

## Efectos de la aplicación de lodos orgánicos o biosólidos generados en el tratamiento de las aguas residuales domésticas sobre el suelo y la productividad de maíz forrajero en los Altos de Jalisco, México

Aldo Antonio Castañeda Villanueva,\* Hugo E. Flores López,\*  
Raymundo Velazco Nuño,\* María Guillermina Martínez Cisneros\*

### INTRODUCCIÓN

Durante las actividades cotidianas del ser humano se emplea el agua para limpiar los residuos que son generados durante el consumo de productos como la comida, o el aseo de las superficies (corporal y material); estos desechos son a su vez vertidos a flujos de agua para ser llevados a través de redes de alcantarillado a plantas de tratamiento, donde son acondicionados para poder ser reintegrados a los ciclos naturales.

En estas plantas de tratamiento se produce, por un lado, el agua a la que se le denomina “tratada”, con baja cantidad de elementos nocivos; y por el otro, los compuestos con alto peso, denominados sólidos residuales, lodos orgánicos o biosólidos.

Los tratamientos aeróbicos convencionales de las aguas residuales de origen municipal (domésticas) generan grandes volúmenes de estos lodos orgánicos que, en general, no son manejados convenientemente, al grado de que contribuyen al deterioro ecológico del medio ambiente, ya que en su mayoría son confinados en excavaciones a cielo abierto, entonces contaminan ríos y lagos, y provocan problemas sanitarios; en otros casos son arrojados directamente a los mares o son incinerados.

En Estados Unidos de América, desde 1992 existe un decreto que prohíbe arrojar estos desechos al mar (EPA, 1992).

La Unión Europea genera al año más de 6.5 millones de toneladas de biosólidos, y la utilización de estos residuos va desde la recuperación de energía, de la producción de petróleo y biogás en Austria (Sullivan, 1998), hasta la vitrificación a 1400 °C para la fabricación de ladrillos para la construcción, en Japón (Stehouwer y Wolf, 1999).

La tendencia general es la sugerida por la Organización Mundial de la Salud (OMS); que consiste en la aplicación controlada de biosólidos en suelos para el desarrollo de cultivos en zonas áridas y semiáridas y también para la biorremediación de los suelos contaminados y/o erosionados. La silvicultura tiene un enorme potencial para absorber lodos en el futuro, sin embargo, esta forma de eliminación depende en gran medida de un apoyo normativo adecuado (Bontoux *et al.*, 2000).

En México, el volumen de aguas residuales es de 187 m<sup>3</sup>/s, y sólo 22% recibe algún tipo de tratamiento, lo cual produce 640,000 ton base seca de lodos al año (CONAGUA, 2000); por otra parte, 63% del territorio nacional (1.2 millones de km<sup>2</sup>) es suelo que presenta erosión desde moderada a severa. Algunas ciudades, como Monterrey, Ciudad Juárez y Toluca ya han empezado a reutilizar sus lodos sobre todo como mejoradores de suelos (Barrios y Jiménez, 2002).

Existe información sobre el efecto de la aplicación de biosólidos para la recuperación de bosques y de explotaciones mineras (Weisz, 1988; Medalie *et al.*, 1999), sin embargo, para cultivos como el maíz forrajero en regiones como los Altos de Jalisco, en general se carece de investigaciones formales.

En Chihuahua se aplicaron 10 ton (base seca) de biosólidos por hectárea; los biosólidos estaban estabilizados anaeróbicamente, sobre suelos calcáreos de bajo riesgo, y se reportan incrementos sobre cultivos de algodón y alfalfa de 17% contra fertilización química tradicional (INIFAP, 2002).

La ciudad de Tepatlán de Morelos, ubicada en la región de los Altos de Jalisco, cuenta con una planta tratadora de aguas residuales que opera 24 horas al día, con una capacidad de 180 litros por segundo; esta planta recibe las aguas negras domésticas de la ciudad, y genera en promedio 150 toneladas base húmeda de lodos orgánicos estabilizados por día aproximadamente, los cuales son depositados en excavaciones cercanas a las instalaciones de la planta. Existen dos conjuntos habitacionales circundantes a estos confinamientos que agravan la situación, además de que están por entrar en funcionamiento otras plantas de este mismo tipo en otras localidades del municipio (Capilla de Guadalupe y Pegueros), las cuales generarán mayor cantidad de lodos orgánicos y, consecuentemente, más focos potenciales de contaminación y de riesgos sanitarios para la población.

Si se considera que la vegetación obtiene la mayor parte de sus nutrientes esenciales del suelo, entonces éste es el medio natural para el desarrollo de las plantas, y es la fuente de 15 de los 18 nutrientes esenciales; el aire y el agua proveen los otros tres nutrientes esenciales (carbono, hidrógeno y oxígeno); un nutriente

\* Centro Universitario de los Altos/Universidad de Guadalajara.

esencial es aquel que se define como el elemento que un organismo debe tener para poder completar su ciclo de vida.

Los principales nutrientes esenciales para todas las plantas superiores se muestra en el cuadro 19.1, en el que también se pueden apreciar las cantidades relativas de los nutrientes proporcionados por el suelo y que se encuentran en el tejido seco de la propia planta; el crecimiento de ésta será limitado por el elemento que haga falta o que se encuentre en menor proporción en relación con las necesidades de la planta.

El fertilizante se usa para corregir las deficiencias nutricionales de la planta, y proporciona los nutrientes que el suelo es incapaz de suministrar en cantidades suficientes; es importante señalar que, a pesar de que el fertilizante se aplica al suelo, son las plantas las que son fertilizadas, no el suelo, por lo que no tiene sentido aplicarlos al suelo para otro propósito que no sea obtener los resultados deseados en los cultivos; se debe tomar en cuenta que tanto las deficiencias como los excesos en nutrientes pueden ser dañinos para el desarrollo de las plantas.

