

Calidad sanitaria de lodos sobrenadantes provenientes del sistema piloto de lagunas de estabilización de LUZ

Alexa Senior¹, Beltrán Briceño², Ismenia Araujo³, Ángel Casanova⁴,
Maziad El Zauahre¹, Ligia Toyo¹ y Yudith Acosta¹

¹Laboratorio de Investigaciones y Servicios Ambientales (LISA), Núcleo Punto Fijo, Universidad del Zulia. Punto Fijo, Estado Falcón, Venezuela.

²Facultad de Ingeniería, Instituto de Investigaciones Petroleras de LUZ (INPELUZ).

³Facultad de Ingeniería, Centro de Investigación del Agua (CIA).

⁴Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Agronómicas (IIA).
Universidad del Zulia. Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela.

Resumen

Con la finalidad de determinar si los lodos sobrenadantes del Sistema Piloto de las Lagunas de Estabilización de La Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, cumplen con los estándares establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) se determinó en número más probable en 100 gramos de lodo (NMP/100g.) para Coliformes Totales (CT), Coliformes Fecales (CF), *Streptococcus* Fecales (EF) y *Enterococcus* (E) presentes en dichos lodos, dispuestos en lechos de secado experimentales a diversos tiempos, desde 0 a 9 semanas, observándose valores para lodos frescos, semana cero entre $1,6 \times 10^9$ y $0,203 \times 10^9$ NMP/100g para los CT; $0,15 \times 10^9$ y $0,0021 \times 10^9$ NMP/100g. para los CF; $0,723 \times 10^9$ y $0,173 \times 10^9$ NMP/100g. para los EF y valores que oscilan entre $0,021 \times 10^9$ y $0,016 \times 10^9$ NMP/100g. para los E. Estos valores disminuyeron en orden de magnitud al incrementarse las semanas de secado, observándose que en la semana nueve se alcanzó un promedio de CF de $4,67 \times 10^4$ NMP/100 g, cumpliendo así con las normas para su uso como biosólidos en cultivo de vegetales que se consumen previamente cocidos. Esta investigación representa un aporte fundamental para los sistemas de lagunas de estabilización, debido a que no se disponía de información sobre la calidad microbiológica de lodos sobrenadantes que se originan en los mismos.

Palabras clave: Lodos sobrenadantes, calidad microbiológica, biosólidos, indicadores, lechos de secado.

Sanitary quality in supernatant sludges in the pilot system of stabilization ponds in LUZ

Abstract

With the purpose of determining if the supernatant sludges of the pilot system in the stabilization ponds at The University of Zulia, Maracaibo, Venezuela, fulfill the standards established by the Environmental Protection Agency, the MPN/100g. of Total Coliforms (TC), Faecal Coliforms (FC), Faecal Streptococci (FS), and Enterococci (E) were determined from these supernatants sludges deposited in experimental sand beds at several periods of time. The times were from 0 to 9 weeks, showing values for fresh sludges (0 weeks) between 1.6×10^9 MPN/100g for TC; 1.18×10^9 MPN/ 100g. for FC, and 0.173×10^9 MPN/100g for FS, and values that range between 0.021×10^9 and 0.016×10^9 MPN/100g for E. These values decreased in magnitude as dry weeks increased, and at the ninth week, it was observed that FC had an average value of 4.67×10^4 MPN/100g, showing its compliance with the requirements for its use as a bio-solid in vegetable cultures that are cooked prior to consumption. This research represents a valuable contribution for the Stabilization Ponds Systems due to the lack of information as to the microbiological quality of the supernatant sludges that grow in the ponds.

Key words: Supernatant sludges, microbiological quality, bio-solids, indicators, drying beds.

Introducción

Según Sáenz (1986), los lodos sobrenadantes son una materia flotante que se forma dentro del estanque o que puede ser incorporada a la laguna desde la fuente de aguas negras. La formación de los mismos tiene origen en la deposición de material residual sedimentable en el fondo del reactor. La fracción orgánica de este material es descompuesta por los microorganismos anaeróbicos y transformada en gas (CH_4 y CO_2 principalmente) y ácidos orgánicos. Cuando la temperatura es superior a los 22°C la evolución del gas metano es lo suficientemente rápida para que las partículas de lodo se resuspendan hacia la superficie y se forma el lodo sobrenadante, con propiedades físicas y químicas similares a un lodo fermentado (Marais, 1970; Fair y col., 1993, Carré y Barón, 1987). Este lodo debe ser removido constantemente de las lagunas, pues las bacterias pueden utilizar el mismo como refugio y fuente de nutrientes, además pueden interferir en la penetración de luz hacia la

zona fótica y reducir la carga orgánica, ya que muchos de los flotantes pueden estar constituidos por materia orgánica que ejerce una alta demanda bioquímica de oxígeno (Sáenz, 1986). Los sólidos provenientes de los tratamientos primarios y secundarios son los principales constituyentes de la mayoría de los biosólidos. La Agencia de Protección Ambiental Norteamericana (EPA), describió en 1994 a los biosólidos como residuos sólidos, semilíquidos o líquidos generados durante el tratamiento de aguas residuales domésticas.

