babula P., Adam V., Opatrilova R., Zehnalek J., Havel L., Kizek R. 2008. Uncommon heavy metals, metalloids and their plant toxicity: A review. *Environmental Chemistry Letters* 6: 189-213.
- Barbafieri M., Dadea C., Tassi E., Bretzel F., Fanfani L. 2011. Uptake of heavy metals by native species growing in a mining area in Sardinia, Italy: discovering native flora for phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation* 13: 985-997.
- Carrillo-González R. 2005. Niveles de contaminación de los suelos y las plantas. In: González-Chávez M.C.A., Pérez-Moreno J., Carrillo-González R. (eds.). *El Sistema Planta-Microorganismo-Suelo en Áreas Contaminadas con Residuos De Minas*. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. p: 34-60.
- Cortés-Jiménez E.V., Múgica-Álvarez V., González-Chávez M.C.A., Carrillo-González R., Gordillo M.M., Mier M.V. 2013. Natural revegetation of alkaline tailing heaps at Taxco, Guerrero, Mexico. *International Journal of Phytoremediation* 15: 127-141.
- Carrillo-González R., González-Chávez M.C.A. 2006. Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes. *Environmental Pollution* 144: 84-92.
- Deng H., Ye Z.H., Wong M.H., 2004. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China. *Environmental Pollution* 132: 29-40.
- Dickinson N.M., Baker A.J.M., Doronila A., Laidlaw S., Reeves R.D. 2009. Phytoremediation of inorganics: realism and synergies. *International Journal of Phytoremediation* 11: 97-114.
- Jenkins D.A., Wyn G. 1980. Trace elements in rocks, soils, plants and animals: Introduction. In: Davies B.E. (ed.). *Applied Soil Trace Elements*. John Wiley & Sons. Avon, Great Britain. pp. 1-20.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. 2001. *Trace Elements in Soils and Plants*. (3° ed). CRC Press. Boca, USA. 432 p.
- Kuiper I., Lagendijk E.L., Bloemberg G.V., Lugtenberg B.J. 2004. Rhizoremediation: A beneficial plant-microbe interaction. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 17: 6-15.
- Li H.Y., Wei D.Q., Shen M., Zhou Z.P. 2012. Endophytes and their role in phytoremediation. *Fungal Diversity* 54: 11-18.
- Lorestani B., Cheraghi M., Yousefi N. 2011. Phytoremediation potential of native plants growing on a heavy metals contaminated soil of copper mine in Iran. *World Academic Science Engineering and Technology* 77: 377-382.
- Nouri J., Lorestani B., Yousefi N., Khorasani N., Hasani A.H., Seif F., Cheraghi M. 2011. Phytoremediation potential of native plants grown in the vicinity of Ahangaran lead-zinc mine (Hamedan, Iran). *Environmental Earth Sciences* 62: 639-644.
- Sobolev D., Begonia M.F.T., 2008. Effects of heavy metal contamination upon soil microbes: lead induced changes in general and denitrifying microbial communities as evidenced by molecular markers. *International Journal of Environmental Research Public Health* 5: 451-460.
- Shan X.Q., Wang H.O., Zhang S.Z., Zhou H.F., Zheng Y., Yu H., Wen B. 2003. Accumulation and uptake of light rare earth elements in a hyperaccumulator *Dicranopteris dichotoma*. *Plant Science* 165: 1343-1353.
- Vamerali T., Bandiera M., Mosca G., 2010. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environmental Chemistry Letters* 8: 1-17.
- van der Ent A., Baker A.J.M., Reeves R.D., Pollard A.J., Schat H. 2013. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fictions. *Plant and Soil* 362: 319-334.
- Yoon J., Cao X., Zhou Q., Ma L.Q. 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment* 368: 456-464.