**Cuadro 19.1**

**Porcentaje de nutrientes en el tejido seco de la planta**

Elemento	%
N	49
K	34
P	5
Ca	5
Mg	3
S	3
Micronutrientes: (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B, + Cl + Ni +Co)	1

Los nitratos son la forma soluble del nitrógeno, mismos que son rápidamente asimilados por las plantas, lo cual origina altas tasas de crecimiento que eventualmente pueden provocar delgadas paredes celulares en su desarrollo, los nitratos no se encuentran libres en el ambiente, se obtienen del suelo y se pueden perder por evaporación en forma gaseosa, por lo que se deben suministrar con frecuencia y en pequeñas cantidades (Kidder y Espinoza, 2002).

Las características físicas, químicas y biológicas de los biosólidos determinan su capacidad para la aplicación en suelos, según su contenido tanto de metales pesados y de compuestos orgánicos sintéticos, como bacteriológicos (patógenos); estos biosólidos son clasificados en excelentes, buenos o tóxicos y en clase A o B (Johern y Yahner, 1994).

Los biosólidos que son generados en los procesos de tratamiento aeróbico de las aguas residuales municipales presentan características adecuadas para su aplicación como fertilizantes en terrenos de cultivo, dentro de las cuales se encuentran:

1. El alto contenido de materia orgánica, que se puede aprovechar como fertilizante natural.
2. El potencial para incrementar la cantidad y la calidad de los forrajes cultivados.
3. El potencial para reducir la erosión e incrementar la infiltración del agua de lluvia.
4. Es una fuente de nitrógeno útil para el crecimiento de las plantas.
5. Posee potencial para conservar la humedad del suelo y maximizar el aprovechamiento del agua de las plantas, sobre todo en las zonas áridas (Sosebee y Mata González, 1998).

Ramallo, mediante una serie de estudios realizados entre 1985 y 1993 con una gran diversidad tanto de suelos como de cultivos, estableció los principales parámetros que impactan la calidad de los biosólidos utilizados como fertilizantes de suelos:

- Origen, tipo de agua residual y tratamiento específico
- Método de estabilización
- Humedad y madurez a la aplicación (edad)
- Contenido total de metales pesados y microorganismos (patógenos y parásitos)
- Contenido de sustancias sintéticas (tenso activos, organoclorados)

En nuestro país se encuentra en vigor la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, que considera la protección del ambiente a través de la regulación, la especificación y los límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final. Estos lodos son los que provienen del mantenimiento y de la operación de las plantas potabilizadoras de aguas, de las plantas de tratamiento de aguas residuales y de los desasolves de los sistemas de alcantarillado urbano y municipal. Para efectos de esta norma, los biosólidos tienen dos clasificaciones; una, por tipos: excelente y bueno, con base en su contenido de metales pesados; y dos, por clase: A y B, en función de su contenido de organismos patógenos y de parásitos (cuadros 19.2 y 19.3). Adicionalmente, los lodos deben ser analizados periódicamente para comprobar que no sean corrosivos, reactivos, tóxicos o inflamables, según la norma NOM-052-ECOL-1993.

La calidad de los biosólidos se basa principalmente en la concentración de elementos (trazas de metales pesados) y en la eliminación de patógenos (EPA, 2003).

Los biosólidos, antes de ser aplicados al suelo que será cultivado, deben ser clasificados como sigue:

- A. Estar libres de patógenos y ser vendidos o distribuidos en áreas urbanas para paisajes o fertilización de pastos,

**Cuadro 19.2**  
**Clasificación de biosólidos, según el contenido de metales pesados; límites máximos permisibles**

Contenido total	Excelentes (mg/kg base seca)	Buenos (mg/kg base seca)
Ar	41	75
Cd	39	85
Cr	1200	3000
Cu	1500	4300
Pb	300	840
Hg	17	57
Ni	420	420
Zn	2800	7500

**Cuadro 19.3**  
**Clasificación de biosólidos según el contenido de organismos patógenos y parásitos**

clase	Patógenos		Parásitos
	Coliformes fecales nmp / g bs	Salmonella ssp nmp / g bs	huevos de helminto /g bs
A	menor de 1000	menor de 3	menor de 1
B	menor de 2 000 000	menor de 300	menor de 35

nmp: número más probable

bs: base seca

B. Aquellos que han sido tratados, y cuya cantidad de patógenos no fue eliminada en su totalidad. Por lo general son destinados para fines agrícolas y son procesados mediante la digestión aeróbica y anaeróbica, con la estabilización con álcalis (cal) para eliminar patógenos. Después de su aplicación en el suelo, los patógenos son eliminados por la exposición a los rayos solares, por las condiciones de secado, por el pH desfavorable y por los factores ambientales.

Por otra parte, causan gran preocupación los volúmenes actuales de estos lodos, ya que la disposición final de los mismos es muy deficiente; originan tanto fuentes potenciales para la transmisión de enfermedades, como la contaminación de arroyos, ríos y mantos freáticos (Fair *et al.*, 1989), por lo que es conveniente buscar alternativas que ayuden a las autoridades y a los particulares a la reutilización y al aprovechamiento adecuado de estos desechos (Texas Tech University [TTU], 1998).

El funcionamiento de los ecosistemas terrestres ha traído consigo un alto grado de deterioro, principalmente cuando son puntos de acciones desmedidas y sin un plan de manejo inte-

grado que permita la conservación de los recursos naturales y del propio ecosistema (Gutiérrez, 1986).

Weisz (1988) indicó que el manejo integrado de los recursos es una filosofía del manejo del suelo; reconoce que todos los recursos naturales están conectados a través de intrincadas series de interrelaciones; con esta óptica, toda acción o actividad realizada en un ecosistema afecta de alguna manera a sus componentes.

## OBJETIVOS

Con este trabajo se busca cuantificar, de manera general, el efecto de la aplicación de los lodos orgánicos en la producción agrícola para su aprovechamiento y para su disposición final. Específicamente, se pretende:

1. Analizar cuantitativamente los lodos orgánicos generados en el tratamiento aeróbico de los efluentes municipales de la ciudad de Tepatlán de Morelos, Jalisco.
2. Evaluar la capacidad de los lodos como fertilizante natural en los cultivos típicos de la región, como el maíz forrajero (para ensilados).
3. Evaluar los factores de riesgo sanitario (concentración de metales pesados, organismos patógenos y parásitos) en el suelo y en el forraje.

