



## Bioestimulación de suelo impactado con 45000 ppm de aceite residual automotriz y Fitorremediación con *Zea mays* y *Burkholderia cepacia* y/o *Rhizobium etli*

## Biostimulation of soil impacted by 45000 ppm waste motor oil and Phytoremediation with *Zea mays* by *Burkholderia cepacia* and *Rhizobium etli*

Saucedo-Martínez Blanca Celeste<sup>1</sup>, Montaño-Arias Noé Manuel<sup>2</sup>, Márquez-Benavides Liliana<sup>3</sup>, Sánchez-Yáñez Juan Manuel<sup>1\*</sup>

### Datos del Artículo

<sup>1</sup>Microbiología Ambiental, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mujica S/N, Col. Felicitas del Río, CP 58000, Morelia, Michoacán, México.

<sup>2</sup>Área Botánica, Departamento de Biología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa 09340, Ciudad de México, México.

<sup>3</sup>Manejo de Residuos Sólidos y Medio Ambiente Ed B-3, Instituto de Investigaciones Agrícolas Pecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Fco J. Mujica S/N, Col. Felicitas del Río, CP 58000, Morelia, Mich.

#### \*Dirección de contacto:

Laboratorio de Microbiología Ambiental del Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas (IIQB) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Edif. B-3 Ciudad Universitaria, Av. Francisco J. Mujica S/N Col. Felicitas del Río, Morelia, Mich., 58040 México.

Tel. +52 (443) 3223500 ext. 4240.

Juan Manuel Sánchez-Yáñez  
E-mail address: [sysanez@umich.mx](mailto:sysanez@umich.mx)

### Palabras clave:

Suelo,  
abonos,  
*Zea mays*,  
bacterias promotoras crecimiento  
vegetal.

***J. Selva Andina Res. Soc.***  
**2016; 7(2):86-94.**

### Historial del artículo.

Recibido enero, 2016.  
Devuelto mayo 2016.  
Aceptado julio, 2016.  
Disponible en línea, agosto, 2016.

### Resumen

El suelo contaminado con 45000 ppm de aceite residual automotriz (ARA), es una relativa alta concentración de una mezcla de HC alifáticos y aromáticos que inhiben la mineralización de la materia orgánica y disminuyen la fertilidad. Esta concentración es alta acorde con la regulación mexicana: NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 (NOM-138) porque supera los 4400 ppm/Kg de suelo, que es límite máximo permitido en ese ambiente. Los objetivos de este trabajo fueron i) Bioestimulación (BS) de suelo contaminado con 45000 ppm de ARA con lombricomposta y composta bovina al 3 %; ii) Fitorremediación (FR) con *Zea mays* potenciada con *Burkholderia cepacia* y *Rhizobium etli* y reducción de la concentración de ARA, a valor inferior al máximo aceptado por la NOM-138. El suelo con 45000 ppm de ARA la BS con lombricomposta y composta bovina al 3 %; con la variable-respuesta concentración inicial y final del ARA de la BS. Luego la FR mediante *Z. mays* potenciado con *B. cepacia* y *R. etli* géneros de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV), se usaron la fenología: altura de la planta y longitud de la raíz, y la biomasa: peso fresco aéreo y peso seco aéreo y radical. Los datos experimentales se analizaron por ANOVA y Tukey. Los resultados mostraron que la BS de suelo con 45000 ppm de ARA, lo disminuyó a 21000 ppm; por la FR mediante *Z. mays* inoculado con *B. cepacia*/*R. etli* lo redujeron a 1822.5 ppm; valor inferior al máximo aceptado por la NOM-138. Se concluye que la BS suelo contaminado por una relativa elevada concentración de ARA y ulterior FR por *Z. mays* y los géneros de BPCV son una alternativa ecológica de remediación, mejor que la aplicación individual de cada una.

© 2016. Journal of the Selva Andina Research Society. Bolivia. Todos los derechos reservados.