El estado de procesamiento en el cual los sólidos provenientes de las aguas residuales llegan a convertirse en "biosólidos", es la estabilización, la cual incluye la biodegradación de los compuestos orgánicos y hace aceptable a los biosólidos para su uso agrícola (EPA, 1994).

Los principales motivos por los cuales los biosólidos no han sido incorporados masivamente a tierras agrícolas, se debe principalmente a la carga microbiana de origen humano y animal que contienen. Sin embargo, se hace énfasis en el hecho de

que las poblaciones microbianas son ampliamente reducidas en cada estado del tratamiento de aguas residuales y producción del biosólido (National Research Council, 1996).

Para eliminar las posibilidades de contaminación a partir de los biosólidos, la EPA (1993) publicó por primera vez los límites que regulan la densidad de microorganismos patógenos en los biosólidos que puedan reusarse beneficiosamente para su aplicación en el suelo. Bajo esta regla, la densidad de coliformes fecales no debe exceder a 1.000 NMP/100g. para los sólidos que correspondan a la Clase A; para los sólidos de la Clase B, la densidad de coliformes fecales no debería exceder a 2×10^6 NMP/100g. Los lechos de secado son un método para deshidratar el lodo residual. Se emplean generalmente en las comunidades con poblaciones pequeñas, no obstante la EPA (1979) ha reportado el logro de lechos amplios, construidos para comunidades bastante pobladas. Según la EPA (1991), el secado es un método estándar de remoción del agua en la producción de biosólido. Los factores climáticos, conjuntamente con la pérdida de humedad, actúan como biocidas y ayudan a estabilizar el lodo para que pueda convertirse en un biosólido, mediante la degradación de compuestos orgánicos y la reducción de microorganismos.

El presente trabajo se realizó con el fin de determinar si los lodos sobrenadantes, de la laguna de maduración I (C_2) del SPLE de LUZ cumplen con las normas de calidad sanitaria establecidas por la EPA para su uso con fines agrícolas, lo que representa una información importante puesto que hasta ahora no se tenía conocimiento sobre la calidad microbiológica de estos lodos.

La inexistencia de antecedentes directos sobre la calidad sanitaria de los lodos sobrenadantes de las lagunas de estabilización, representó una limitante en la discusión del presente trabajo, razón por la cual se considera que los resultados del mismo constituyen un valioso aporte para las futuras investigaciones.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en la laguna de Maduración I (C_2) perteneciente a la serie C del sistema Piloto de Lagunas de Estabilización de la Univer-

sidad del Zulia. Esta laguna presenta una superficie de 1771 m² y un volumen de 2115 m³, el caudal de entrada de la misma ha sido establecido en 4,54 L/s. y el tiempo de retención hidráulico se calculó en 6,94/d (Aldana *et al.*, 1995). Dicha laguna (C_2) fue seleccionada debido a que presentaba una alta acumulación de lodos sobrenadantes en uno de sus vértices en comparación con la laguna de pulimento o maduración II (C_3).

Procedimiento Experimental

Los lodos sobrenadantes se tomaron en cinco puntos diferentes de los vértices de la laguna C_2 , donde el lodo se acumula por acción del viento. Éstos fueron recolectados con un toma-muestras constituido por una malla en forma de cono, donde el sólido es retenido y el agua percola a través de los orificios (Blanco *et al.*, 1998), una vez escurrido el lodo se procedió a pesar en una balanza 8kg del mismo y se colocaron en nueve lechos de secado experimentales. Estos lechos de secado (FIG. 1) fueron elaborados en bandejas de plástico perforadas en el fondo, de 0,40m de largo, 0,32m de ancho y 0,15m de profundidad, a las cuales se les colocó una capa de grava de aproximadamente 3cm, luego una capa de arena de aproximadamente 3cm. y por último, la capa de lodo sobrenadante fresco (8kg). Inmediatamente, luego de haberse agregado el lodo sobrenadante (lodo fresco), se tomó con una espátula estéril cinco porciones de lodo fresco de diferentes sitios del lecho, se colocaron en bolsas plásticas con cierre hermético y fueron trasladadas en refrigeración ($\pm 4^\circ\text{C}$) al laboratorio para sus respectivos análisis físico-químicos y bacteriológicos. Transcurridas nueve semanas de la instalación del primer lecho de secado se procedió a tomar muestras en cada uno (nueve en total) siguiendo los pasos descritos anteriormente.

