



## I-163 - MANEJO DE LODOS RESIDUALES EN MÉXICO

### **Lina Cardoso Vigueros<sup>(1)</sup>**

Bióloga, especialidad en Agrobiología por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Maestría en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México.

### **Esperanza Ramírez Camperos**

Ing. Química de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental (UNAM Facultad de Ingeniería).

### **Violeta Escalante Estrada**

Ingeniería industrial química egresada del Instituto Tecnológico Regional de Zacatepec. Maestra en Ciencias en Ingeniería de Alimentos del Centro de Graduados e Investigación del Instituto Tecnológico de Durango.

### **Gabriela Moeller Chávez**

Químico-Farmacéutica-Bióloga (UNAM, Facultad de Química). Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental (UNAM Facultad de Ingeniería). Dra. en Ingeniería (UNAM Facultad de Ingeniería).



**Dirección<sup>(1)</sup>:** Instituto Mexicano de Tecnología del Agua - Paseo Cuauhnahuac 8532 - Col. Progreso, Jiutepec - Morelos - México - C.P. 62500 - Teléfono y número de Fax: (73) 19-40-00 y 19-45-45 ext. 432 y 430 - Teléfono Directo (73) 19-43-66 - e-mail: [lc Cardoso@tlaloc.imta.mx](mailto:lc Cardoso@tlaloc.imta.mx)

## **RESUMEN**

El propósito del estudio fue analizar el manejo de lodos en las principales plantas de tratamiento de aguas residuales en México, para conocer las potencialidades del uso de los lodos como biosólidos útiles en la agricultura. Las plantas se seleccionaron en función del caudal tratado, por la diversidad de sistemas de tratamiento de agua y lodos utilizados. El estudio se hizo con información proporcionada por los encargados de los sistemas de tratamiento, que incluía información relativa al tratamiento del agua, tratamiento de lodos y sitios de disposición. Para conocer las características de los lodos se analizaron muestras compuestas en su contenido microbiológico y fisicoquímico. El 75% de las plantas estudiadas reciben influentes industriales que no han sido cuantificados, ni caracterizados, pero que impactan los tratamientos y la calidad del agua y lodo. De estas plantas sólo una recibe financiamiento de industriales, la mayoría de las plantas son financiadas por los gobiernos estatales y federal. Los tratamientos de digestión aerobia no alcanzan más del 38% de reducción de STV establecido por la NOM-004, mientras que los tratamientos de digestión anaerobia alcanzan el parámetro de estabilidad requerido, pero la infraestructura para el aprovechamiento del biogás está subutilizada debido a la alta influencia industrial en la calidad del lodo. De acuerdo a la normatividad mexicana (NOM-052-ECOL-1993), tres de las plantas no acreditan la prueba de reactividad del conjunto de pruebas que se conoce como CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y Biológico infeccioso que sirven para determinar si un residuo es peligroso o no), debido a la presencia de sulfuros liberables en concentraciones mayores al límite permisible de 500 mg/kg. De acuerdo a los criterios de la nueva normatividad mexicana, NOM-004, la cual ha sido elaborada para promover el aprovechamiento de los lodos municipales en suelos agrícolas, todos los lodos alcanzan la Categoría B, en función de la concentración de patógenos, lo que significa que los lodos pueden usarse de forma restringida. En relación al contenido de metales pesados seis de las ocho plantas alcanzan la categoría de excelente. Dos plantas, las cuales tienen los mayores volúmenes de descargas industriales exceden el límite en la concentración de algunos metales, por lo que estos lodos no deben utilizarse en agricultura. La calidad agronómica de los lodos es buena debido a su alto contenido de materia orgánica y nutrimentos, sin embargo estos residuos tienen poca estabilidad del componente orgánico, alta concentración de patógenos y algunos metales, para su uso en agricultura se deben implementar prácticas de control que reduzcan el riesgo para el buen crecimiento de los cultivos y protejan la cadena alimenticia. Para solucionar la problemática de manejo de los lodos es necesario minimizar el impacto de las descargas industriales, primero elaborando un padrón de industrias que descargan a las plantas para poder establecer recomendaciones de pretratamiento y establecer criterios regulatorios sobre las descargas a las plantas, esto contribuiría a mejorar la calidad del agua y lodos.