### Abstract

Soil contaminated with 45000 ppm of waste motor oil (WMO) is a relatively high concentration of a mixture of aliphatic and aromatic hydrocarbons (HC), inhibits mineralization of organic matter and its fertility. This WMO' concentration is high according to mexican regulation: NOM-138-SEMARNAT/ SSA1-2012 (NOM-138) related to when it exceeds 4400 ppm/Kg of soil. The aims of the study were: i) BS of contaminated soil by 45000 ppm of WMO with vermicompost and bovine compost 3%, and ii) PR using *Zea mays* inoculated with *B. cepacia* and *R. etli* at value below the maximum allowable by NOM-138. The main response variable of the trial was initial and final concentration of WMO after BS. In PR by *Z. mays* and PGPB to reduce remaining WMO, were phenological response variables as: plant height and root

length and biomass: aerial and root fresh and dry weight. Experimental data were analyzed by ANOVA and Tukey. Results showed that the BS of soil by 45000 ppm of WMO was reduced to 21000 ppm; subsequent FR sowing *Z. mays* inoculated by *B. cepacia* decreased to 1822.5 ppm, value below the maximum allowable by NOM-138. BS of contaminated soil by relatively high concentration of WMO and later FR sowing *Z. mays* and PGPR. Both are an alternative in its remediation that to apply each one alone.

© 2016. Journal of the Selva Andina Research Society. Bolivia. All rights reserved.

## Introducción

La contaminación del suelo por hidrocarburos (HC) provenientes del petróleo, como el aceite residual automotriz (ARA) una mezcla de moléculas insolubles de HC alifáticos, aromáticos, y algunos policíclicos. El ARA es considerado un residuo peligroso según las regulaciones mexicanas como la; Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental (LGEEPA), siendo un problema de contaminación en el mundo y México. El ARA por la inadecuada disposición final causa un impacto ambiental negativo, cuando es vertido en ese ambiente (Izinyon & Seghosime 2013). En el suelo el ARA por su propiedad química de insolubilidad, forma en la superficie una película impermeable que impide el intercambio gaseoso e inhibe los ciclos biogeoquímicos que sustentan la vida y la producción agrícola (Pardo *et al.* 2004). Una opción ecológica de solución al problema es la bioestimulación (BS) de suelo contaminado con hidrocarburos (HC) del petróleo con minerales esenciales que lo enriquecen e induce a la microbiota autóctona a su mineralización (Maldonado-Chávez *et al.* 2010), y la posterior fitorremediación (FR) de ese suelo para reducir el ARA remanente, a un nivel menor a la concentración máxima aceptada por norma oficial mexicana NOM-138-SEMAR NAT/SSA1-2012 (NOM-138); mediante la inoculación de *Zea mays* con *Burkholderia cepacia* y *Rhizobium etli* ambos géneros de bacterias promotoras de crecimiento vegetal-

(BPCV); capaces de convertir los exudados radicales en sustancias promotoras de crecimiento vegetal (SPCV), y que además oxidan algunos HC alifáticos y/o aromáticos del ARA (González-Paredes *et al.* 2013).

En suelo la NOM-138 establece los límites máximos permisibles de las diversas fracciones de HC para señalar si existe o no contaminación, así de la ligera es de 200 ppm, de la mediana de 1200 ppm y de la pesada 3000 ppm en total 4400 ppm. Investigaciones en suelo contaminado por derivados del petróleo análogos al ARA, reportan que la BS y FR aplicadas independiente han sido insuficientes en la concentración a valor inferior al máximo permisible según la NOM-138 e incluso cuando la FR se basa en un planta tolerante a la acción fitotóxicas de los HC del ARA a los encontrados en el ARA (Larenas-Parada & De Viana 2005), A pesar de que la FR puede ser mejorada con BPCV de la rizosfera por su capacidad de oxidar HC (Maldonado-Chávez *et al.* 2010). Mientras que existen pocos o ningún reporte sobre la BS de un suelo contaminado con 45000 ppm una concentración relativamente alta de ARA que en combinación con la FR ya sido potenciada con BPCV, y que lo hayan reducido a un valor por debajo del máximo establecido por la NOM-138.