La problemática mundial se centra en la creciente cantidad de lodos generados y sobre todo en su pésima disposición final, lo que ocasiona contaminación y riesgos sanitarios, lo cual impacta directamente en las zonas habitacionales cercanas a los confinamientos, a los mantos freáticos y al ambiente en general (Iturralde, 1994).

## METODOLOGÍA

Los principales elementos que se utilizaron fueron

- a. Terrenos para las pruebas
- b. Maquinaria y herramientas para la adecuación de las parcelas, para la transportación e incorporación de los lodos
- c. Semilla y mano de obra para la siembra
- d. Báscula romana (granataria) para pesar las milpas para el ensilado
- e. Equipo y reactivos de laboratorio para la caracterización de los lodos, el análisis de suelos y el análisis de la cosecha (silo)

En el cuadro 19.4 se resumen las variables analizadas en el trabajo; están agrupadas para simplificar su determinación y para poder generar una evaluación objetiva.

**Cuadro 19.4**  
**Variables utilizadas en la investigación**

Independientes	Concentración de los lodos en las parcelas de siembra
Dependientes	1. Productividad referencial por hectárea 2. Factor de riesgo sanitario; concentración de metales pasados; población de organismos patógenos y parásitos en suelo y cultivos
Fijas	1. Climatología; temperatura, humedad 2. Manejo y labranza 3. Condiciones generales de las parcelas 4. Tipo y variedad de semilla

Los suelos que reciben biosólidos deben tener un pH mayor de 6.5, y se debe considerar una característica tanto de los lodos, como de los terrenos, previendo que las dosificaciones de biosólidos basadas en el N generalmente no agreguen niveles excesivos de metales; sin embargo, el P puede exceder la cantidad requerida por los cultivos, lo que se puede minimizar con un programa de rotación de terrenos (Johern y Yahner, 1994).

La utilización de materia orgánica como fertilizante ha sido una práctica común en varias partes del mundo; en la actualidad, las excretas animales representan una fuente rica en

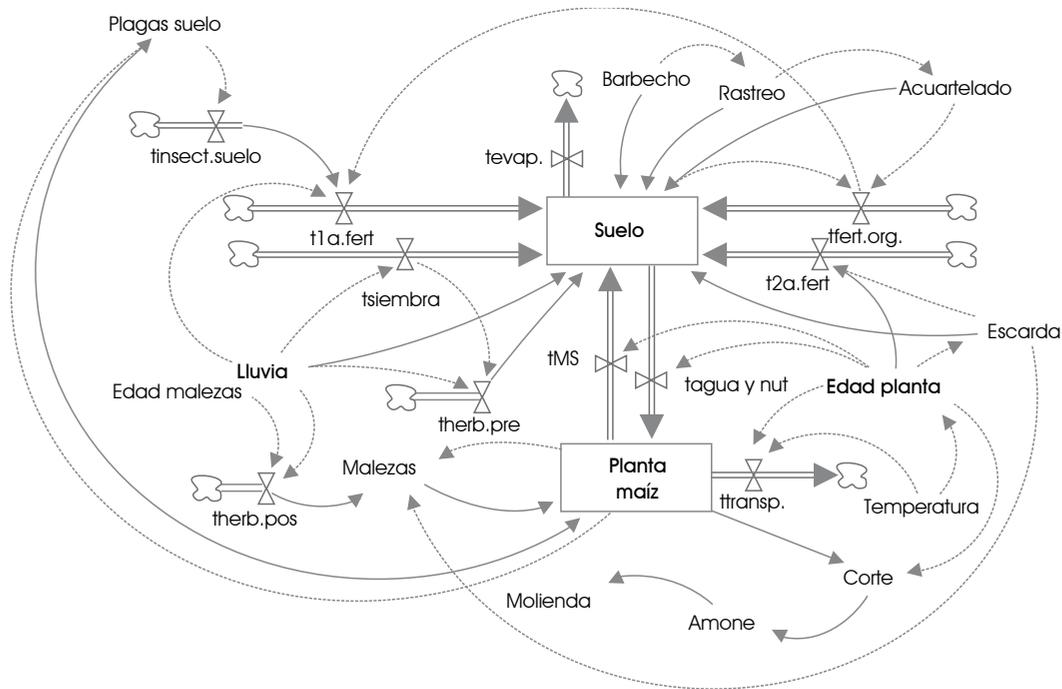
nutrientes para el cultivo de gran variedad de granos y semillas (TTU, 1999).

Desde hace varias décadas, instituciones y universidades alrededor del mundo, como la Universidad Tecnológica de Texas (TTU), han estudiado los efectos en suelos de la aplicación de lodos orgánicos generados por las grandes urbes, sobre todo en los áridos y semiáridos. Los resultados obtenidos en terrenos ubicados al sur de Texas indican básicamente que la cantidad óptima de lodos para la producción segura de forrajes para bovinos es de 15 y 20 toneladas base seca por acre, además de que esta aplicación reduce la erosión, la evaporación del agua, incrementa la infiltración del agua de lluvia, la cual es causa de una buena calidad del agua infiltrada y aumenta la calidad del forraje producido, sin detectar hasta el momento efectos nocivos para los animales consumidores de estos forrajes (TTU, 1998).

En los informes más recientes sobre esta investigación han sido publicados los resultados más completos que proporcionan un excelente punto de referencia para posibles aplicaciones en otras latitudes y bajo condiciones diferentes (Sosebee y Rostagno, 1998).

El presente proyecto fue realizado en terrenos agrícolas disponibles en la zona de Tepatitlán de Morelos, Jalisco, para lo cual fueron elegidos los terrenos cercanos a la planta tratadora de aguas residuales.

**Figura 19.1**  
**Preparación de los terrenos, siembra y cosecha**



Para la definición de las dimensiones de las parcelas de prueba, así como el rango de aplicación de los biosólidos, se utilizaron los antecedentes reportados por Sosebee y Rostagno (1998).

La preparación de los terrenos, así como la siembra, pre-cosecha y poscosecha se realizó a la manera tradicional para maíz de temporal, como se muestra en la figura 19.1, con simbología de Forester (MAPA, 1986).