**PALABRAS-CLAVE:** Lodo Residual, Disposición, Aprovechamiento Y Manejo de Lodos.



## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como propósito presentar un análisis del manejo de lodos en las principales plantas de tratamiento de aguas residuales en México para conocer las potencialidades del uso de los lodos como biosólidos útiles en la agricultura. Las plantas fueron seleccionadas en función del caudal tratado, por la cantidad de población beneficiada y también por la diversidad de sistemas de tratamiento de agua y lodos utilizados.

## METODOLOGÍA

El presente estudio se hizo con información proporcionada por los encargados de los sistemas de tratamiento, que incluía información relativa al tratamiento del agua, tratamiento de lodos y sitios de disposición. Para conocer las características de los lodos se analizaron muestras compuestas. Los análisis microbiológicos fueron realizados en el laboratorio de Pruebas del IMTA. Las técnicas microbiológicas utilizadas fueron: coliformes fecales-NOM112-SSA1-1994 (CAMB6-03) y huevos de helminto-NOM-ECOL-001 (CATMPB6-01). Los análisis fisicoquímicos se procesaron en el Laboratorio de Química de Suelos del Colegio de Posgraduados, mediante técnicas descritas en las siguientes referencias: Richards, 1985; Bray y Kurt, 1945; Olsen, et al. 1965; Linsay y Norvell, 1978 y Bradford et al., 1975.

## DATOS GENERALES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO

En México se consumen 240 m<sup>3</sup> por segundo de agua potable, los diversos usos de este líquido generan 170m<sup>3</sup> por segundo de aguas residuales. La infraestructura existente para el tratamiento de las aguas en el año de 1995, fue de 684 plantas de tratamiento con una capacidad instalada de 43 m<sup>3</sup> por segundo. Con esta infraestructura, sólo se trataban alrededor del 25% de las aguas residuales generadas en el país. En el presente trabajo se analizó la información proveniente de ocho plantas de tratamiento. El caudal total tratado por estas plantas es de 9.33 m<sup>3</sup> por segundo, de acuerdo a las cifras citadas anteriormente este caudal representa el 22% del agua tratada en el país. El total de población beneficiada con esta infraestructura es de más de 3 millones de habitantes y un número no cuantificado de industrias que descargan sus aguas a estas plantas. El inicio de operación de todas las plantas es reciente (década de los '90), el tiempo que ha ido adquiriendo auge el tratamiento de aguas en el país. El total del gasto para el que estas ocho plantas fueron diseñadas fue de 14 050 lps, y sólo 9 327 lps, reciben tratamiento. Ninguna de las plantas opera al 100% de su capacidad instalada, según se reporta, debido a que faltan terminar obras de alcantarillado.

### Características de los influentes

Las características de los influentes de las plantas estudiadas, como la demanda bioquímica de oxígeno (>400 mg/l) y la relación entre la demanda bioquímica y la demanda química de oxígeno (DBO<sub>5</sub>/DQO < 0.4), nos muestra el impacto de descargas industriales. A pesar de que estas plantas reciben efluentes industriales en alto porcentaje (>30%), sólo una recibe soporte financiero de los industriales. El pago de las otras plantas lo asumen el gobierno federal y estatal.

### Tipos de tratamiento

El esquema de tratamiento del agua residual es: pretratamiento-tratamiento biológico aerobio-sedimentación-cloración. Una de las plantas tiene tratamiento fisicoquímico, cuyo esquema es: pretratamiento-coagulación+floculación-sedimentación-cloración. Los tipos de tratamiento biológico son: dual, filtros rociadores y lodos activados; lodos activados con oxígeno puro; lodos activados a contracorriente; lodos activados convencional; fisicoquímico; y aeración extendida.