En general la literatura relacionada con la remediación de suelo contaminado con mezclas de HC similares al ARA. Normalmente no hacen mención a

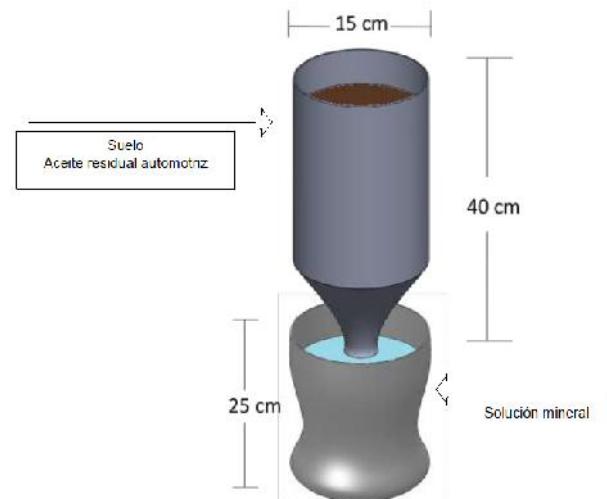
ninguna norma ambiental local, nacional o internacional utilizada como referencia, que demuestre que el problema se solucionó: tal como lo reportan Larenas-Parada & De Viana (2005), que aplicaron la FR en un suelo impactado con 55000 ppm de HC de petróleo con *Tithonia tubaeformi*. Los resultados revelaron que *T. tubeformi* los decreció a 26950 ppm, valor insuficiente para su remediación de acuerdo con la máxima concentración aceptada por la NOM-138M. Mientras que Sangrabriel *et al.* (2006) fitorremediaron un suelo con 50000 ppm de combustóleo, con tres gramíneas: *Brachiaria híbrido*, *Brachiaria brizantha* y *Panicum maximum* y tres leguminosas: *Clitoria ternatea*, *Phaseolus coccineus*, *Cicer arietinum*. Los resultados indicaron que después de 90 días la FR con el *B. híbrido* lo disminuyó a 16935 ppm, en tanto que *P. maximum* a 15195 ppm, mientras que *P. coccineus* hasta 19455 ppm. En este suelo todos estos valores de concentración del combustóleo remanente, fueron superiores al límite máximo permitido por la NOM-138. En contraste con la información sobre suelo impactado con mezclas de HC y que lograron decrecerlo a una concentración inferior a la máxima aceptada por la NOM-138; como el reporte de Ferrera-Cerrato *et al.* (2007) que evaluaron la FR de suelo contaminado con 50000 ppm de combustóleo, mediante *P. coccineus* y fertilización inorgánica. Los resultados mostraron que la FR con *P. coccineus* lo disminuyó a 3467 ppm del combustóleo, cantidad menor a la máxima permisible indicada por la NOM-138. Con base a lo anterior y por la escasa información sobre la BS de suelo con una concentración relativamente alta de ARA y en especial de la FR con una gramínea inoculada con géneros de BPCV. Los objetivos de este trabajo fueron: i) la bioestimulación de un suelo contaminado con 45000 ppm de ARA con lombricomposta y composta bovina al 3 %, y ii)

fitorremediación mediante *Zea mays* inoculado con *Burkholderia cepacia* y *Rhizobium etli* para reducir el ARA a concentración menor a la máxima permisible según la NOM-138.

## Materiales y métodos

El experimento se realizó en invernadero donde las condiciones microclimáticos promedio fueron: temperatura de 23.2 °C, luminosidad de 450  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  y humedad relativa de 67 %. En este ensayo se usó suelo ubicado a los 19° 39' 27" de latitud norte 100° 19' 59" de longitud oeste, con una altitud de 1820 msnm, clima templado en un terreno agrícola denominado "La cajita" de la Tenencia Zapata del municipio de Morelia, Mich, México sobre el km 5 de la carretera Morelia-Pátzcuaro, México.