Los instrumentos de medición fueron cuantitativos, es decir que se midieron las variables con equipos analíticos tanto de laboratorio como de campo.

La semilla de maíz forrajero seleccionada para el desarrollo de la prueba fue la variedad V-1079 de la empresa Semillas Vencedor, y fue proporcionada por Catasmet, Unión de Alteños S. P. R. de R. L.; la semilla contó con las siguientes características y propiedades:

**Características generales de la semilla V 1079:  
análisis químico del grano**

Aplicación	Grano y ensilar
altura de planta	2.8 m
altura de mazorca	1.35 m
días a floración	75
densidad de población para ensilar	85,000 plantas/ha
días a madurez para ensilar	95-105
coloración del grano	amarillo

Análisis químico del grano	
aceite	4.96%
proteína(N x 6.25)	10.39%
almidón	70.39%

## DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Fueron analizados el terreno de prueba y los biosólidos: humedad, cantidad de materia sólida, pH, N disponible el experimento fue realizado como bloques al azar con un arreglo 3, 2 y 2; o sea, tres cantidades de biosólidos depositados en las parcelas; 30, 60 y 100 toneladas de biosólidos base seca por hectárea más el testigo al que no se le agregaron biosólidos (variable independiente); 2 variables dependientes a medir: a) porcentaje de productividad de la cosecha con respecto a la parcela sin biosólidos, y b) factor de seguridad sanitaria en la cosecha, con dos parámetros: 1) nivel de metales pesados en el ensilado, y 2) cantidad de organismos patógenos (cuadro 19.5).

Las variables dependientes a cuantificar son el porcentaje de productividad de las parcelas de prueba y el factor de seguridad sanitaria, que representa el cumplimiento de las normas oficiales, tanto en metales pesados como en patógenos y parásitos.

El tamaño de la parcela era de 8.7 x 1.4 m (12.18 m<sup>2</sup>), con dos surcos a lo largo, al que se sembró la semilla cada 20 cm, para obtener un total de 41 plantas por surco; es decir

**Cuadro 19.6**

**Cálculo de volúmenes de biosólidos requeridos**

	ton biosólidos bs/ha	kg biosólidos bs/m <sup>2</sup>	kg biosólidos bh/m <sup>2</sup>	kg biosólidos bh/parcela
control (testigo)	0	0	0	0
rango agronómico*	30	3	10.83	131.9
rango alto	60	6	21.66	263.83
rango excesivo	100	10	36.1	439.7

bs: base seca

bh: base húmeda

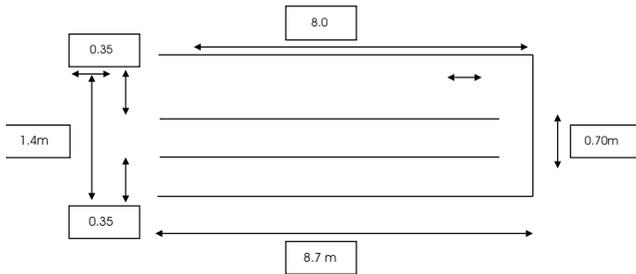
\* estimación del rango agronómico

**Cuadro 19.5**

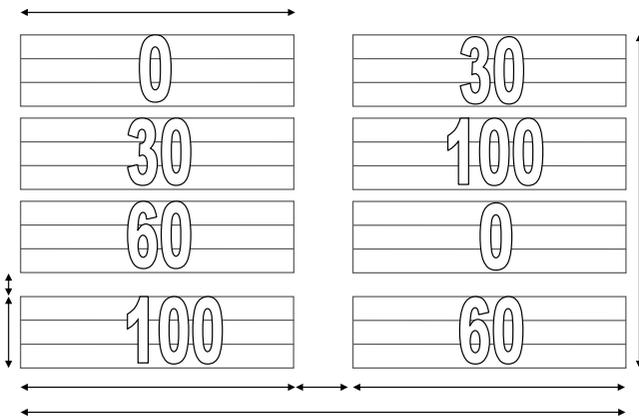
**Variables independientes y dependientes del experimento**

Concentración de lodos (ton bs/ha)	Porcentaje de la productividad de la cosecha en referencia al testigo	Factores de seguridad sanitaria	
		Metales pesados (ppm)	Organismos patógenos y parásitos (nmp/100ml) y unidades/g
0	menor	dentro de la norma	dentro de la norma
30	igual	fuera de la norma	fuera de la norma
60	mayor		
100			

**Figura 19.2**  
Forma y dimensiones de las parcelas de prueba



**Figura 19.3**  
Distribución de los tratamientos y de la repetición



82 plantas por tratamiento, con una repetición. El arreglo de las parcelas de repetición se designó para que no coincidieran con su contraparte de manera lineal.

Se tomaron en consideración los datos, las experiencias y los resultados en la aplicación de lodos y biosólidos en suelos a nivel internacional, sobre todo los del proyecto del rancho Sierra Blanca en el suroeste de Texas, que a continuación se resumen (tomando la humedad promedio de los biosólidos de 72.3%, se estimaron los volúmenes de biosólidos necesarios para cada tratamiento y la cantidad total requerida (cuadro 19.6).

El volumen total de biosólidos base húmeda utilizado para los dos tratamientos fue de 1,670.86 kilogramos.

Si se considera el análisis de los suelos antes de la aplicación de los biosólidos, la cantidad total de nitrógeno que aportan los biosólidos (1.2%), y la demanda del maíz a cultivar (336.55 kg de N/ha), se estima el rango agronómico de biosólidos a utilizar:

volumen biosólidos (rango agronómico) “VB”= (% nitrógeno disponible en los biosólidos “PAN”) (% base seca) (factor conversión)  
 $VB = (1.2)(27.7)(0.0996) = 3.312 \text{ kg}/1000 \text{ l biosólidos.}$   
 $1 \text{ de biosólidos} / \text{ha} = 336.55 \text{ kg de N/ha} / 3.312 \text{ kg PAN} / 1000 \text{ l biosólidos}$   
 $= 102,800 \text{ kg de biosólidos base húmeda/ha (102.8 ton/ha).}$

en base seca se tienen:

$$102.8 (0.277) = 28.47 \text{ ton bs/ha}$$

para fines prácticos, 30 ton bs / ha

para el rango alto se considera el doble del rango agronómico, es decir (R. Agro) (2) = 60 ton bs/ha

para el rango excesivo, 3.33 veces más que el rango agronómico:

$$(R. Agro) (3.33) = 100 \text{ toneladas bs/ha}$$

En las figuras 19.2 y 19.3 se muestran el esquema de la forma y dimensiones de las parcelas de prueba del experimento y la distribución de los tratamientos y la repetición, respectivamente.