### Eficiencias de los sistemas de tratamiento y cumplimiento con las normas

El diseño de las plantas está enfocado a obtener una remoción principalmente de la carga orgánica representada por parámetros tales como SSV, DQO y DBO<sub>5</sub>, lo cual se logra en todas las plantas, (>80%). La eficiencia lograda en la remoción de nutrientes (nitrógeno total, nitrógeno amoniacal y fósforo total), no es suficiente, ya que los sistemas de tratamiento no fueron diseñados para este propósito. En cuanto a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, los efluentes de estas plantas cumplen en la mayor parte de los parámetros establecidos, menos con la remoción de nutrientes.



## MANEJO Y CARACTERÍSTICAS DE LODOS RESIDUALES

El esquema de tratamiento que siguen las plantas es el siguiente: espesamiento-digestión aerobia-deshidratación (3 plantas); espesamiento-digestión anaerobia (2 plantas); espesamiento-digestión alcalina (1 planta); y espesamiento-deshidratación (2 plantas). Los sistemas de digestión aerobia presentan problemas en la reducción de sólidos volátiles debido a la falta de aeración y los bajos tiempos de retención. Los sistemas de digestión anaerobia utilizados en las plantas tienen altas eficiencias de reducción de sólidos volátiles. El sistema de digestión alcalina, tiene el problema de generación de olores y emisiones de gases tóxicos (amoníaco y ácido sulfhídrico). Sólo tres plantas disponen el lodo en rellenos sanitarios. Cuatro plantas, disponen su lodo a cielo abierto. Una de las plantas lleva sus lodos a terrenos agrícolas, cerca de 200 toneladas diarias. El lodo se distribuye a los agricultores con recomendaciones de uso. En la aplicación de lodos se han detectado los siguientes problemas: olores y vectores; amarillamiento de las hojas y el desarrollo tardío de los cultivos, por sobredosis; rechazo por el uso de lodo en algunos agricultores; atascamiento de vehículos de transporte (camiones de volteo) y aplicación (tractores); mala distribución del lodo en las parcelas por la naturaleza del lodo deshidratado (chiclosa); aplicación en terrenos con más de 5% de pendiente y cercanos a cuerpos receptores; no hay seguimiento y monitoreo por parte del personal de la planta de tratamiento, por lo que no se sabe del impacto ambiental que la aplicación de lodo pueda ocasionar. En la tabla 1, se muestra el manejo y disposición final de los lodos residuales de las plantas en estudio.

### Clasificación de los lodos de acuerdo a la normatividad mexicana

En la tabla 2 se encuentra la clasificación de los lodos de las ocho plantas de acuerdo a la normatividad mexicana.

### Calidad microbiológica de los lodos residuales

Los lodos de las ocho plantas de tratamiento obtienen una categoría B, de acuerdo al anteproyecto de Norma Mexicana NOM-004-ECOL-1998 (Anteproyecto, versión 29/10/99), que pretende establecer las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes para los lodos. El destino final de los lodos de acuerdo a este anteproyecto son los sitios de disposición final o el reuso con restricciones. También alcanzan esta categoría con los valores establecidos en la Norma Americana (40 CFR, Parte 503). La media geométrica más alta se ubicó en un rango de valores de  $5.2 \times 10^6$  a  $16 \times 10^6$  NMP/g de coliformes fecales y el mayor número de huevos de helminto 1.5 a 3.8 hh/g en base seca, lo que puede ser un indicador de un mayor número de enfermedades parasitarias en la región. Las plantas con un mayor porcentaje de influente industrial tuvieron los valores más bajos en la media geométrica de coliformes,  $4.8 \times 10^5$  NMP/g y de huevos de helminto, 0.3-0.85 hh/g, debido a las condiciones inhibitorias provocadas por la alta concentración de contaminantes o al poder sinérgico de éstos.

