

# EVALUACION DEL POTENCIAL DE LOS BIOSÓLIDOS PROCEDENTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA USO AGRÍCOLA Y SU EFECTO SOBRE EL CULTIVO DE RABANO ROJO (*Raphanus sativus* L.).

Ramiro Ramírez Pisco<sup>1</sup> y Martha Inés Pérez Arenas<sup>2</sup>

## RESUMEN

*El trabajo se adelantó en predios de la planta de tratamiento de aguas residuales "El Salitre", en la ciudad de Bogotá, con el propósito de evaluar el potencial del subproducto del tratamiento de aguas residuales "biosólido", para su aplicación en la agricultura por medio de la valoración del crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de rábano rojo, y establecer una posible alternativa al problema de disposición final de 3900 toneladas de este material generado mensualmente en las plantas de tratamiento de aguas. El diseño experimental empleado correspondió a bloques completos al azar, con cinco tratamientos y tres repeticiones, dispuesto en parcelas de 2 m x 2 m. Los tratamientos correspondieron a mezclas de biosólidos con suelo en las siguientes proporciones: 100 % biosólido (equivalente a 294 ton ha<sup>-1</sup>), 75 % biosólido (220 ton ha<sup>-1</sup>), 50 % biosólido (147 ton ha<sup>-1</sup>), 25 % biosólido (73 ton ha<sup>-1</sup>) y 100 % suelo como control. Se sembró rábano rojo *Raphanus sativus* L. Las variables evaluadas fueron: porcentaje de germinación, peso seco de hojas y raíz, longitud de la planta, área foliar y producción. Además, se midió la acumulación de elementos traza en los rábanos cosechados, para determinar su riesgo para el consumo. Los resultados evidenciaron que los tratamientos 50 % biosólido y 25 % biosólido, son los que favorecen el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de rábano, mientras que los tratamientos 75 % biosólido y 100% suelo presentaron un menor desarrollo, crecimiento y producción del cultivo. El tratamiento 100% biosólido provocó una baja germinación, además no presentó acumulación en la raíz, que es el producto cosechable. Los niveles de acumulación de metales pesados sobrepasaron los máximos permitidos con el tratamiento 75 % biosólido. Se evidenció como, la utilización del biosólido en la agricultura puede acarrear un gran riesgo, ya que a pesar de presentar una gran cantidad de nutrientes (C, N, P, K, Ca, Na, Fe y Zn) y materia orgánica, la presencia de metales pesados, o su inadecuada aplicación, puede ir en detrimento del crecimiento y producción de las plantas de rábano.*

**Palabras claves:** Biosólido, metales pesados, aguas residuales.

<sup>1</sup> Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Escuela de Biociencias. A.A. 3840, Medellín, Colombia. <rramirez@unalmed.edu.co>

<sup>2</sup> Ecóloga. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Transv.4<sup>o</sup> No.42-00-Bogotá, Colombia. <fear@javeriana.edu.co>

Recibido: Mayo 13 de 2005; aceptado: Septiembre 4 de 2006.

Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín. Vol.59,No.2. p.3543-3556. 2006.

**ABSTRACT****EVALUATION OF THE POTENTIAL FOR BIOSOLIDS OBTAINED FROM WASTEWATER TREATMENT FOR AGRICULTURAL USE AND THEIR EFFECT ON CULTIVATION OF RED RADISH (*Raphanus sativus* L.).**

*This study was conducted in waste water treatment plant "The Salitre", in Bogotá, to evaluate the potential of the waste water treatment subproduct "biosolids", for application in agriculture by means of quantifying growth, development and production of cultivation of red radish, and to establish a possible alternative to the problem of final disposition of 3900 tons of this material generated monthly in the waste water treatment plant. The experimental design employed was a random blocks design, with five treatments and three replications, arranged in 2 m x 2 m plots. The treatments corresponded to mixtures of biosolids with soil in the following proportions: 100 % biosolid (equivalent to 294 ton Ha<sup>-1</sup>), 75 % biosolid (220 ton Ha<sup>-1</sup>), 50 % biosolid (147 ton ha<sup>-1</sup>), 25 % biosólido (73 ton ha<sup>-1</sup>) and 100 % soil. Red radish *Raphanus sativus* L. was planted. The variables evaluated were: germination percentage, dry weight of leaves and roots, plant length, foliar area and production. Also, the accumulation of trace was measured in the harvested radishes, to determine risks of consumption. The results showed that the 50 % biosolid and 25 % biosolid, treatments were those that most favored growth, development and production of cultivation radish, while the 75 % biosolid and 100 % biosolid treatments, showed lower development growth and production of the cultivar. The 100 % biosolid treatment resulted in low germination and also did not show root accumulation, that is the harvested product. The levels of accumulation of heavy metals surpassed the maximum levels with the 75 % biosolid and 100 % biosolid treatment. It was shown that the use of the biosolids in agriculture can produce a great risk, because despite having high nutrient (C, N, P, Ca, Na, Fe y Zn) and organic matter content, it also may slow growth and production of radish plants.*