Procesamiento de las muestras

Se pesaron asépticamente 10g de cada una de las muestras de lodo sobrenadante por triplicado y se colocaron en tres frascos con 90ml de Solución Salina Peptonada (SSP), dilución 10-1 y se agitaron a alta velocidad en una licuadora hasta lograr una mezcla homogénea (Gibbs *et al.*, 1997). A partir de éstas se hicieron diluciones seriadas hasta 10-7, y



FIG. 1. Lechos experimentales de secado.

se realizó la determinación de los indicadores de contaminación fecal: Coliformes Totales (CT), Coliformes Fecales (CF), Estreptococos Fecales (EF) y Enterococos (E), mediante las técnicas estandarizadas de "Fermentación en Tubos Múltiples" (CT y CF), "Tubos Múltiples" (EF y E) descritas por APHA *et al.* (1992).

Análisis físico-químicos

A las muestras de lodo sobrenadantes se le determinaron los siguientes parámetros: sólidos totales, porcentaje de humedad y materia orgánica, siguiendo las técnicas estandarizadas descritas por APHA *et al.* (1992).

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante el paquete estadístico para microcomputadoras SAS versión 6,12. Se utilizó análisis de regresión para establecer las relaciones de tiempo de secado y remoción bacteriológica de los lodos en lecho de secado.

Resultados y Discusión

La discusión de los resultados se realizó tomando en cuenta trabajos sobre lodos residuales obtenidos en otros sistemas de tratamiento, debi-

do a la carencia de fuentes referenciales sobre lodos sobrenadantes generados en Sistemas de Lagunas de Estabilización.

En la Tabla 1 se muestra la densidad inicial de los CT, CF, EF y E en NMP/100g. en los lodos sobrenadantes frescos dispuestos en lechos de secado (valores iniciales).

Se observó un elevado nivel inicial de microorganismos, presentes en el lodo fresco, éste osciló para los CT en $1,6 \times 10^9$ como valor máximo y $0,203 \times 10^9$ NMP/100g. como valor mínimo. Carrington *et al.* (1991) reportaron valores menores de CT por el orden de $1,4 \times 10^6$ NMP/100g. en lodo crudo en una planta de digestión anaeróbica.

Los CF presentaron valores máximo de $0,021 \times 10^9$ y mínimo de $0,015 \times 10^9$ NMP/100g en lodos sobrenadantes. Estos valores son cercanos a los observados por Carré y Barón (1987) quienes determinaron en las capas superficiales del lodo del fondo de las lagunas de estabilización un valor de 10^8 NMP/100g. para los CF. Si se toma en cuenta que, según estos investigadores, las capas superficiales del lodo del fondo se desprenden y dependiendo de su tamaño pudieran contener cierta carga microbiana, se puede decir que el contenido de CF de los resultados obtenidos son ligeramente inferiores con respecto a los reportados por estos autores.

TABLA 1. Densidad (nmp/100 g) de CT, CF, EF y E de lodos sobrenadantes dispuestos en lechos de secado experimentales (valores iniciales).

Muestras	SEM	CT	CF	EF	E
1	9	$1,37 \times 10^9$	$0,021 \times 10^9$	$1,18 \times 10^9$	$0,017 \times 10^9$
2	8	1×10^9	$0,016 \times 10^9$	$0,723 \times 10^9$	$0,016 \times 10^9$
3	7	$0,95 \times 10^9$	$0,015 \times 10^9$	$0,95 \times 10^9$	$0,018 \times 10^9$
4	6	$0,24 \times 10^9$	$0,018 \times 10^9$	$0,723 \times 10^9$	$0,016 \times 10^9$
5	5	$0,203 \times 10^9$	$0,016 \times 10^9$	$0,8 \times 10^9$	$0,018 \times 10^9$
6	4	$0,223 \times 10^9$	$0,017 \times 10^9$	$0,583 \times 10^9$	$0,021 \times 10^9$
7	3	$0,493 \times 10^9$	$0,017 \times 10^9$	$0,193 \times 10^9$	$0,018 \times 10^9$
8	2	$1,6 \times 10^9$	$0,017 \times 10^9$	$0,173 \times 10^9$	$0,017 \times 10^9$
9	1	$1,6 \times 10^9$	$0,017 \times 10^9$	$0,75 \times 10^9$	$0,017 \times 10^9$

Los EF presentaron valores máximos de $1,18 \times 10^9$ y mínimos de $0,173 \times 10^9$ NMP/100g. Gibbs (1995) reportó valores menores de 10^6 para EF presentes en lodos residuales frescos dispuestos en lechos de secado, pero que han sido tratados anteriormente en un proceso de digestión anaeróbica. Pedersen (1981), concluyó que la digestión anaeróbica es capaz de reducir la concentración de microorganismos de 1 a 2 órdenes de magnitud. Tomando en cuenta esta aseveración los valores iniciales de indicadores en la investigación llevada a cabo por Gibbs (1995) podrían ser similares a los registrados en esta investigación.