**Figura 1 Diagrama de la jarra de Leonard (tomado de García-González *et al.* 2005)**



El suelo se clasificó como laterítico de textura franca arenosa, pobre en materia orgánica con 1.5 %, N orgánico de 39  $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  y de pH 6.7 ligeramente ácido. Para evitar el problema de plagas y enfermedades el suelo se solarizó a 70 °C/48 h, posterior-

mente se tamizó con una malla del No. 20 y contaminó con 45000 ppm de ARA proveniente de un taller mecánico automotriz de Morelia, Mich, México. El ARA se solubilizó con un detergente comercial al 0.1% (p/v). Entonces un 1 kg suelo de ese se colocó en la parte superior de la jarra de Leonard (Figura 1) y en la inferior una solución mineral (SM) (García-González *et al.* 2005).

El experimento se dividió en i) BS con lombricomposta (LC) y composta bovina (CB) al 3 %, con base a la composición química mostrada en la Tabla 1, ii) la FR de este suelo con ARA, mediante *Z. mays* potenciado con *B. cepacia* y *R. etli*, según el diseño experimental de bloques al azar con 7 tratamientos y 6 repeticiones indicados en la Tabla 2: el suelo sin ARA irrigado solo con agua o control absoluto (CA): este suelo con ARA no bioestimulado, ni fitorremediado o control negativo (CN); el suelo bioestimulado con LC y CB, luego mediante FR con *Z. mays* potenciado con *B. cepacia* y *R. etli*.

**Tabla 1 Composición química de los abonos usados en la bioestimulación de suelo contaminado con 45000 ppm de aceite residual automotriz**

Elemento/compuesto	Lombricomposta	Composta
C (%)	18.57	14.91
N-total (%)	2.24	2.20
Relación C-N	8.13	7.05
N-NO <sub>3</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	532	769.00
P (%)	0.12	0.14
K (%)	0.79	0.22
Ca (%)	1.33	0.95
Mg (%)	1.21	0.84
Na (%)	0.12	0.26
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	357.00	367.00
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	91.00	86.00
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	196.00	213.00
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	38.00	41.00
pH	6.00	7.42

SAGARPA 2007, Olivares-Campos 2010

En la primera fase se realizó la BS del suelo con 45000 ppm de ARA por la LC y la CB al 3 % /7 semanas, ahí en el suelo la humedad se ajustó al 80

% de la capacidad de campo. La principal variable respuesta del experimento fue la concentración de ARA por Soxhlet al inicio y final de la BS y la FR. En el suelo con 45000 ppm de ARA bioestimulado con la LC y la CB, donde hubo la mayor reducción de esta mezcla de HC, se fitorremedió por *Z. mays* con la combinación *R. etli* y *B. cepacia* o individualmente para decrecer el ARA a un nivel inferior al máximo permisible aceptado por la NOM-1381. Durante la FR del suelo con *Z. mays*, está alimentada con una solución mineral (SM): (g/L): NH<sub>4</sub>Cl 12.0, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3.0, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 3.5, MgSO<sub>4</sub> 1.5, CaCl<sub>2</sub> 0.1, FeSO<sub>4</sub> 0.5mL y una solución de oligoelementos, 1.5 mL/L, el pH se ajustó a 6.4-6.7 (Leal-Castillo 2003). Mientras que variables respuestas de la FR del suelo con ARA, mediante *Z. mays* fueron: el porcentaje de germinación a los 11 días; la fenología a nivel de plántula, floración y madurez fisiológica. En ese caso midió la altura de la planta (AP); la longitud de la raíz. (LR) y biomasa aérea y radical: peso fresco (PF) total y peso seco (PS) total del *Z. mays* (Amador & Boshchini 2000). La FR del suelo en cada estadio fisiológico de *Z. mays*, se comparó con el crecimiento de la misma gramínea en suelo sin ARA irrigado solo con agua (CA); así como con *Z. mays* cultivado en suelo sin ARA, alimentado con la SM, sin las BPCV o control relativo (CR). Los datos experimentales fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) por la prueba comparativa de medias de Tukey HSD P<0.05 % (Walpole & Myers 2007).