**Key word:** biosolid, heavy metals, wastewater.

La magnitud y trascendencia de la problemática ambiental del Río Bogotá, ha comprometido al Distrito Capital en su recuperación, mediante un programa integral a 20 años, que consiste en la construcción de 3 plantas de tratamiento de aguas residuales en la desembocadura de los Ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo (Departamento Técnico y Administrativo del Medio Ambiente (DAMA) 2002).

Actualmente, se encuentra operando la planta "El Salitre", que trata el agua residual transportada por el alcantarillado del norte de la ciudad de Bogota, contribuyendo al primer paso de descontaminación del río, disminuyendo su

carga orgánica contaminante (Fundación Restauración de Ecosistemas Tropicales, 2001).

Sin embargo, este tratamiento genera subproductos como el biosólido, al cual es necesario darle una adecuada disposición, debido a que diariamente se generan entre 130 y 140 toneladas en la planta de tratamiento.

A través del trabajo se evaluó como alternativa la disposición final del biosólido, su aplicación como enmienda orgánica en el cultivo del rábano; tomando en cuenta experiencias de países como Estados Unidos, Canadá, Francia, Alemania, Chile y Brasil, que

desde hace varias décadas han reconocido las ventajas de utilizar biosólidos como abono debido a las características que presenta (materia orgánica y nutrientes) (Pascual *et al.* 2001).

Entre las características que hacen que el rábano sea una especie idónea para este tipo de evaluación están, el de ser una planta de rápido crecimiento (cinco semanas) y presentar un contacto directo entre el sustrato y la parte comestible.

Se planteó como objetivo evaluar el potencial de los biosólidos generados en la planta de tratamiento el Salitre, en el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de Rábano rojo, así como determinar los posibles riesgos que se pueden presentar en los cultivos y en la salud pública en cuanto a contenido de metales pesados se refiere, al utilizar los biosólidos como fuente de materia orgánica y nutrientes.

## MATERIALES Y METODOS

El trabajo se realizó en predios de la planta de tratamiento de aguas residuales "El Salitre", localizada en la ciudad de Bogotá, próxima a la desembocadura del Río Juan Amarillo en el Río Bogotá, vía Lisboa, a una altitud de 2.572 msnm. Las condiciones meteorológicas durante el período de estudio fueron: temperatura promedio de 14,4 °C, humedad relativa promedio 76,1 %, radiación solar 180,9 W m<sup>-2</sup>, velocidad del viento promedio 8,5 km h<sup>-1</sup>, presión atmosférica 565 mmHg y precipitación 5,1 mm, datos reportados

por la estación meteorológica de la planta El Salitre.

El suelo utilizado correspondió a un Inceptisol, proveniente de un área cercana a la planta, en las riveras del Río Bogotá, sus principales características se presentan, junto con las del biosólido proveniente de la planta de tratamiento de aguas en la Tabla 1. En el biosólido se destaca su alto contenido de nutrientes, en especial de fósforo, potasio, calcio, hierro y zinc.

Los tratamientos correspondieron a mezclas de biosólido con suelo en distintas proporciones como se presenta en la Tabla 2.

El diseño experimental correspondió a bloques completos al azar con 5 tratamientos y tres repeticiones para un total de 15 unidades experimentales (parcelas), con un área de 4 m<sup>2</sup> (2m x 2m), en las cuales se marcaron 9 surcos (20 cm entre ellos) en los cuales se sembraron 50 semillas a una distancia de 4 cm.

Los muestreos se realizaron a partir de los 14 días después de siembra (dds), con un intervalo de 8 días hasta cosecha (38 dds); tomando 10 plantas al azar por unidad experimental.

Se realizaron análisis de varianza para determinar si existían diferencias estadísticas entre tratamientos. A través de la prueba de comparación múltiple de Tukey, con un 95 % de confianza, se identificaron estadísticamente las diferencias entre tratamientos (Steel y Torrie 1980).

**Tabla 1.** Características físicas y químicas del suelo y del biosólido residual, empleados en el estudio para su aplicación en la agricultura.