Los E mostraron valores máximos de $0,021 \times 10^9$ y mínimos de $0,016 \times 10^9$ NMP/100g. en lodos sobrenadantes crudos. Carrington *et al.* (1991) reportaron valores menores de E en el orden de $5,5 \times 10^6$ a $6,1 \times 10^3$ NMP/100g. en lodos frescos dispuestos en lechos de secado, provenientes de digestores anaeróbicos.

Los lodos sobrenadantes fueron analizados semanalmente por un periodo de 9 semanas con la finalidad de observar el comportamiento de los indicadores bacterianos. De igual forma se determinó el porcentaje Peso/Peso (%P/P) de humedad, sólidos y materia orgánica e inorgánica. En las Tablas 2 y 3 se señalan los valores correspondientes a estos parámetros.

En la Tabla 2 se puede observar que el porcentaje de humedad de lodo fresco es elevada, y que el mismo representa un 93,131% de humedad (semana cero). Valores similares fueron reportados por Blanco *et al.* (1998), quienes estimaron un

porcentaje de 93,5% de humedad en los lodos de la misma laguna. Si se comparan los valores de humedad obtenidos en la semana cero (0) con el hallado en la semana uno: 9,730%, se observa una pérdida de humedad de 83,4%. A partir de la semana uno se mantiene la tendencia en cuanto a pérdida de humedad, excepto para las semanas dos y tres, donde se registraron leves aumentos debido a las gotas de rocío durante la mañana, y en las semanas seis y siete, las cuales mostraron un incremento en el porcentaje de humedad, debido a lluvia de la época. Halde (1979) encontró que la curva de secado para los lodos residuales presenta dos puntos críticos discernibles, lo cual indica que existen por lo menos dos mecanismos para la retención del agua en el lodo. Este autor observó que a 25 y a 32°C las tasas de secado cambian marcadamente y que el punto crítico del secado no varía con la temperatura sino con la cantidad de agua intersticial presente en el lodo. De tal forma que deben considerarse muchos factores en la pérdida de humedad de los mismos.

En esta misma tabla puede apreciarse un porcentaje inicial de sólidos de 6,869, el cual ascendió sustancialmente a un valor de 90,27% en la semana uno (1), Blanco *et al.* (1998) reportaron un valor de 6,471% de sólidos totales para lodos frescos provenientes de la misma laguna (C_2). El contenido de sólidos muestra tendencia al aumento excepto para las semanas dos, seis y siete en las cuales se reportaron leves descensos que pudieran explicarse en función del aumento del porcentaje de humedad atribuible al rocío y a las lluvias pro-

TABLA 2. Resultados de parámetros físico-químicos evaluados en lodos sobrenadantes dispuestos en lechos de secado (%p/p).

Muestras	Semana	Humedad	Sólidos
1	9	3,401	96,599
2***	8	9,465	90,535
3*	7	14,035	85,965
4*	6	10,074	89,926
5	5	5,285	94,715
6	4	5,186	94,814
7**	3	11,448	88,552
8**	2	12,673	87,327
9	1	9,730	90,270
10	0	93,131	6,869

*Lluvia **Rocío ***Insectos muertos.

TABLA 3. Resultados de parámetros físico-químicos evaluados en los sólidos pertenecientes a los lodos sobrenadantes dispuestos en lechos de secado (%p/p).

Muestras	Semana	MateriaOrgánica	Materia Inorgánica
1	9	33,202	66,798
2***	8	59,878	40,122
3*	7	56,600	43,400
4*	6	62,253	37,747
5	5	61,847	38,153
6	4	62,898	37,102
7**	3	64,613	35,387
8**	2	61,534	38,466
9	1	62,044	37,956
10	0	62,369	37,631

Lluvia **Rocío ***Insectos muertos.

pías de la época. No obstante, al finalizar el período de secado (semana nueve), el porcentaje de sólidos calculado fue de 96,599 representando el valor máximo, lo cual coincide con el porcentaje mínimo de humedad calculado para la misma semana (3,401).

En cuanto al contenido de materia orgánica (Tabla 3), se registro un valor inicial de 62,369%. Transcurrida una semana de secado se observó un contenido de materia orgánica de 62,041%. Blanco *et al.* (1998) encontraron un porcentaje de ma-

teria orgánica de 63,305 en lodos similares. A medida que se incrementó el tiempo de secado se observó una disminución en los porcentajes de materia orgánica; sin embargo, se registraron algunas variaciones en cuanto a dicha tendencia, en las semanas tres, seis y ocho, lo cual pudiera deberse al incremento del porcentaje de humedad y a la presencia de insectos muertos encontrados en los lechos. Una vez cumplido el tiempo de secado, los lodos mostraron un valor elevado de materia inorgánica 66,798% lo cual hace suponer que los lodos se han estabilizado desde el punto de vista químico, es decir, han alcanzado su mineralización.

En la Tabla 4 se muestran los valores finales obtenidos en cada semana de secado (de 1 semana a 9 semanas) para los indicadores bacterianos.