La distribución de las parcelas de repetición se designaron de tal forma que no coincidieran con su contraparte de manera lineal; se dejaron espacios suficientes entre cada tratamiento para evitar competencias y facilitar el manejo; el área total utilizada fue de aproximadamente 120 metros cuadrados.

Las técnicas para los análisis físicoquímicos y bacteriológicos para suelos, lodos y silo de maíz fueron las contenidas en la normatividad correspondiente; muchas de estas técnicas se basan principalmente en el “Manual de métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales” de la American Water Works Association.

**RESULTADOS**

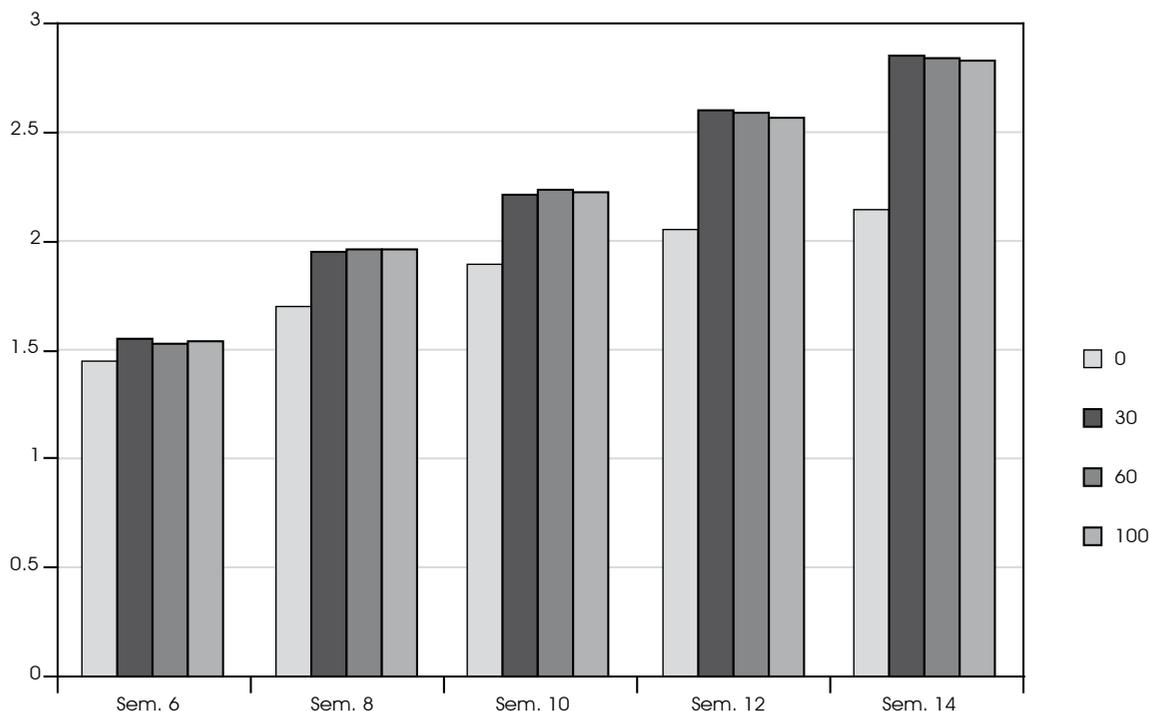
Algunas características generales de los suelos de prueba antes de la aplicación de los biosólidos se pueden apreciar en el cuadro 19.7.

**Cuadro 19.7**

**Características generales de los suelos de prueba**

% arena	41
%arcilla	31
% limo	28
textura	franco arenoso
densidad (g/ml)	1.15
% porosidad	51.7
capacidad de intercambio catiónico (meq/100 g)	10.7

**Gráfica 19.1**  
**Crecimiento gradual por tratamiento (altura de planta promedio en metros)**



**Cuadro 19.8**  
**Análisis de suelos antes y después de la aplicación de lodos**

	Antes	Después
pH	5.3	5.6
materia orgánica (%)	1.52	2.30
Macroelementos (ppm)		
N- nitritos	33.00	48.00
N- amoniacal	12.00	15.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	13.40	14.70
K <sub>2</sub> O	78.00	79.00
Ca	528.00	658.00
Mg	216.00	220.00
Microelementos (ppm)		
Mn	142.00	160.00
Fe	84.00	97.00
Zn	4.10	4.30
Cu	4.50	5.90
B	0.85	0.87
Na	22.00	31.00
S	16.00	15.20

La respuesta de los cultivos de maíz forrajero a la aplicación de los biosólidos fue observada a partir de la sexta semana, cuando se empezó a apreciar el diferencial de alturas de las plantas en los tratamientos; en esa semana las milpas del tratamiento 0 medían en promedio 145 cm aproximadamente, mientras que las de los tratamientos 30, 60 y 100 medían 154 cm, 153 cm, y 154 cm respectivamente. Esto representa de manera general un incremento de altura de casi 6%; dicho porcentaje fue aumentando: en la semana 8, 15% aproximadamente; en la semana 10, 18%; en la semana 12, 27%; y finalmente en la semana 14 llegó hasta 32% (gráfica 19.1). Resulta importante resaltar que el temporal de lluvias correspondiente fue de aproximadamente 920 mm, lo que benefició en términos generales el crecimiento de los cultivos.