Parámetro	Método	Suelo	Biosólido
TEXTURA	Bouyoucos	Franco	
		48,78 A -19,22L - 32,0 Ar	
pH	Agua 1:1	4,93	6,74
CIC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Acetato de amonio 0,1 N pH 7,0	21,2	31,2
Al (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Acetato de amonio 0,1 N pH 7,0	0,2	0,0
Na (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Acetato de amonio 0,1 N pH 7,0	0,36	0,76
Materia Orgánica	Walkley & Black	9,62	10,6
N %	Kjeldhal;	0,30	0,33
P (mg kg <sup>-1</sup> )	Bray II	13,2	933
Ca (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Acetato de amonio 0,1 N pH 7,0	5,2	10,34
Mg (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Acetato de amonio 0,1 N pH 7,0	1,12	1,62
K (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Acetato de amonio 0,1 N pH 7,0	0,61	0,75
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	EDTA	2,79	9,1
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	EDTA	875	470
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	EDTA	12,7	43,8
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	EDTA	3,2	0,8

**Tabla 2.** Tratamientos correspondientes a mezclas de suelo y biosólido residual (%) y equivalente a dosis de biosólido por hectárea.

Tratamiento	Biosólido %	Suelo %	Equivalente de biosólido en ton ha <sup>-1</sup>
T1	100	0	294
T2	75	25	220
T3	50	50	147
T4	25	75	73
T5	0	100	0

Las variables evaluadas correspondieron a:

**Número de hojas (No.):** Durante los muestreos, se realizó un conteo de hojas cotiledonales y verdaderas en las diferentes plantas.

**Área foliar (cm<sup>2</sup>):** Se determinó en cada una de las plantas muestreadas, en hojas cotiledonales y en hojas verdaderas fotosintéticamente activas.

**Longitud de la planta (cm):** Para la determinación de este parámetro se tomo en cuenta desde la raíz, hasta la hoja más larga. Las mediciones se realizaron durante cada muestreo, y en cada una de las plantas.

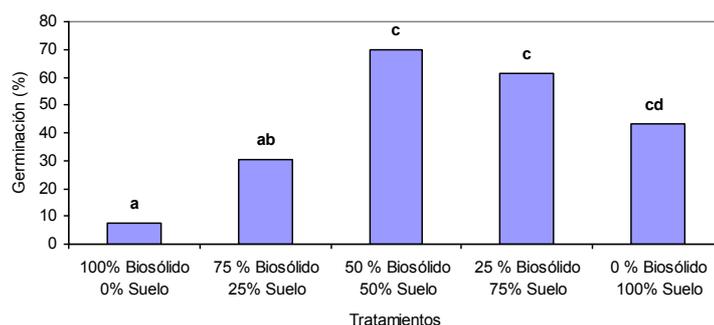
**Producción de biomasa (g):** Para su determinación cada planta muestreada fue seccionada en sus diferentes órganos (raíz y hojas), los cuales se colocaron en bolsas de papel Kraft debidamente iden-

tificadas, posteriormente se llevaron a estufa hasta alcanzar peso seco constante a una temperatura 60 °C, una vez secas, se determinó su peso.

**Análisis de bioacumulación de metales pesados:** Se hicieron en los rábanos cosechados en los distintos tratamientos y fueron mediante el método de absorción atómica realizados en CORE Laboratories.

## RESULTADOS Y DISCUSION

**Germinación.** La germinación se presentó tres días después de la siembra en todos los tratamientos, sin embargo, el mayor porcentaje se evidenció en los tratamientos T3 y T4 (> 60 %), mientras que en los tratamientos T2 y T5 el porcentaje fue medio (30-31 %), y el porcentaje mas bajo se presentó en el tratamiento T1 (100% biosólido, < 10 %) (Figura 1).



**Figura 1.** Germinación (%) de semillas de rábano rojo, *Raphanus sativus L.*, sembradas en mezclas de biosólido residual y suelo. Los tratamientos con distinta letra, representan diferencias significativas (Tukey 5 %).

El bajo porcentaje de germinación en T1 y T2, se debió principalmente al impedimento físico ocasionado por el biosólido, ya que su aplicación en altas concentraciones generó terrones grandes y compactos que impidieron una adecuada oxigenación, respiración, hidratación, y emergencia de las plántulas.

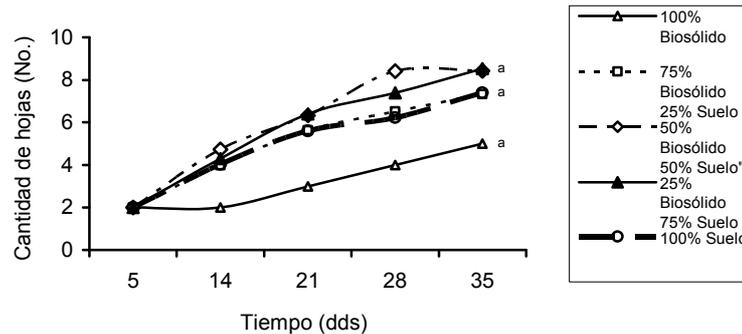
En los tratamientos T3 y T4 se evidenció el mayor porcentaje de germinación, sin que se presentara el problema antes mencionado de los tratamientos T1 y T2; por otra parte, presentaron el

mayor contenido de humedad en el suelo (> 60 %), favoreciendo con esto la germinación.