En la tabla anterior se observa que para la semana uno se obtuvo una reducción de un orden de magnitud para cada uno de los indicadores con respecto a los valores iniciales (Tabla 1), excepto para los CF, los cuales mostraron un ligero descenso ($0,17 \times 10^8$ valor inicial y $0,13 \times 10^8$ valor final). Esta tendencia se mantuvo en la semana dos y tres (10^7 para los CT, 10^6 para los CF, 10^7 para los EF y 10^6 NMP/100g. para los E), el hecho de que no se observó una reducción de indicadores en un orden de magnitud entre la semana dos y tres pudo deberse al ligero incremento del porcentaje de humedad durante las mismas. En la semana cuatro se observó un descenso de un orden de magnitud de 10^6 para los CT, 10^5 para los CF, 10^6 para los EF y 10^5 NMP/100g. para los E. Los valores de los indicadores bacterianos en el lecho de secado se mostraron relativamente constantes entre la semana cinco y siete, con un leve aumento para los CT en la semana cinco. La variación en la concentración de indicadores pudo originarse debido a la alta humedad característica de la época. Ward *et al.* (1997) reportaron incidentes sobre el recrecimiento bacteriano en lodos residuales por acción de la lluvia. Estos autores concluyeron que los microorganismos son capaces de reaparecer eventualmente, en presencia de lluvias y humedad. Los CT se determinaron por el orden de 10^5 , los CF en 10^5 , los EF en 10^5 y para los E 105 NMP/100g. durante la semana cinco (5), seis (6) y siete (7), excepto para los E quienes presentaron 10^4

TABLA 4. Densidad (NMP/100 g.) de CT, CF, EF y E de lodos sobrenadantes dispuestos en lechos de secado experimentales (valores finales).

Fecha	Muestras	SEM	CT	CF	EF	E
08-09	1	9	$1,7 \times 10^5$	$0,467 \times 10^6$	$1,57 \times 10^5$	$0,267 \times 10^5$
15-09	2***	8	$2,3 \times 10^5$	$0,833 \times 10^6$	$2,43 \times 10^5$	$0,467 \times 10^5$
22-09	3*	7	$2,47 \times 10^5$	$1,4 \times 10^5$	$2,7 \times 10^5$	$0,967 \times 10^5$
29-09	4*	6	$3,13 \times 10^5$	$1,7 \times 10^5$	$2,87 \times 10^5$	$1,77 \times 10^5$
06-10	5	5	5×10^5	$2,6 \times 10^5$	$6,87 \times 10^5$	$1,57 \times 10^5$
13-10	6	4	$1,26 \times 10^6$	$0,263 \times 10^6$	$1,03 \times 10^6$	$0,26 \times 10^6$
20-10	7**	3	$2,05 \times 10^7$	$0,03 \times 10^7$	$1,9 \times 10^7$	$0,38 \times 10^7$
27-10	8**	2	5×10^7	$0,0867 \times 10^7$	$2,3 \times 10^7$	$0,8 \times 10^7$
03-11	9	1	$1,367 \times 10^8$	$0,135 \times 10^8$	$0,547 \times 10^8$	$0,12 \times 10^8$

NMP/100g. para la semana siete (7). Durante las semanas ocho (8) y nueve (9) no se presentaron descensos abruptos en la concentración de cada uno de los indicadores. Hagedorn (1980), observó incrementos esporádicos en el nivel de indicadores de calidad microbiológica en lodos secos debido a la presencia de lluvia. El autor defiende la hipótesis de que este aumento puede ser atribuido a la disgregación de células agrupadas en masa o del recrecimiento debido a la presencia de mejores condiciones ofrecidas por una mayor humedad. Sorber y Moore (1987) han reportado valores de comportamientos similares a los encontrados en este estudio, en presencia de lluvia, e indicaron que la falta de referencias se debe a que muchos investigadores, al observar una alta tasa de decaimiento bacteriano cesan la actividad de investigación. Se asume que los investigadores limitan su actividad de investigación al encontrar valores aceptados para la concentración de indicadores bacterianos, sin estudiar los niveles de los mismos por un período de tiempo mayor.

En la última semana de secado (semana nueve) se determinaron para los lodos valores de $1,7 \times 10^5$ para los CT, $4,67 \times 10^4$ para los CF, $1,57 \times 10^5$ para los EF y $2,67 \times 10^4$ NMP/100g. para los E. En esta misma tabla puede apreciarse la reducción en orden de magnitud de la concentración de indicadores, especialmente para los CF quienes son considerados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), 1989 y la EPA, 1993, como los indicadores de calidad microbiológica para lodos residuales.