## Resultados

*Bioestimulación de suelo contaminado con 45000 ppm de aceite residual automotriz con lombricomposta, composta bovina y combinación de ambas.*

En la Tabla 2 muestran la BS del suelo con 45000 ppm de ARA con la LC y la CB ahí la combinación de ambos, lo redujo a 21000 ppm en 7 semanas. En el mismo suelo con ARA bioestimulado con la CB, lo decreció a 31000 ppm. En ese suelo bioestimula-

do solo con la LC, se disminuyó a 33700 ppm. Estos valores fueron estadísticamente diferentes comparados con el mismo suelo con los 45000 pm de ARA sin BS (CN), en donde la atenuación natural no cambio la concentración del ARA.

**Tabla 2 En suelo, concentración de aceite residual automotriz remanente de la bioestimulación con lombricomposta, composta bovina y la mezcla de ambas**

Suelo + 45000 ppm de aceite residual automotriz sin bioestimular (Control Negativo)	Concentración de aceite residual automotriz en suelo después de 7 semanas de bioestimulación con lombricomposta, composta bovina y ambas (ppm)
lombricomposta 3%	44900 <sup>d*</sup>
composta bovina 3%	33700 <sup>c</sup>
Lombricomposta/composta bovina (3%)	31000 <sup>b</sup>
	21000 <sup>a</sup>

\*Tukey (0.025)=: Letras iguales = sin diferencia estadística.

*Fitorremediación de un suelo contaminado con 21000 ppm de ARA remanente de la bioestimulación o biorremediación.* En la Tabla 3 se muestran la BS de suelo con 45000 ppm de ARA con la mezcla de la LC y la CB por 2 meses, seguida de la FR mediante *Z. mays* potenciado con las BPCV a madurez fisiológica, con una AP de 128.5 cm en el suelo sin ARA (CR), valor superior a lo registrado en *Z. mays* de 85.3 cm en el suelo con ARA, bioestimulado con la combinación de LC/CB y fitorremediado mediante *Z. mays* con *R. etli* Mientras *Z. mays* registro 81.7 cm de AP en suelo con ARA bioestimulado con la CB, después con la LC, y fitorremedió mediante *Z.*

*mays* con *B. cepacia* y *R. etli*. Mientras que *Z. mays* tuvo una LR de 61.3 cm, en suelo con 21000 de ARA, bioestimulado con la LC y la CB, luego fitorremediado por *Z. mays* con *B. cepacia*, este valor numérico fue estadísticamente diferente a los 27.3 cm de LR del *Z. mays* cultivado en suelo sin ARA o (CR) con un PFA de 91.65 g, ambos valores fueron estadísticamente diferentes, a los 27.41 g de PFA de *Z. mays* con *B. cepacia* y *R. etli*. Mientras *Z. mays* tuvo 19.6 g de PFA en suelo con ARA bioestimulado simultáneamente con ambos abonos (CB y LC), luego fitorremediado por *Z. mays* con *R. etli* registró (Tabla 3).

**Tabla 3 Fenología y biomasa de *Zea mays* potenciado con *Burkholderia cepacia* y *Rhizobium etli* en la fitorremediación de suelo contaminado con 21000 ppm de aceite residual automotriz derivado de la bioestimulación (biorremediación)**

Suelo con <i>Zea mays</i>	Altura de planta (cm)	Longitud radical (cm)	Peso fresco (g)		Peso seco (g)	
			aéreo	radical	aéreo	radical
Sin ARA (Control Absoluto)	122.68 <sup>**</sup>	21.7 <sup>c</sup>	88.56 <sup>a</sup>	61.78 <sup>a</sup>	14.64 <sup>a</sup>	12.65 <sup>a</sup>
Sin ARA alimentado con solución mineral (Control Relativo)	128.5 <sup>a</sup>	27.3 <sup>b</sup>	91.65 <sup>**</sup>	64.85 <sup>a</sup>	15.47 <sup>a</sup>	15.90 <sup>a</sup>
**21000 ppm de ARA + lombricomposta + composta bovina + <i>Burkholderia cepacia</i> + <i>Rhizobium etli</i>	81.7 <sup>b</sup>	26.1 <sup>b</sup>	27.41 <sup>b</sup>	17.95 <sup>b</sup>	4.52 <sup>b</sup>	2.31 <sup>b</sup>
21000 ppm de ARA + lombricomposta + composta bovina + <i>R. etli</i>	85.3 <sup>b</sup>	25.3 <sup>b</sup>	19.60 <sup>c</sup>	14.95 <sup>c</sup>	3.52 <sup>c</sup>	2.45 <sup>c</sup>
21000 ppm de ARA + lombricomposta + composta bovina + <i>B. cepacia</i>	31.5 <sup>c</sup>	61.3 <sup>a</sup>	10.95 <sup>d</sup>	8.13 <sup>d</sup>	2.05 <sup>d</sup>	1.71 <sup>d</sup>