El tratamiento T5 (100 % suelo), presentó un menor contenido de humedad (< 40 %) que los tratamientos que contenían biosólido, disminuyendo la adecuada hidratación de las semillas y por lo tanto su germinación. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Ramírez (1998) en un trabajo realizado con biosólidos precedentes de la industria cervecera.

**Número de hojas.** Las hojas cotiledonales emergieron simultáneamente en todos los tratamientos a los 5 días después de siembra (dds). Por otra parte, la emisión de hojas verdaderas se presentó a los 8 dds en los tratamientos T3 y T4, mientras que en los tratamientos T2 y T5, emergieron a los 12 dds. En el tratamiento T1 se evidenciaron a los 19 dds.

El mayor número de hojas por planta durante el periodo de estudio, se observó en los tratamientos T3 y T4 alcanzando valores de 8 a 9 hojas en total. Los tratamientos T2 y T5 presentaron un número de hojas intermedio (7–8), mientras que el tratamiento T1 presentó el menor número de hojas (<5) (Figura 2).



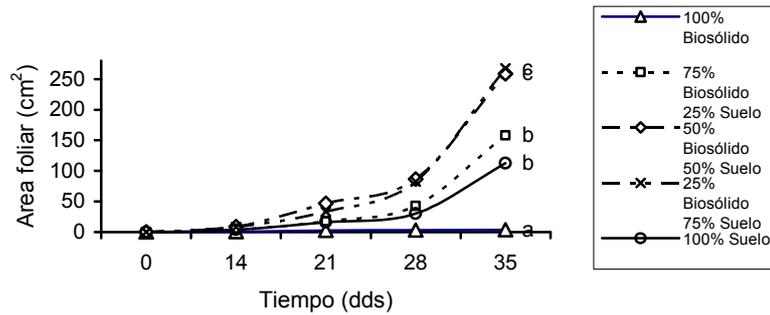
**Figura 2.** Número de hojas en plantas de rábano rojo, *Raphanus sativus* L., presentes en las distintas mezclas de biosólido residual y suelo. Los tratamientos con diferente letra, representan diferencias significativas (Tukey 5 %).

Aunque entre los tratamientos el número de hojas no fue significativamente diferente, el tratamiento T1 (100 % biosólido) presentó el menor número de hojas, debido a la alta tasa de aplicación de biosólido que aporta excesos de nutrientes como fósforo y zinc que causan una disminución en el desarrollo foliar (Azcón y Talon 2000).

**Área foliar.** Durante el periodo de estudio, el área foliar evidenció un incremento en los distintos tratamientos, distinguiéndose tres grupos de área foliar: El primero incluía los tratamientos T3 y T4 que presentaron el

mayor área foliar (> 250 cm<sup>2</sup>), el segundo grupo T2 y T5 que alcanzaron un área foliar intermedia (100 y 150 cm<sup>2</sup>), y el menor desarrollo del área foliar se presentó en el tratamiento T1 (< 20 cm<sup>2</sup>) (Figura 3).

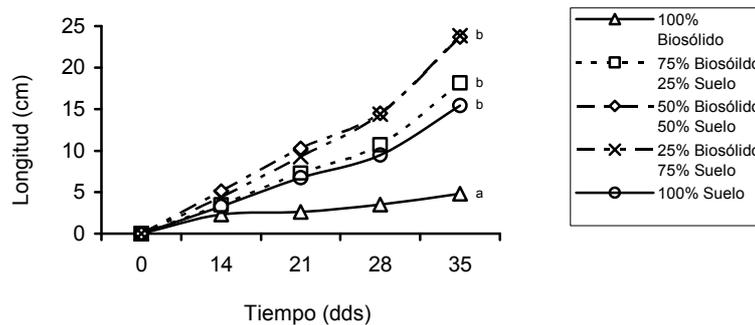
Estas diferencias se debieron principalmente a las altas concentraciones de fósforo (933 ppm) y zinc (43,8 ppm) presentes en el biosólido; esto se explica en la medida que, tanto el exceso como las deficiencias de estos nutrientes pueden ocasionar disminuciones en el crecimiento de las plantas (Azcon y Talón 2000).