La reducción observada fue de tres órdenes de magnitud, pues de 10^7 NMP/100g. de CF encontrados en el lodo fresco se redujo a 10^4 NMP/100g., nivel observado a las nueve semanas de secado en los lechos. Stukemberg *et al.* (1994) reportaron valores de CF por el orden de $1,1 \times 10^9$ y $4,3 \times 10^8$ en lodo residual crudo y observaron una disminución de $2,9 \times 10^6$ y $9,3 \times 10^5$ NMP/100g cuando los lodos fueron tratados en digestores anaeróbicos. Otros investigadores como Pedersen (1981) y Reimers *et al.* (1990) concluyeron que después de la digestión anaeróbica los lodos presentan niveles residuales de CF entre 10^5 y 10^6 NMP/100g. Como se ha podido evidenciar, en los lechos de secado pueden obtenerse niveles de indicadores bacterianos por debajo de los encontrados en otros tratamientos.

El análisis estadístico sobre la influencia del tiempo de secado en el proceso de remoción de indicadores bacterianos se llevó a cabo mediante un análisis de regresión. Este modelo presentó un análisis de varianza altamente significativo con un $P > f = 0,0001$.

Los CT presentaron un $R^2 = 98\%$ para la ecuación: $\ln CT = 21,227 - 2,1816 \text{ sem} + 0,12988 \text{ sem}^2$; lo que indica que el 98% de la variación de los CT puede ser explicada mediante el tiempo de secado.

Los CF mostraron un $R^2 = 92\%$ para la ecuación: $\ln CF = 16,681 - 1,3025 \text{ sem} + 0,0776 \text{ sem}^2$, lo que señala que el 92% de la variación lograda para estas bacterias se debe al tiempo de secado.

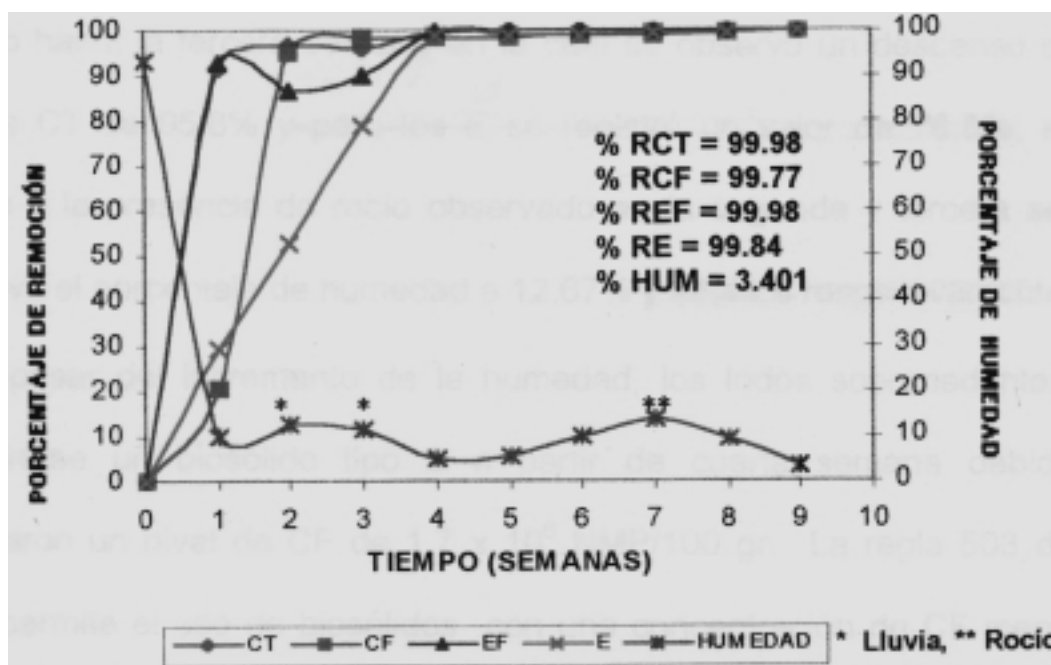


FIG. 2. Porcentaje de remoción de indicadores bacterianos en lodos sobrenadantes dispuestos en lechos de secado.

Los EF presentaron un $R^2 = 97\%$ para la ecuación: $\ln EF = 20,227 - 1,8685 \text{ sem} + 0,1010 \text{ sem}^2$, lo que indica que el 97% de variación de estos microorganismos puede explicarse en función del tiempo de secado.

Para los E se calculó un $R^2 = 97\%$ para la ecuación: $\ln E = 17,1835 - 1,0646 \text{ sem} + 0,0316 \text{ sem}^2$, lo cual señala que el 97% de la variación de estas bacterias puede explicarse en función del tiempo de secado.

En la FIG. 2 se muestra el porcentaje de remoción de los indicadores frente al porcentaje de humedad de los lodos.

Como puede observarse, en la mencionada figura, la remoción de indicadores bacterianos y la humedad presentaron una relación inversa, es decir, a medida que los valores de humedad decrecieron se observó un elevado porcentaje de remoción de indicadores, debido a que la humedad (agua) es un factor importante en el mantenimiento de la integridad celular de los microorganismos. La humedad en el lodo fresco fue muy alta y se ubicó en el orden de 93,131%. Este resultado coincide con lo expuesto por la OMS (1989), quienes afirman que el lodo residual presenta un alto porcentaje de humedad que puede representar más de un 90% de agua.