### Concentración de tóxicos inorgánicos

De acuerdo a los análisis de metales los lodos de seis de las plantas, alcanzan dentro del anteproyecto de Norma Mexicana una categoría de Excelente. Para los lodos de las plantas con mayor influencia industrial, la categoría correspondiente es la de Bueno y una de las plantas excede el límite máximo de plomo. Los metales que se encontraron en mayores proporciones son: cadmio, cromo, plomo y cinc.

### Resultados de análisis CRETIB

Según el análisis CRETIB realizado en los meses de agosto a septiembre de 1999, 3 de las 8 plantas no acreditan los análisis CRETIB, por la prueba de Reactividad, que marca un límite máximo de sulfuros liberables de 500 mg/kg (en base húmeda). Los lodos de todas las plantas, fueron biológicamente infecciosos, a pesar de que no se hayan establecido límites en los parámetros biológicos. Los sistemas de tratamiento que se utilizan para la estabilización del lodo, no incluyen etapas termofílicas que son las que podrían realizar una reducción de patógenos.

### Calidad agronómica del lodo

De acuerdo a los valores de pH obtenidos la mayor parte de los lodos están dentro de un rango de 7.10-8.15, esto significa que los lodos aplicados en los suelos van a provocar problemas de deficiencias en algunos microelementos. El lodo de la planta de tratamiento fisicoquímico tuvo un valor más alto (pH 9.10), con este pH además se presentarán deficiencias de Ca y Mg; la presencia de Na se acentúa y posiblemente se



presenten problemas de toxicidad por boro. La conductividad eléctrica de los lodos se encuentra en un rango de 2.96 a 7.11 mmhos/cm, los ubica como desechos que van de poco salinos, donde los rendimientos de los cultivos muy sensibles se ve afectado, hasta residuos moderadamente salinos donde se reduce el rendimiento en diferentes vegetales. Los lodos tuvieron valores de Cl de 0.051%, 0.041% y 0.04%, los cuales van a tener una afectación ligera a los cultivos. El valor de sulfatos que se obtuvo en los lodos varió dentro de un rango de 0.139-0.152% en peso, el valor más alto va a presentar una afectación ligera en cultivos. Las muestras de lodo analizadas tienen un alto contenido de materia orgánica (29.5-60.4%), esto va a representar uno de los aportes benéficos más apreciables del uso de estos lodos residuales en los suelos agrícolas. Los contenidos de nitrógeno total son altos, (0.44-3.84%). Sin embargo, como sucede con muchos abonos orgánicos, el nitrógeno se encuentra en formas orgánicas que sólo quedan disponibles a las plantas en pequeñas concentraciones, pero que van a estar presentes en varios ciclos agrícolas después de la aplicación. El contenido de fósforo disponible (210-795 ppm), en los lodos es alto de acuerdo a los valores encontrados en suelo (>21 ppm). El potasio se encuentra también con valores altos en los lodos (0.71-12.89 meq/100 g). La presencia de los cationes intercambiables como el potasio, el sodio, el calcio y el magnesio, en altas concentraciones hace suponer que pueden representar un problema de desbalance con otros elementos que se encuentran en el complejo de intercambio, como el fósforo y algunos microelementos. Sobre todo, la presencia de sodio, del cual se obtuvieron valores en los lodos en un rango de 0.43-9.80 meq/100 g, que indica que el lodo es potencialmente sódico, esto puede representar un problema, sin embargo el riesgo de sodificación no es alto debido a que predominan el magnesio y el calcio. Estos elementos también representan un problema cuando se presentan valores altos, los valores para el calcio estuvieron comprendidos en un rango de 1.74-42.50 me/100 g. Los valores para el magnesio en los lodos residuales variaron en un rango de 3.13-36.85 meq/100 g, ver tabla 3.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las plantas reciben influentes de tipo industrial que no han sido caracterizados ni cuantificados, por lo que no se sabe el total de industrias que es beneficiada con la infraestructura de tratamiento. Algunas actividades que es urgente realizar en coordinación con las autoridades estatales e industriales son: Elaborar un padrón de industrias que descargan sus aguas residuales a la planta y cuantificar el volumen y características de las descargas.