**Figura 3.** Superficie de las hojas en plantas de rábano rojo, *Raphanus sativus L.*, durante su crecimiento en las distintas mezclas de biosólido residual y suelo. Los tratamientos con diferente letra, representan diferencias significativas (Tukey 5%).

**Longitud de las plantas.** Los datos registrados evidenciaron un incremento constante en la longitud de las plantas en los distintos tratamientos hasta el día de cosecha. La mayor longitud la alcanzaron los tratamientos T3 y T4 siendo ésta

mayor a 20 cm, un nivel intermedio lo presentaron los tratamientos T2 y T5 con una longitud entre 15-20 cm, mientras que el tratamiento T1 alcanzó una longitud significativamente menor (<5 cm) hasta el día de cosecha. (Figura 4).



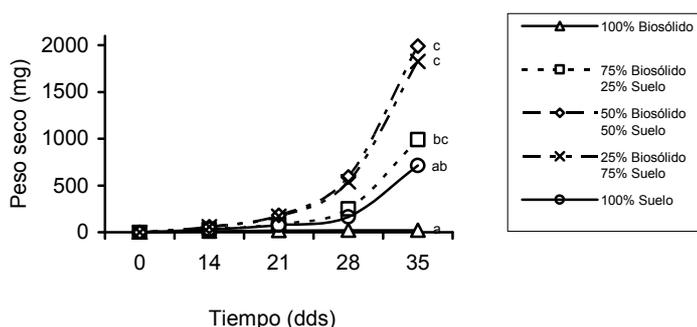
**Figura 4.** Longitud total de rábano rojo, *Raphanus sativus L.*, durante su crecimiento en las distintas mezclas de biosólido residual y suelo. Los tratamientos con diferente letra, representan diferencias significativas (Tukey 5%).

Al igual que en el área foliar, la principal razón por la que se presentan variaciones en longitud de las plantas de rábano, es la gran diferencia en la concentración de fósforo presente en el suelo (13,2 ppm) y el biosólido (933 ppm). Otro nutriente que puede provocar un bajo crecimiento de las plantas, es el zinc (suelo 12,7 ppm, biosólido 43,8 ppm) bajo condiciones tanto de exceso como de deficiencia (Azcon y Talón 2000).

**Producción de biomasa.** El peso seco total de las plantas, presentó un comportamiento similar al área foliar, con un incremento constante en los distintos tratamientos. Es así como, los pesos secos más altos, se evidenciaron en los tratamientos T3 y T4 durante todo el período de estudio, alcanzando un peso superior a los 1800 mg, un valor intermedio lo alcanzaron los tratamientos T2

y T5, siendo de 990 mg y 713 mg respectivamente. Por otra parte el menor peso seco se presentó en las plantas del tratamiento T1, siendo inferior a 100 mg (Figura 5).

El fósforo, además de desempeñar un papel fundamental en la fotosíntesis y la respiración, tiene una función importante en la estimulación del desarrollo de la raíz (Azcon y Talon 2000), si la raíz (rábano) es el órgano que más influye en el peso de la planta. Así el tratamiento T1 presentó el menor peso seco, debido a que el día de la cosecha, aún no se habían formado los rábanos y el peso máximo de las plantas no alcanzó 100 mg. Los tratamientos T3 y T4, además de presentar la mayor longitud y área foliar, muestran el mayor tamaño en la raíz, lo que está claramente evidenciado al presentarse concentraciones de fósforo adecuadas en el sustrato.



**Figura 5.** Biomasa de las plantas de rábano rojo, *Raphanus sativus L.*, durante su crecimiento en las distintas mezclas de biosólido residual y suelo. Los tratamientos con diferente letra, representan diferencias significativas (Tukey 5%).

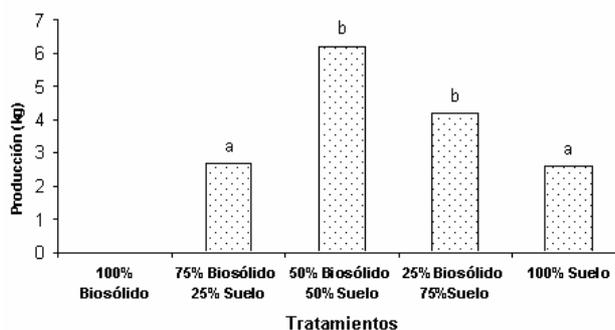
Los tratamientos T2 y T5 aunque presentan un peso seco intermedio, tienen diferencias entre ellos, siendo mayor el

peso seco de T2, gracias a la mayor concentración de fósforo que estimula el desarrollo de la raíz, además de una

ligera mayor longitud y área foliar. El tratamiento T5 al presentar deficiencias de fósforo presenta un peso seco menor.