\*Tukey (0.025)=: Letras iguales = no existe diferencia estadística. \*\*ARA remanente de la bioestimulación

En tanto que *Z. mays* tuvo 17.95 g de PFR, en suelo con ARA bioestimulado con la mezcla de abonos y fitorremediado mediante *Z. mays* con *B. cepacia* y *R. etli*, este valor con diferencia estadística comparado con *Z. mays* registro 14.95 g del PFR inoculado con *R. etli* para fitorremediar el suelo previamente bioestimulado con ambos abonos. Mientras que *Z. mays* registró un PSA de 15.47 g cultivado en suelo sin ARA (CR), un valor con diferencia estadísticamente a *Z. mays* con 4.52 g de PSA inoculado con *R. etli* y *B. cepacia*. En comparación en *Z. mays* tuvo 2.05 g de PSA inoculado con *B. cepacia*, valor estadísticamente diferente a *Z. mays* que alcanzó 2.45 g de PSA con *R. etli*, estos valores tuvieron diferencia estadística; en comparación con *Z. mays* que registró 2.31 g de PSR inoculado con *B. cepacia* y *R. etli*, este valor fue estadísticamente diferente a *Z. mays* con 12.65 g de PSR cultivado en suelo sin ARA, irrigado solo con agua (CA).

*Fitorremediación de un suelo contaminado con 21000 ppm de ARA remanente con Zea mays inocu-*

*lado con Burkholderia cepacia y Rhizobium etli por 4 meses.* La BS de suelo contaminado con 45000 ppm de ARA con LC y CB, redujo la concentración a 21000 ppm: luego se fitorremedió mediante *Z. mays* inoculado con *B. cepacia* (Tabla 4) donde se registró la máxima eliminación del ARA de hasta 1822.5 ppm, valor de concentración inferior a la máxima permitida por la NOM-138, y cuyo valor estadístico fue diferente a la detectada en el mismo suelo contaminada con ARA bioestimulado con LC/CB y fitorremediado mediante *Z. mays* inoculado con *B. cepacia* y *R. etli* que lo disminuyó hasta 10350 ppm, seguida de la concentración registrada en el suelo fitorremediado con *Z. mays* y *R. etli* que lo redujo hasta 13500 ppm, ambos valores fueron estadísticamente diferentes en comparación al mismo suelo usado como CN, donde prácticamente la concentración del ARA, no cambio con un valor de 44900 ppm, puesto que no hubo ningún efecto de la atenuación natural, derivado del exceso de HC del ARA (Corona-Ramírez & Iturbide-Argüelles 2005).

**Tabla 4 En suelo, concentración de aceite residual automotriz remanente derivado de la fitorremediación mediante *Zea mays* con *Burkholderia cepacia* y *Rhizobium etli* +valor inferior al máximo de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012**

Suelo + 21,000 ppm de aceite residual automotriz	Concentración del aceite residual automotriz en el suelo después de 4 meses de la fitorremediación con <i>Zea mays</i> y los géneros de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (ppm).
Sin bioestimular ni fitorremediar (Control Negativo)	44900 <sup>a</sup>
<i>Z. mays</i> + lombricomposta + composta bovina (3%) + <i>Rhizobium etli</i>	13500 <sup>b</sup>
<i>Z. mays</i> + lombricomposta + composta bovina (3%) + <i>Burkholderia cepacia</i>	<b>1822.5<sup>a</sup>+</b>
<i>Z. mays</i> + lombricomposta + composta bovina (3%) + <i>B. cepacia</i> y <i>R. etli</i>	10350 <sup>b</sup>