Con relación a la eficiencia de los sistemas, la mayor parte de los sistemas de tratamiento cumplen con su propósito de remover carga orgánicas, pero los diseños de estas plantas no están enfocados a remover nutrimentos, por lo que no alcanzan a cumplir las normas para nitrógeno y fósforo. Se hace necesario hacer algunas modificaciones a los sistemas o agregar etapas para la remoción de nutrimentos.

El tratamiento de lodos residuales biológico aerobio no alcanza el parámetro de estabilidad marcado por la NOM-004-versión 29/10/99, (38% de reducción de SSV), porque la cantidad de oxígeno suministrada a los digestores, la agitación y los tiempos de retención no sean los adecuados, lo que podría estar provocando una deficiente estabilización en el lodo. Es necesario por lo tanto implementar programas para la optimización de los sistemas de digestión aerobia. El tratamiento anaerobio de lodos, si alcanza el parámetro de estabilidad establecido por la norma, por lo que se puede concluir que este tipo de sistemas son más eficientes para la remoción de SSV, sin embargo es necesario aprovechar la infraestructura para el uso del biogás producido.

De acuerdo su calidad microbiológica y al criterio de clasificación en función de patógenos marcada en la NOM-004-10/11/99, los lodos pueden ser usados en agricultura con restricciones de uso. Para poder ser usados sin restricciones tienen que someterse a un tratamiento adicional para la reducción de patógenos.

Las características benéficas que los lodos de las plantas podrían aportar a los suelos agrícolas son: alto porcentaje de humedad; materia orgánica; capacidad de intercambio catiónica; alto contenido de nutrimentos mayores; concentración de micronutrimentos adecuada.

Las características que podrían resultar potencialmente contaminantes si el lodo se usa en agricultura son: Lodo poco estabilizado; alta conductividad eléctrica y alto contenido de metales.

**Tabla 1. Generación y manejo actual de lodos residuales.**

Plantas de tratamiento	Tipo de tratamiento de lodos residuales	Eficiencia del sistema Reducción %SSV	Volumen de lodo generado m <sup>3</sup> /día	Disposición o aprovechamiento actuales
1	Floculación y Espesamiento en filtros banda Digestión aerobia Deshidratación en filtro banda	24.9	177.92	Agricultura
2	Espesamiento filtros banda Digestión aerobia Deshidratación filtros banda	<38.0	42.0	Relleno sanitario
3	Floculación y Espesamiento en filtros banda Digestión anaerobia Floculación y deshidratación en filtros banda	56.0	450.0	Relleno sanitario
4	Espesamiento Digestión anaerobia Floculación y deshidratación de lodos en filtro banda	40.0	180.0	Relleno sanitario
5	Floculación y Espesamiento en filtros banda Digestión aerobia Deshidratación filtros banda	<38.0	57.39	Disposición a cielo abierto en terrenos de la planta
6	Espesamiento Deshidratación en filtros prensa	<38.0	40.0	Disposición en tiradero a cielo abierto
7	Encalado Deshidratación en filtros banda	<38.0	80.0	
8	Deshidratación en lechos de secado	<38.0	5.0	
Producción diaria de lodo deshidratado (~20% ST), de las ocho plantas de tratamiento			1031.0	

**Tabla 2. Clasificación de los lodos de ocho plantas de tratamiento de acuerdo a la normatividad mexicana.**

Planta	CRETIB NOM-052- ECOL-1993	Tipo de acuerdo al contenido de metales pesados	Clasificación en función de patógenos y parásitos	Destino final
		De acuerdo al anteproyecto de norma NOM-004-versión 29-10-99		
1	No acredita	E	B	Sitio de confinamiento
2	Si acredita	E	B	Uso restringido
3	No acredita	B	B	Sitio de confinamiento
4	Si acredita	Excede el límite máximo de plomo	B	Sitio de confinamiento
5	Si acredita	E	B	Uso restringido
6	Si acredita	E	B	Uso restringido
7	No acredita	E	B	Sitio de confinamiento
8	Si acredita	E	B	Uso restringido

Tipo de acuerdo a la concentración de metales pesados: E = excelente; B = bueno  
Clase de acuerdo al contenido de patógenos y parásitos: A y B.