**Cosecha.** Una producción significativamente mayor, la alcanzaron los tratamientos T3 y T4 (> 6 kg por parcela), la

producción en los tratamiento T2 y T5 fue inferior a la mitad de estos dos tratamientos (entre 2,5 y 2,9 gramos por parcela), mientras que en el tratamiento T1 no se presentó producción, debido a la ausencia de formación de los rábanos (Figura 6).



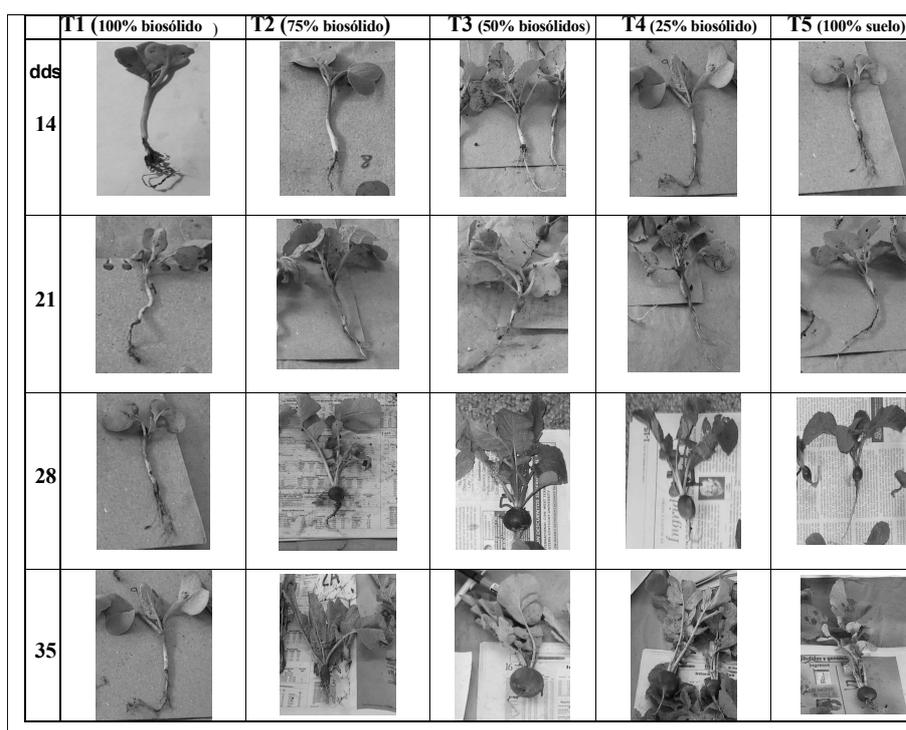
**Figura 6.** Producción de rábano rojo, *Raphanus sativus L.*, durante su crecimiento en las distintas mezclas de biosólido residual y suelo. Los tratamientos con diferente letra, representan diferencias significativas (Tukey 5 %).

En la Figura 7 se presenta el resumen del crecimiento de las plantas de rábano rojo, en las mezclas señaladas. A la izquierda corresponde al tiempo expresado en días después de siembra, en la parte superior se mencionan los distintos tratamientos.

La mayor producción se presentó en el tratamiento T3 (50 % biosólido y 50 % suelo) y se debió principalmente a que en este tratamiento se encuentran las condiciones mas cercanas a los requerimientos nutricionales del cultivo de rábano, reportadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la

Alimentación (1961) y el ministerio de agricultura y ganadería (2002), que son 120 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo, que es el elemento que generalmente condiciona la dosis de aplicación en la fertilización en nuestros suelos (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, ADEME. 2001).

**Concentración de elementos traza.** Los contenidos de metales traza en el biosólido no sobrepasaron los reportados como límites para su utilización por la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos de América (Tabla 3).



**Figura 7.** Crecimiento de las plantas de rábano rojo, *Raphanus sativus L.*, en las distintas mezclas de biosólido residual y suelo.

**Tabla 3.** Contenido de elementos traza en los biosólidos residuales y valores límites aceptados por la EPA.

Elemento-traza	Contenido presente en el biosólido de estudio mg kg <sup>-1</sup> (MS)	Contenido límite en biosólidos- Norma EPA 50.3-13 mg kg <sup>-1</sup> (MS)	Contenido límite en biosólidos de excelente calidad- Norma EPA mg kg <sup>-1</sup> (MS)
Arsénico	0,43	75	41
Cadmio	4,47	85	39
Cromo	56,63	3000	-
Cobre	149	4300	500
Mercurio	4,05	57	17
Níquel	35,77	420	420
Plomo	93,88	840	300
Selenio	0,17	100	100
Zinc	983,60	7500	2800

**Bioacumulación de elementos traza en rábanos cosechados.** Los resultados de los análisis de bioacumulación de elementos traza en los rábanos cosecha-

dos de los diferentes tratamientos, a excepción de T1 que no había formado rábanos hasta el día de la cosecha, se presentan en la Tabla 4.