El análisis de los suelos antes y después de la aplicación de los biosólidos (cuadro 19.8), muestra un ligero incremento en el pH; los macroelementos aumentaron sus valores; los microelementos también incrementaron sus valores, excepto el azufre. Es importante señalar que se tomaron muestras de los suelos de las parcelas con la máxima concentración de biosólidos para realizar esta comparación después de la cosecha.

El mecanismo de estabilización de los lodos empleados es la homogeneización mecánica con hidróxido de calcio, por lo

**Cuadro 19.9**  
**Análisis bacteriológico de los lodos empleados**

Parámetro	Concentración
coliformes fecales	353 nmp/g bs
patógenos (Salmonella spp)	0 nmp/g bs
parásitos (huevos de helmintos)	0 /g bs

**Cuadro 19.10**  
**Composición de los lodos empleados**

H, %	72.30
pH	10-11
materia orgánica, %	27.70
conductividad eléctrica, mmohs/cm	4.50
cloruros, meq/l	12.80
SO <sub>4</sub> , meq/l	5.55
N total, %	1.20
NH <sub>4</sub> , ppm	76.00
NO <sub>3</sub> , ppm	1.30
P total, ppm	1364.00
P orgánico, ppm	865.00
P disponible, ppm	420.00
K, meq/100 g	0.71
Na, meq/100 g	1.70
Mg, meq/100 g	3.13
Ca, meq/100 g	42.50
capacidad de intercambio iónico, meq/100 g	48.00

**Cuadro 19.11**  
**Metales pesados (base seca) en los lodos empleados**

Metal	mg/kg
Ar	42
Cd	4
Cr	980
Cu	1720
Pb	321
Hg	5
Ni	89
Zn	3150

**Cuadro 19.12**  
**Producción silo**

Tratamiento ton lodos bs/ha	Parcela prueba (kg)	Parcela repetición (kg)
0	133.3	134.8
30	179.4	176.8
60	173.5	168.9
100	165.7	167.6

que presentan pH alcalinos de 10 a 11. El análisis cuantitativo mostró una composición tanto físico-química como bacteriológica tal que, según la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002), éstos se clasifican en excelentes, clase A, con un contenido aceptable de materia orgánica, N total, P total, K, Na, Mg y Ca. El nivel de metales pesados es aceptable para su aplicación en los terrenos de cultivo, ya que presentan niveles mayores en Zn y Cu (cuadros 19.9, 19.10 y 19.11).

En el análisis de datos fue considerada la respuesta del crecimiento al efecto de la aplicación de los lodos, que puede ser optimizada con el análisis de regresión, del cual se desprende que la respuesta se apega a una ecuación cuadrática con un coeficiente lineal positivo y con un coeficiente cuadrado negativo. En otras palabras, el crecimiento de la planta de maíz tiende a aumentar cuando se incrementa la dosificación de lodos; sin embargo no es asintótica, llega a un punto máximo (óptimo), después del cual, al adicionar mayor cantidad de lodos, se produce una disminución en la producción de la biomasa del cultivo (cuadro 19.12).

El análisis de regresión se realizó con el programa Stat Graphics 4.0, sobre la respuesta de productividad (Y); en relación con el rango de aplicación de lodos (rango) es:

$$Y = 411.34 + 3.4 (\text{rango}) - 0.04 (\text{rango})^2$$

R<sup>2</sup> = 97%, LSD (0.05) = 0 – 110 en escala logarítmica resultando como valor óptimo para la producción de este forraje 37 ton de biosólidos bs/ha de terreno aproximadamente.

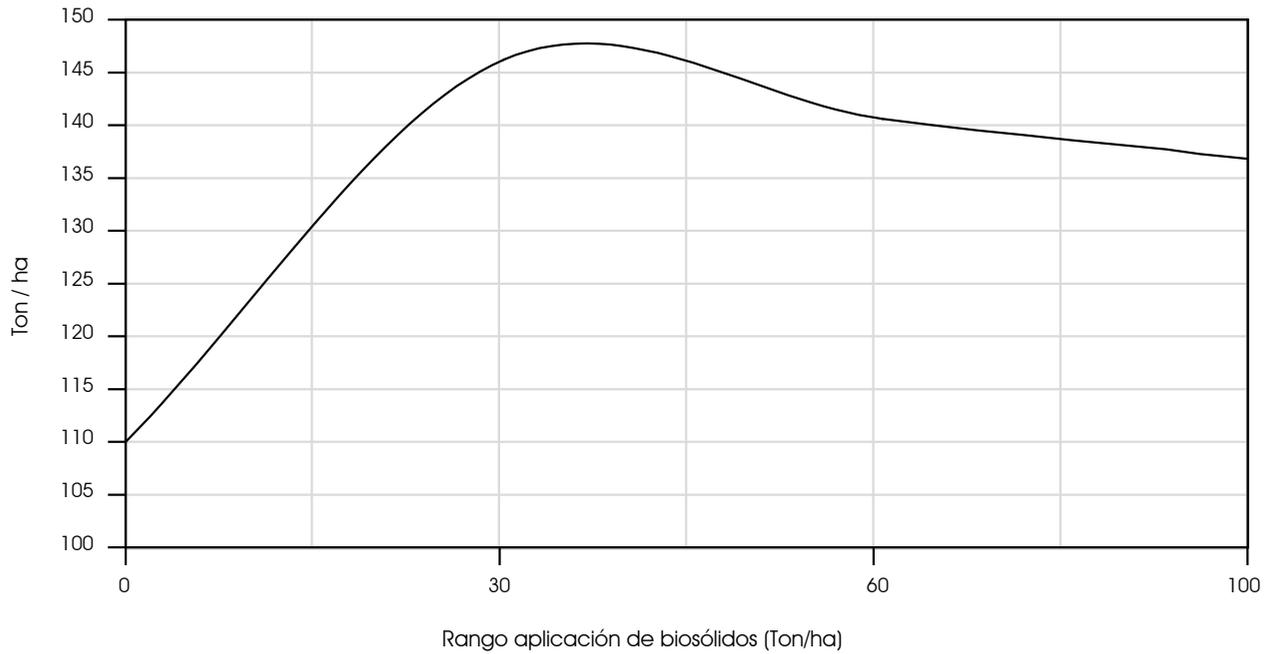
Los resultados muestran que la utilización de los biosólidos mejora sustancialmente el crecimiento y la producción de biomasa del maíz forrajero en la zona de estudio, sin efectos nocivos por la concentración de metales pesados y microorganismos patógenos y/o parásitos. En general, con la adición de lodos a la parcela se observó, respecto al tratamiento testigo, un aumento porcentual de 32.90, 27.78 y 24.36 con 30, 60 y 100 ton de lodos