\*Tukey (0.025)= Letras iguales= sin diferencia estadística

## Discusión

Los resultados de la Tabla 1 señalan la composición química de la CB y LC (SAGARPA 2007) con la que se enriqueció el suelo contaminado con ARA, mediante sales de N (nitrógeno) y P (fósforo),

que estimularon a la microbiota nativa a la oxidación del ARA (Maldonado-Chávez *et al.* 2010). La Tabla 2 muestra que en el suelo el ARA remanente derivado de la BS con LC y CB fue fitotóxico en los primeros estadios del crecimiento en *Z. mays* (Sangabriel *et al.* 2006), aunque la combinación de am-

tos abonos fueron suficientes para suplir su demanda nutricional a madurez fisiológica, mejorada por la actividad promotora de crecimiento de *B. cepacia* al convertir los exudados radicales de *Z. mays* en SPCV (García-González *et al.* 2005). En la Tabla 3 se muestra que la biomasa de *Z. mays* inoculado con ambos géneros de BPCV, fue negativamente afectada por las propiedades fitotóxicas del ARA, como la hidrofobicidad y viscosidad con la que se generó una película que se adhirió a las raíces de *Z. mays*, e impidió el intercambio gaseoso, lo que a su vez provocó la lisis de las membranas de esas raíces, con la consecuente inhibición de su crecimiento (Gogosz *et al.* 2010). En la Tabla 4 se presenta la BS de suelo contaminado con 45000 ppm de ARA vía BS con LC y CB que lo enriquecieron con sales de N y P, para inducir a la población microbiana autóctona a oxidar los HC del ARA hasta 21000 ppm. Mientras que la FR mediante *Z. mays* inoculado con *B. cepacia* y *R. etli* mejoraron la condición nutricional en las raíces; aceleraron la remediación del suelo, al conseguir 1882.5 ppm un valor inferior al máximo permisible por la NOM-138 (Delgadillo-López *et al.* 2011). Por ello con base en lo anterior la FR de suelo tendría que intentarse con un planta parcialmente tolerante a la fitotoxicidad del ARA, ya que durante el proceso de eliminación de los HC, se provocan cambios en la condición física, química y biológica de la rizósfera que favorece la actividad oxidante de HC de *B. cepacia* y *R. etli* acelerando la eliminación del ARA (Davis *et al.* 2002, Pilon-Smits 2005, González-Paredes *et al.* 2013).

Los resultados de esta investigación apoyan que la integración de la bioestimulación del suelo impactando con una relativa alta concentración de 45000 ppm de ARA; por lombricomposta y composta bovina lo decrecieron a 21000 ppm, para que la posterior fitorremediación mediante *Z. mays* y *B. cepacia*

disminuyeron a 1822.5 ppm, un valor inferior al máximo total permisible por la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, por lo tanto de acuerdo con esta regulación mexicana, el suelo fue legalmente remediado.

## Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existe ningún tipo de conflicto de interés relacionado con la planificación, realización y redacción de esta investigación entre las instituciones involucradas.

## Agradecimientos

A la Coordinación de Investigación Científica-UMSNH proyecto 2.7 (2016), a BIONUTRA, S.A de CV, Maravatío, Mich, México por el apoyo económico, y al CONACYT por beca para la primera autora.

## Literatura citada

- Amador RAL, Boschini FC. Fenología productiva y nutricional de maíz para la producción de forraje. Agron Mesoam. 2000; 11(1): 171-7.
- Corona-Ramírez L, Iturbide-Argüelles R. Atenuación natural en suelos contaminados con hidrocarburos. Ing Invest Tecnol. 2005; 6(2): 119-26.
- Davis LC, Castro-Díaz S, Zhang Q, Erickson LE. Benefits of vegetation for soils with organic contaminants. Crit Rev Plant Sci. 2002; 21(5): 457- 91.
- Delgadillo-López AE, González-Ramírez CA, Prieto-García F, Villagómez-Ibarra JR, Acevedo-Sandoval O. Fitorremediación: una alternativa