**TABLA 4** Bioacumulación de elementos traza ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en rábano rojo, *Raphanus sativus* L., sembrado en mezcla de biosólido residual y suelo, rábano rojo establecido en cultivos comerciales y rangos admisibles según el reglamento sanitario de los alimentos del Departamento Federal de Comercio Internacional de los Estados Unidos, y las Normas y procedimientos reglamentarios de la industria de Alimentos del Ministerio de Salud, República de Colombia.

Metales pesados ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Rábano rojo comercial	100% Suelo	25% Biosólido 75% Suelo	50% Biosólido 50% Suelo	75% Biosólido 25% Suelo	Rangos admisibles para diferentes alimentos $\text{mg kg}^{-1}$
Arsénico	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1-2
Cadmio	0,43	3,01	1,53	1,56	3,34	0,01-2
Cobre	2,27	2,26	3,45	3,57	14,29	0,1-15
Cromo	0,43	0,75	0,77	0,67	2,86	--
Mercurio	0,06	0,49	1,34	0,14	0,65	0,001-1,5
Níquel	3,98	3,01	4,40	5,35	25,25	--
Plomo	11,37	8,04	6,70	6,47	20,01	0,05-2
Selenio	0,01	0,01	0,005	0,008	0,014	0,01-0,3
Zinc	27,3	65,32	145,6	142,7	952,9	5-100

Los resultados, indican que para los elementos cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo, selenio y zinc, la concentración en el rábano rojo aumenta al incrementar la concentración de biosólido, (Tabla 4). El mercurio no presenta una clara tendencia en cuanto a su concentración en el rábano rojo. El tratamiento sin biosólido presentó altas concentraciones de cadmio y plomo muy por encima de las concentraciones encontradas en los rábanos rojos con aplicación de biosólido a excepción del tratamiento 75 % biosólido 25 % suelo.

Se observa que la cantidad bioacumulada de los elementos traza: arsénico, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y

selenio es mucho menor en los rábanos rojos cosechados, que la cantidad de metales pesados presentes en el biosólido puro utilizado como abono.

Estos resultados se deben principalmente a la gran cantidad de materia orgánica presente en el biosólido, que hace que exista una alta reactividad química, debido a la gran diversidad de grupos funcionales que contiene. Esta polifuncionalidad provee las bases para retener y fijar una amplia gama de elementos y compuestos químicos (Stevenson, 1981).

Así, los rábanos rojos cosechados del tratamiento T2 (75 % biosólido – 25 % suelo), aunque crecieron bajo altas

concentraciones de materia orgánica, fueron afectados por la alta concentración de elementos traza presentes en el biosólido, siendo insuficientes los sitios de absorción de elementos traza en relación a la gran cantidad de elementos traza existentes en el biosólido, y por tanto presentaron la mayor bioacumulación de los mismos. La alta bioacumulación de zinc, puede deberse a que este elemento es el que más movilidad presenta bajo condiciones de un pH ligeramente ácido (6,74). (ADEME 2001).

Los tratamientos T3 (50 % biosólido 50 % suelo) y T4 (25 % biosólido 75 % suelo) presentaron niveles de bioacumulación muy similares entre ellos, siendo significativamente inferior a la bioacumulación de los rábanos rojos del tratamiento T2, y muy similar a la de los rábanos del tratamiento T5 (solo suelo) en la mayoría de los metales analizados.

En cuanto a la normatividad de los metales pesados admisibles en diferentes alimentos, según el reglamento sanitario del Departamento Federal de Comercio Internacional de los Estados Unidos, y las Normas y procedimientos reglamentarios de la industria de Alimentos del Ministerio de Salud, República de Colombia, la bioacumulación de As, Cu, Hg en rábanos rojos del tratamiento T2 (75 % biosólido – 25 % suelo) cumple con los rangos de normas admisibles en diferentes alimentos, sin embargo Cd, Pb, Zn no las cumplen.

La bioacumulación de los rábanos del tratamiento T3 (50 % biosólido – 50 % suelo) cumple con las normas para As, Cd, Cu, Hg, Se, pero no cumple las

normas para Pb y Zn. Sin embargo, el Zinc es un elemento traza que se absorbe y la mayor parte es excretado y eliminado por la heces, por lo que no representa un riesgo mayor para la salud humana (Vallejo 1997).