**Cuadro 19.13**  
**Productividad promedio de silo**

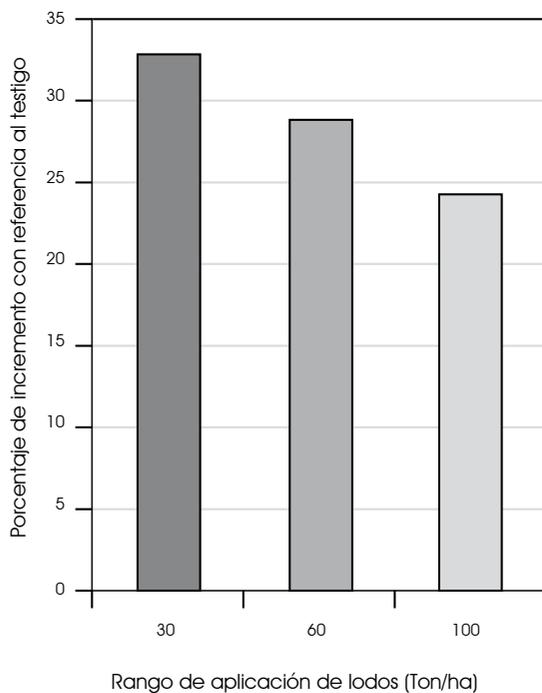
Tratamiento	Suma silo kg	kg/ m <sup>2</sup> *	ton/ha	% Incremento de productividad (en referencia al testigo)
0	268.1	11.00	110.00	0
30	356.2	14.62	146.20	32.90
60	342.4	14.06	140.60	27.78
100	333.3	13.68	136.80	24.36

\* El área total de cada parcela fue de 12.18 m<sup>2</sup>; considerando una repetición, el área total es de 12.18 x 24.36 m<sup>2</sup>; para obtener los kg de silo/m<sup>2</sup> se divide la suma total de silo por tratamiento entre el área total

**Gráfica 19.2**  
Producción de silo por aplicación de biosólidos



**Gráfica 19.3**  
Incremento de producción de silo con la aplicación de biosólidos en relación al testigo (0 ton bs/ha)



**Cuadro 19.14**  
Calidad nutricional del ensilado después de la aplicación de los biosólidos (base seca)

	Porcentaje de lodos aplicado			
	0	30	60	100
humedad, %	6.7	6.45	6.73	6.50
	Base seca			
proteína, %	6.99	9.31	10	10.79
cenizas, %	4.05	4.53	5.32	5.42
grasas, %	5.59	4.82	5.7	4.10
fibra cruda, %	18.91	32.29	24.87	17.69
extracto libre de N, %	57.76	42.60	47.38	55.50
tnd, %	78.35	71.69	74.62	75.73
fda, %	23.28	20.99	20.79	20.28
fdn, %	51.40	51.83	41.54	49.62
mo, %	93.30	93.55	93.27	93.50

tnd: total nitrógeno digerible; fd: fiber detergen neutral;  
mo: materia orgánica; fda: fiber detergen acid

**Cuadro 19.15**  
**Calidad nutricional del ensilado después de la aplicación**  
**de los biosólidos (base húmeda).**

	Porcentaje de lodos aplicado			
	0	30	60	100
proteína, %	2.12	2.15	4.48	3.37
cenizas, %	1.23	1.05	2.39	1.69
grasas, %	1.70	1.10	2.56	1.28
fibra cruda, %	5.74	7.47	11.15	5.53
extracto libre de nitrógeno, %	19.56	11.34	24.26	19.38
tnd, %	25.60	17.92	36.18	25.49
mo, %	30.34	23.12	44.84	31.25

tnd: total nitrógeno digerible; mo: materia orgánica

por ha, respectivamente (cuadro 19.13). Además se aprecia que, al rebasar el valor óptimo de lodos aplicados (37 ton bs/ha), la producción de biomasa disminuye (gráficas 19.2 y 19.3).

La calidad nutricional del forraje cambió sustancialmente con la adición de los biosólidos (cuadros 19.14 y 19.15); en algunos parámetros aumentó en la medida que aumentaba la concentración de biosólidos; y en otros, alrededor de un valor óptimo de éstos.

Las evaluaciones bacteriológicas de los organismos patógenos y de los parásitos tanto en el suelo después de la cosecha, como del ensilado, reportan valores dentro de la norma; de igual manera, el contenido de metales pesados, aunque algunos como el cobre y el zinc se incrementaron, pero permanecen dentro de los límites máximos de la normatividad vigente.

Cabe hacer mención que en parcelas aledañas al lugar donde se realizó el estudio y en condiciones similares (tipo de cultivo, semilla, temporal, lodos), en años anteriores, han sido reportados resultados interesantes; en 2003 se presentó una productividad de 6.68 toneladas de maíz trillado por hectárea sin lodo, y de 9.55 con la adición de aproximadamente 35 ton de lodo base seca por ha, lo que muestra incrementos de hasta 45% en la producción de grano trillado.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los lodos orgánicos generados en el tratamiento de las aguas residuales domésticas contienen compuestos orgánicos aprovechables que pueden servir como nutrientes en el cultivo de las plantas, tales como el maíz forrajero. La concentración más adecuada, segura y económica de los lodos orgánicos utilizados para fertilizar los cultivos de maíz forrajero en el área de estudio es de 37 toneladas de biosólidos bs/ha de terreno, donde la

productividad del silo de maíz aumentó casi 33% con respecto al testigo.

La energía metabolizable del silo de los tratamientos aumentó al incrementarse la cantidad de lodos aplicados; el contenido energético total en el silo seco es mayor que en el húmedo.