- para eliminar la contaminación. *Trop Subtrop Agroecosyt.* 2011; 14(2): 597-612.
- Ferrera-Cerrato R, Alarcón A, Trejo-Aguilar D, Sangabriel W, Mendoza-López MR, Cruz-Sánchez JS, et al. Fitorremediación de un suelo contaminado con combustóleo utilizando *Phaseolus coccineus* y fertilización orgánica e inorgánica. *Agrociencia.* 2007; 41(8): 817-26.
- García-González MM, Farías-Rodríguez R, Peña-Cabriales JJ, Sánchez-Yáñez JM. Inoculación del trigo var. Pavón con *Azospirillum spp.* y *Azotobacter beijerinckii*. *Terra Latinoam.* 2000; 23(1): 65-72.
- Gogosz AM, Bona C, Santos GO, Botosso PC. Germination and initial growth of *Campomanesia xanthocarpa* O. Berg (Myrtaceae) in petroleum contaminated soil and bioremediated soil. *Braz J Biol.* 2010; 70(4): 977-86.
- González-Paredes Y, Alarcón A, Ferrera-Cerrato R, Almaraz JJ, Martínez-Romero E, Cruz-Sánchez JS, et al. Tolerance, growth and degradation of phenanthrene and benzo [a] pyrene by *Rhizobium tropici* CIAT 899 in liquid culture medium. *Appl Soil Ecol.* 2013; 63(1): 105-11.
- Izinyon OC, Seghosime A. Assessment of Show Star Grass (*Melampodium Paludosum*) for Phytoremediation of Motor Oil Contaminated Soil. *Civil Environ Res.* 2013; 3(3): 19-28.
- Larenas-Parada G, De Viana ML. Germinación y supervivencia del pasto cubano *Tithonia tubaeformis* (Asteraceae) en suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo. *Ecol Austral.* 2005; 15(2): 177-81.
- Leal-Castillo M. Biorremediación de un suelo agrícola contaminado con aceite residual automotriz [tesis doctoral]. Universidad de Colima, México, 2003. p.115 (inédita.)
- LGEPA. "Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente". Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Última reforma DOF 15/05/2008. 2008, México, D. F., Disponible en: [http://www.diputados.gob.mx/Leyes\\_Biblio/ref/lgepa.htm](http://www.diputados.gob.mx/Leyes_Biblio/ref/lgepa.htm).
- Maldonado-Chávez E, Rivera-Cruz MC, Izquierdo-Reyes F, Palma-López D. Efectos de rizósfera, microorganismos y fertilización en la biorremediación y fitorremediación de suelos con petróleos crudo nuevo e intemperizado. *Universidad y Ciencia.* 2010; 26 (2):121-36.
- NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Norma Oficial Mexicana. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificación para la remediación. 2012.
- Olivares-Campos MA, Hernández-Rodríguez A, Vences-Contreras C, Jáquez-Balderrama JL, Ojeda-Barrios D. Lombricomposta y composta de estiércol de ganado vacuno lechero como fertilizantes y mejoradores de suelo. *Universidad y Ciencia.* 2012; 28(1): 27-37.
- Pardo-Castro JL, Perdomo-Rojas MC, Benavides-López de Mesa JL. Efecto de la adición de fertilizantes inorgánicos compuestos en la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados con petróleo. *Nova.* 2004; 2(2): 40-9.
- Pilon-Smits E. Phytoremediation. *Annu Rev Plant Biol.* 2005; 56: 15-39.
- SAGARPA. Lombricultura, 2007. [acceso 4 de Abril 2013]. Disponible en línea <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasappt/Lombricultura.pdf>
- Sangrabriel W, Ferrera-Cerrato R, Trejo-Aguilar D, Mendoza-López MR, Cruz- Sánchez JS, López-Ortiz C, et al. Tolerancia y capacidad de fitorremediación de combustóleo en el suelo

por seis especies vegetales. Rev Int Contam Ambient. 2006; 22(2): 63-73.

Walpole ER, Myers R, Myers LS. Probabilidad & Estadística para Ingeniería & Ciencias. Ed. Pearson. México. 2007.

---