**Tabla 3. Calidad agronómica del lodo residual de las ocho plantas.**

Parámetros	Plantas								Valores indicadores	Comentarios
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Humedad %	82.8	80.0	80	80.0	82.8	68.22	72.4	73.24	-	Humedad disponible cuando las partículas del lodo pueden integrarse a la matriz del suelo, incorporando el lodo al suelo y cubriéndolo
Reducción de sólidos volátiles %	24.9	<38	>50	>38	<38	<38	<38<	<38	38	Valor establecido en el anteproyecto NOM-004-ECOL-1998, para demostrar la reducción de la atracción de vectores
pH pasta	7.50	7.7	8.0	7.8	7.10	7.75	9.10	8.15	5.5-7.0	Rango adecuado para la mayoría de los vegetales
C.E. mmhos/cm	2.96	3.4	5.67	7.11	4.67	4.71	4.5	3.4	2.0-4.0	Los rendimientos de los cultivos más sensibles a la salinidad se ven afectados,
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> meq/l (W %)	2.61 (0.0139%)	2.61 (0.0139%)	18.56 (0.098)	28.6 (0.152)	4.37 (0.023%)	8.24 (0.044)	5.55 (0.030)	4.01 (0.022)	% 0-0.1 0.1-0.3 >0.3	Afectación en cultivos: Ligera Moderada Fuerte
Cloruros meq/l (W %)	3.67 (0.0145)	10.26	10.3 (0.04)	7.7 (0.03)	3.67 (0.022%)	n.d. -	12.8 (0.051)	3.3 (0.013)	w% 0-0.05 0.05-0.1 >0.1	Afectación en cultivos: Ligera Moderada Fuerte
M.O.%	60.4	39.8	5.4	47.6	37.0	29.5	29.2	39.0	>4.21 48.24 29.43 48.3	Suelo extremadamente rico. Vacuno Gallinaza Composta de lodo residual
CIC meq/100 g	58	96	43	39	72	53	48	77	>40	Valor en suelo, alto
NT %	1.38	3.84	1.04	0.54	0.44				>0.222	Valores en suelo Rico
NH <sub>4</sub> ppm	1909	939	1795	745	1234	1393	76	762	21-40	Valore alto
NO <sub>3</sub> ppm	776	229	357	198	319					
PT ppm	1275	1112	1422	1492	1109	942	1364	747	-	
P.org ppm	681	546	1207	1143	793	626	865	417	-	-
P disp. ppm	795	384	410	795	717	210	420	427	>21	Valor alto
K me/100 g	5.23	4.13	2.1	1.03	7.10	12.89	0.71	0.90	>0.6 valor alto	No se requiere fertilización adicional de
Na meq/100 g	8.0	6.5	6.30	9.80	5.70	6.70	1.70	0.43	>1	Potencialmente sódico
Ca meq/100 g	3.82	4.87	27.47	23.99	1.74	6.26	42.50	15.92	>10	Valor alto, problemas de disponibilidad de fósforo
Mg meq/100 g	10.43	16.34	18.42	36.85	12.16	8.34	3.13	13.21	>3.0	Valor alto



### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

U.S. Environmental Protection Agency. (1993). Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge (40 CFR Parts 257, 403 and 503) Final Rule and Phased-IN submission of Sewage Sludge Permit Application (Revision to 40 CFR Parts 122, 123 and 501) Final Rule. Excerpted from the Federal Register, Vol. 58 9248-9415. Water Environment Federation. pp 1-157.

Chaney L. Rufus, Potential Effects of Sludge-Borne Heavy Metals and Toxic Organics on Soil, Plants and Animals and Related Regulatory Guidelines(Comunicación personal).

Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-004-ECOL-1998, (versión 29/10/99).