Los efectos de la aplicación de lodos sobre los suelos de la misma región fueron:

- Ligero aumento en el pH
- Incremento en macro nutrientes (N como nitritos y amoniacal, P y K), y en la materia orgánica, Ca y Mg
- Aumento en la concentración de micro elementos como Mn, Fe, Zn, Cu, B y Na
- Ligera disminución en el contenido total de S

No fueron detectadas variaciones significativas en el contenido de coliformes fecales, patógenos y/o parásitos, así como en los principales metales pesados, por lo que el factor de seguridad para ambos criterios permaneció dentro de los límites máximos permisibles, según la normatividad oficial vigente.

La calidad nutricional del silo de maíz cosechado también se vio mejorada por la aplicación de los lodos, destacan los siguientes aspectos:

- Incremento lineal en el contenido de proteína y cenizas (minerales)
- Aumentos en % de fibra cruda, % de fibra detergente neutro y % de materia orgánica
- No se detectaron organismos coliformes, patógenos o parásitos, ni trazas importantes de metales pesados

La principal contribución de este estudio es la de ofrecer una alternativa segura y útil para la disposición final de los lodos generados en el tratamiento de las aguas residuales; sin embargo, la aplicación de estos lodos implica la posibilidad de afectaciones en la calidad del forraje producido. Una comprensión integral de los efectos de la aplicación de lodos en cultivos forrajeros debe incluir la cuantificación periódica y consciente de tales efectos, tanto sobre la productividad como en la calidad del forraje así como en las posibles reacciones colaterales del suelo.

Las limitaciones de este proyecto han sido, sobre todo, de carácter práctico, como el uso de un solo tipo de lodo sobre suelos definidos y con un cultivo determinado; sin embargo, resulta bastante interesante continuar con trabajos que generen información precisa sobre el mejor aprovechamiento de residuos tales como los lodos orgánicos.

En resumen, aunque este estudio sólo fue realizado con una sola aplicación de lodos en las parcelas de prueba en temporal de lluvias, fue posible constatar el potencial de fertilización de éstos y los efectos benéficos en los suelos, por lo que se reco-

mienda continuar en este sentido, implementando aplicaciones consecutivas en años posteriores, así como en otras variedades de forrajes como el sorgo, e incluso fuera de temporal, con riego programado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barrios, J., y B. Jiménez (2002), *Manejo de lodos en países en desarrollo: experiencia en México*, México, Instituto de Ingeniería /UNAM, pp.1-5.
- Bontoux, L., M. Vega y D. Papameletiou (2000), *Tratamiento de las aguas residuales en Europa: el problema de los lodos*, Madrid, IPTS.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2000), *Disponibilidad de agua en México. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*, México, CONAGUA.
- Fair, R., H. Geyer y E. Okun (1989), *Ingeniería sanitaria y de aguas residuales*, volumen I. *Abastecimiento de agua y remoción de aguas residuales*, México, Limusa.
- Gutiérrez, C. J. (1986), "Diagnóstico ecológico", en *Metodología de planeación integral de los recursos naturales*, Saltillo, Departamento de Recursos Naturales Renovables/Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Iturralde, L. (1994), "Soluciones de eliminación de lodos residuales", *Contribución a la educación ambiental: el tratamiento de los residuos urbanos*, Cuadernos del Congreso Internacional Educred (ICE), núm. 11.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP] (2002), "Ficha Tecnológica TE-2345-02 por sistema producto. Fitosanidad en cultivos fertilizados con biosólidos estabilizados", México, INIFAP/SAGARPA.
- Johern, B. y J. Yahner (1994), *Land Application of Municipal and Industrial Biosolid*, West Lafayette Indiana, Purdue University.
- Kidder G. y L. Espinoza (2002), *Fertilidad de suelos y el uso de fertilizantes naturales* [en línea], Florida, Instituto de Ciencias Agrícolas y Alimentarias /Universidad de La Florida, <wwwedis,ifas,ufl,edu>
- Medalie, L., W. Bowden y C. Smith (1999), "Nutrient Leaching Following Land Application of Aerobically Digested Municipal Swage in Northern Forest", *Annual Report. Basic and Applied Research on the Beneficial Use of Biosolids on the Sierra Blanca Ranch*, Texas, Texas Tech University.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [MAPA] (1986), *Métodos oficiales de análisis. Tomo III. Plantas, productos orgánicos fertilizantes, suelos, agua, productos fitosanitarios y fertilizantes inorgánicos*, Madrid, MAPA.
- NOM-004-SEMARNAT-2002, "Protección ambiental, lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final" (2002), México, SEMARNAT/SEMADES.
- Sosebee, R. y R. Mata González (1998), "Influence of Biosolids Application on Growth, Nitrogen Uptake, and Photosynthesis of Two Desert Grasses", en *Annual Report. Basic and Applied Research on the Beneficial Use of Biosolids on the Sierra Blanca Ranch*, Texas, TTU
- Stehouwer, R. y A. Wolf (1999), "Quality of Land Applied Biosolids in Pennsylvania", *BioCycle*, vol. 40, marzo, pp. 2-8.
- Sullivan, D. (1998), *Biosolids Recycling in Oregon*, EC 1971, Corvallis, Regn State University.
- Texas Tech University [TTU] (1999), "Sewage Sludge in North Hardwood Forest" (1999), en *Annual Report. Basic and Applied Research and the Beneficial Use of Biosolids on the Sierra Blanca Ranch*, Texas, TTU.
- \_\_\_\_\_ (1998), *Final Report 1992-1998. Basic and Applied Research and the Beneficial Use of Biosolids on the Sierra Blanca Ranch*, Texas, TTU, pp. 4-5.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2003), *Guidelines for Pollutions Concentration of Biosolids*, 40 CFR, part 502, USEPA, EPA 832-F-00-055.
- Weisz, R. (1988), "GIS PIP: The Role of the Geographic Information System in the Plan Implementation Process", en B. M. Kent y L. S. Davis (ed.), *The 1988 Symposium on Systems Analysis in Forest Resources*, USDA Forest Service, California, Asilomar Conference Center, Pacific Grove (General Technical Report RM-161).