La bioacumulación de elementos traza para el tratamiento T4 (25 % biosólido – 75 % suelo) cumple con las normas para As, Cd, Cu, Hg, Se y no las cumple para Pb y Zn.

En el tratamiento de control T5 (solo suelo) se cumplen con las normas para As, Cd, Cu, Hg, Se y Zn; sin embargo, no se cumplen para Pb.

Los rábanos rojos comerciales cumplen con las normas para As, Cd, Cu, Hg, Se, Zn, sin embargo, sobrepasa en gran medida las normas para Pb, siendo incluso mucho más alto que el Pb presente en los rábanos rojos de los tratamientos T2, T3, T4.

## CONCLUSIONES

La aplicación de biosólido como abono orgánico dependiendo de su concentración, incide directamente en el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de rábano.

El tratamiento T1 (100 % biosólido 0 % suelo) no es adecuado para el desarrollo del cultivo, ya que tanto la germinación como las variables que evidencian el crecimiento y desarrollo de las plantas (longitud, área foliar, biomasa) y la producción no se favorecen con la alta concentración de biosólido, debido a su consistencia

física y a los excesos de fósforo y zinc que presentan.

Los tratamientos T3 (50 % B – 50 % suelo) y T4 (25 % biosólido – 75 % suelo) equivalentes a 147 y 73 ton Ha<sup>-1</sup>, presentaron las plantas de rábano de mayor longitud, área foliar, peso, porcentaje de germinación y producción, debido a que presentan la concentración adecuada de los nutrientes requeridos por el cultivo y no presenta limitaciones físicas para la germinación de las semillas.

Según los contenidos máximos de metales pesados reglamentados por la EPA, el nivel de metales pesados en el biosólido de la planta de tratamiento El Salitre está por debajo de los niveles máximos permitidos para su aplicación como fertilizantes y mejoradores de suelos, bajo condiciones de zona templada.

La bioacumulación de metales pesados presentes en el biosólido, fue considerablemente inferior en los tratamientos T3 y T4, cumpliendo las normas del reglamento sanitario de alimentos del Departamento Federal de Comercio Internacional de los Estados Unidos y del Ministerio de Salud de Colombia, para los elementos traza: arsénico, cadmio, cobre, mercurio, selenio y zinc, pero no las cumple para plomo.

Los tratamientos T2 (75 % biosólido - 25 % suelo) y T5 (100 % suelo), presentaron características similares de crecimiento y desarrollo. La bioacumulación de elementos traza en los rábanos cosechados en T2 fue considerablemente mayor que la de los

demás tratamientos, cumpliendo con los niveles aceptados para arsénico, cobre y mercurio, pero, sobrepasa las de cadmio, plomo y zinc.

La utilización en la agricultura, del biosólido residual proveniente de la planta El Salitre puede acarrear un gran riesgo, dado que a pesar de presentar una alta cantidad de nutrientes (C, N, P, K, Ca, Na, Fe y Zn) y materia orgánica, la presencia de metales pesados, o su inadecuada aplicación, puede ir en detrimento del crecimiento y desarrollo de las plantas de rábano rojo.

## BIBLIOGRAFIA

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. 2001. Le boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture. Alsace, France: ADEME. 165 p.

Azcon-Bieto, J. y Talon, M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid: Editorial Interamericana McGraw Hill. 704 p.

Fundación Restauración de Ecosistemas Tropicales. 2001. Utilización de biosólidos de depuración en la rehabilitación de suelos. Bogotá, Colombia: FRET. 108 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación 1961. Las semillas agrícolas y hortícolas, producción, control y distribución. Roma: FAO. 616 p. (Colección FAO, Producción y protección vegetal; no.12).

Pascual, I., Antolin, M. C, Sánchez-Díaz, M. y Polo, A. 2001. Efecto de los lodos de depuradora sobre la fertilidad del suelo y su relación con la producción agrícola en zonas de clima mediterráneo semiárido. 34 p. En: I Encuentro Internacional de Gestión de Residuos Orgánicos en el Ámbito Rural Mediterráneo. Resúmenes. Pamplona: Universidad de Navarra.

Ramirez, R. 1998. Efecto de la aplicación de efluente de cervecería, ciclos de humedecimiento, secado y raygrass de estructura de argiudoll típico. p. 85-90.

En: IX Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo (1998: Paipa, Colombia). Memorias. Santa Fé de Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.

Steel, R. G. W. and Torrie, J. H. 1980. Principles and procedures of Statistics: a biometrical approach. 2ed. New York: McGraw-Hill Book. 481 p.

Stevenson, F. J. 1982. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. New York. John Wiley and Sons. 443 p.