La semana uno es crítica para el decrecimiento bacteriano debido a la pérdida considerable de humedad, ya que se logró remover el 83,4% de humedad, que a su vez se puede comparar con 91,4% de remoción de CT, 20% para los CF, 92,7% para los EF y 29,4% para los E, tal como puede apreciarse en la Tabla 5. La diferencia de remoción de CF y E con respecto a los otros microorganismos puede ser explicado por el hecho de que éstos son más resistentes a los factores ambientales (Legendre *et al.*, 1984; Davies-Colley *et al.*, 1997).

La tendencia en aumento del porcentaje de remoción de indicadores se mantuvo hasta la semana tres, en la cual se observó (Tabla 5) un descenso del mismo de 95,8% para los CT, esto pudo deberse a la presencia de rocío en las semanas dos y tres lo cual elevó el porcentaje de humedad a 12,67% (FIG. 2). El porcentaje de remoción de los indicadores mostró un comportamiento constante para la mayoría de los indicadores, con variaciones notables para los E quienes en la semana seis registraron un descenso importante en el valor de remoción. Para esta semana se observó una reducción del 99,8% para los CT; 99,0 % para los CF; 99,9% para los EF y 98,8% para los E. Este ligero descenso en la remoción de microorganismos pudo deberse a la presencia de lluvias las cuales

TABLA 5. Porcentaje de remoción de los indicadores bacterianos con relación al tiempo de secado del lodo sobrenadante en lechos experimentales.

Muestras	SEM	RCT	RCF	REF	RE
1	9	99,988	99,778	99,987	99,843
2	8	99,977	99,479	99,966	99,708
3	7	99,974	99,067	99,967	99,463
4	6	99,870	99,056	99,960	98,894
5	5	99,754	98,375	99,914	99,128
6	4	99,435	98,453	99,823	98,762
7	3	95,842	98,159	90,155	78,889
8	2	96,875	94,900	86,705	52,941
9	1	91,456	20,588	92,707	29,412

elevaron el porcentaje de humedad a 10,074% para la semana seis (FIG. 2). En la medida que transcurrió el tiempo de secado de los lodos en los lechos, se observó un incremento paulatino en el porcentaje de remoción. Evison y Tosti (1981) afirmaron que los E exhiben una capacidad de sobrevivir por períodos más largos de tiempo en diversos ambientes, que los coliformes. Tomando en cuenta estas evidencias se puede asociar el ligero descenso del porcentaje de remoción de los E con su alta capacidad de sobrevivencia.

Para la última semana de secado (semana nueve) se determinaron valores de remoción por el orden de 99,9% para los CT, 99,7% para los CF, 99,9% para los EF y 99,8% para los E (Tabla 5). El porcentaje de humedad para esta semana fue de 3,401% (FIG. 2). Davis (1989) expresa que sólo el lodo seco muestra una baja cantidad de bacterias, la cual es satisfactoria para usos agrícolas en cultivo de vegetales, esto corrobora la utilidad de los lechos de secado como alternativa viable para la remoción bacteriana en lodos residuales.

Conclusiones

- El tiempo de secado y la pérdida de humedad son factores que afectan positivamente la remoción de bacterias indicadoras de calidad microbiológica en lodos sobrenadantes dispuestos en lechos de secado.
- Al finalizar el período de nueve semanas de secado los lodos sobrenadantes alcanzan un valor

de $4,67 \times 10^4$ NMP/100g., lo que permite cumplir con la normativa microbiológica de la EPA, la cual exige una concentración de $>2 \times 10^6$ NMP/100g. de CF para lodos residuales que se utilicen como biosólidos. De acuerdo a lo expuesto anteriormente se considera que los lodos sobrenadantes pueden ser empleados de forma segura, desde el punto de vista sanitario, para el cultivo de vegetales que se consumen previamente cocidos.

- El porcentaje de materia orgánica presente en los lodos de los lechos de secado cumplen con los estándares establecidos por la OMS y la EPA (30-60% MO) para este parámetro, lo cual permitiría su uso como abono organo-mineral en suelos empobrecidos.

Reconocimiento

Los autores agradecen al Centro de Investigación del Agua, Laboratorio de Microbiología (Facultad de Ingeniería LUZ), por permitir la realización de este proyecto en sus instalaciones.

Referencias Bibliográficas

- ALDANA, G.; Herrera, H.; Bracho, N. (1995). Selección de un trazador para la determinación de regímenes hidráulicos en reactores. Centro de Investigación del Agua - LUZ. Facultad de Ingeniería. **Rev. Tec. Ing. Univ. Zulía**. 18 (1): 133-122.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, American Water Works Association, Water Environment Federation (1992): **Standard Methods for**

- the Examination of Water and Wastewater.** 18^{va} Edición. APHA, AWWA, WEF. New York.
- BLANCO, E.; Cárdenas, C.; Bracho, N.; Delgado, J.; Saules, L. (1998). Uso de lodos sobrenadantes provenientes de lagunas de estabilización como acondicionador de suelos. XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Lima, Perú.
- CARRÉ, J.; Baron, D. (1987). Effects of maturation on the characteristics of wastewater stabilization pond sludges. **Wat. Sci. Tech.** 19 (12): 169 -175.
- CARRINGTON, E.; Pike, E.; Auty, D.; Morris, R. (1991). Destruction of faecal bacteria, enteroviruses and ova of parasites in wastewater sludge by aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic digestion. **Wat. Sci. Tech.** 24 (2): 377 - 380.
- DAVIES-COLLEY, R.; Donnison, A.; Speed, D. (1997). Sunlight wavelengths inactivating faecal indicator microorganism in waste stabilization ponds. **Wat. Sci. Tech.** 35 (11-12): 219 -225.
- DAVIS, R. (1989). Agricultural utilization of sewage sludge. **A review. Journal of the Institution of water and environmental managements.** 3: 351-355.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (1979). Process design manual for sludge treatment and disposal. U.S. En: Metcalf and Eddy, INC.: **Wastewater Engineering: Treatment, disposal and reuse.** 3rd Ed. McGraw-Hill, Publishing Co. New York. U.S.A.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1991). Municipal wastewater reuse: **Selected readings on water reuse.** Washington; D.C.U.S. Environmental Protection Agency.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (1993). **The 40 CFR Part 503 regulation.** Federal Register U.S.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (1994). **A plain English guide to the E.P.A. part 503 biosolids rule.** Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- EVISON, M.; Tosti, E. (1981). An appraisal of bacterial indicators of pollution in seawater. **Prog. Water. Tech.** 13 (1): 595 - 599.
- FAIR, G.M.; Geyer, J.C.; Okun, D.A. (1993). Purificación de aguas, tratamiento y remoción de aguas residuales. **En: Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales.** Vol. II. 1ra Edición. Editorial LIMUSA, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores. México, D.F.
- GIBBS, R.; Hu, C.; Phillips, P.; Unkovich, I. (1995). Pathogen die-off in stored wastewater sludge. **Wat. Sci. Tech.** 31 (5-6): 91 -95.
- GIBBS, R.; Hu, C.; Ho, G.; Unkovich, I. (1997). Regrowth of faecal coliforms and salmonellae in stored biosolids and soil amended with biosolids. **Wat. Sci. Tech.** 35 (11-12): 269 -275.
- HAGEDORN, C. (1980). Potential health hazard associated with the disposal of sewage sludge on agricultural soils in western Oregon. **Water Resour. Res.** Inst. Oregon University, Corvallis, Oregon.
- HALDE, R. (1979). Sewage sludge characterization by Vacuum drying. **Filtration and Separation.** May/June (1).
- LEGENDRE, P.; Baleux, B.; Troussellier, M. (1984). Dynamics of pollution-indicator and heterotrophic bacteria in sewage treatment lagoons. **Appl. Environ. Microbol.** 48 (3): 586 -593.
- MARAIS, G.V.R. (1970). Dynamic behaviour of oxidation ponds. In: Proceeding of Second International Symposium on Waste Treatment Lagoons. Ed. R.E. McKinney. University of Kansas. p. 15 - 46.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1996). **Use of reclaimed water and sludge in food crop production.** National Academy Press. Washington, D.C. U.S.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. (1989). **Health Guidelines for the Use of wastewater in Agriculture and Aquaculture.** Technical Report Series N° 778. Genova: (smi).
- PEDERSEN, D. (1981). Density levels of pathogenic organisms in municipal wastewater sludge: A literature review. **Water. Eng. Res.**
- REIMERS, R.; Little, M.; Akers, G.; Heriques, D.; Badeaux, R.; McDonnell, B.; Mbela, K. (1990). **Persistence of pathogens in lagoon-stored sludge.** U.S. EPA. Risk Reduction Eng. Lab.
- SAENZ, R. (1986). Consideraciones en relación con el uso de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales. **Hojas de divulgación técnica.** 33 (1).
- SORBER, C.; Moore, B. (1987). **Survival and transport of pathogens in sludge-amended soil: a critical literature Review.** U.S. EPA. Cincinnati.
- STUKENBERG, J.; Shimp, O.; Sandino, J.; Clark, J.; Crosse, J. (1994). Compliance outlook: meeting 40 CFR part 503, class B pathogen reduction. **Wat. Environ. Res.** 66 (3): 255 -263.
- WARD, A.; Stensel, H.; Ferguson, J.; Ho, G.; Hummel, S. (1997). **Preventing growth of pathogens in pasteurized digester biosolids.** Proc. Water. Environ. Fed. 70th annu. Conf. Exposition. Chicago, III.2 p. 107.