

ELIMINACIÓN DE BACTERIAS PATÓGENAS EN LODOS RESIDUALES DURANTE EL SECADO SOLAR

Alma Delia COTA-ESPERICUETA y Carlos PONCE-CORRAL

Instituto de Ciencias Biomédicas, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Apdo. Postal 1595-D, Ciudad Juárez 32300, Chihuahua, México

(Recibido agosto 2007, aceptado junio 2008)

Palabras clave: secador solar, lodos residuales, coliformes fecales, patógenos

RESUMEN

La presente investigación describe el desempeño de un secador solar con respecto a la eliminación de bacterias patógenas contenidas en lodos fisicoquímicos provenientes de la principal Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Juárez. El dispositivo solar fue propuesto como una alternativa técnica factible para la reducción de volumen de las 135 ton de lodos generadas por día en esta planta. El prototipo experimental tipo invernadero estuvo constituido por un área de captación de 4.5 m² y un lecho de secado de 1 m³, además de los sistemas de ventilación, extracción y adquisición de datos. El funcionamiento automático del dispositivo estuvo regulado por las diferencias entre las condiciones internas y externas de las variables de temperatura y humedad. Además, se midieron la radiación solar, el pH y la humedad del lodo. La efectividad del secador fue determinada en términos térmicos y microbiológicos. La pérdida de agua en el lodo durante el tratamiento fue el indicativo de la efectividad térmica. La depuración microbiológica fue cuantificada a diferentes tiempos de residencia, mediante los indicadores de contaminación: coliformes fecales y *Salmonella* spp. La cuantificación de ambas bacterias se realizó a través de la técnica microbiológica de tubos de fermentación múltiple expuesta en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Los resultados térmicos asociados al contenido de agua en el lodo mostraron un decaimiento exponencial hasta lograr el 99 % de reducción de la misma. En lo referente a la efectividad microbiológica, existió dependencia del contenido de las bacterias indicadoras con la cantidad de agua presente en lodo. Para la remoción del 92 % de agua, se verificó la eliminación de coliformes fecales desde 3.8x10⁶ hasta 1.6 NMP por gramo de lodo seco y para *Salmonella* spp. dicha reducción fue desde 1.5x10¹³ hasta 1.9x10³ NMP por gramo de lodo seco.

Key words: solar dryer, sewage sludge, faecal coliforms, pathogens

ABSTRACT

This paper describes the performance of a solar dryer capable of bacterial pathogen removal from the physicochemical sludge of the main wastewater treatment plant for Ciudad Juárez, México. The solar setup was proposed as an alternative solution, technically feasible, for reducing the volume of the 135 tons of sludge produced per day in this plant. The experimental-greenhouse prototype has a 4.5 m² collection

area, a 1 m³-drying bed, and automatic systems for ventilation, extraction, and data acquisition. The automatic operation was controlled by temperature and humidity differences between internal and external conditions. Global solar radiation, pH and water content of the sludge were monitored. The overall effectiveness of the solar dryer was determined by assessing thermal and microbiological performance. Water content in sludge during the process was used as an indicator of thermal effectiveness. The microbiological elimination was quantified at different residence times considering two contamination indicators: faecal coliforms and *Salmonella* spp. Quantification of the pathogenic microorganisms was carried out by the multiple-tube fermentation technique presented in the Mexican regulation NOM-004-SEMARNAT-2002. The thermal results related to the water content showed an exponential decay that achieved up to a 99 % reduction. Regarding microbiological removal effectiveness, there was a strong dependence between the number of bacteria present and the water content in the sludge. As a consequence, with the removal of 92 % of water, it was verified that the elimination of faecal coliforms fell from 3.8x10⁶ to 1.6 MPN per gram of dried sludge; and for *Salmonella* spp. the reduction was from 1.5x10¹³ to 1.9x10³ MPN per gram of dried sludge.

INTRODUCCIÓN

El manejo y la disposición de las 135 ton de lodos generadas al día en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), zona Norte de Ciudad Juárez, representa un problema de salud pública y ambiental. Dicha PTAR se localiza a menos de 400 m del límite internacional con la ciudad de El Paso, Texas, EUA y ha creado conflictos internacionales por olores fétidos emitidos durante el procesamiento del agua residual y el manejo de sus lodos. En su constitución, los lodos presentan biota patógena y compuestos tóxicos (Berset y Holzer 1996, Rico *et al.* 2004, Abad *et al.* 2005). Estos residuos, después de ser mezclados con óxido de calcio, tienen como destino final un predio en las afueras de la ciudad ya que su ingreso al relleno sanitario fue restringido desde 2003 debido a los constantes incendios provocados por la descomposición de la materia orgánica a gases combustibles. De la práctica del secado a la intemperie se derivan problemas por olores fétidos y dispersión de patógenos a causa de los vientos y por organismos vectores de enfermedades. Los grandes volúmenes de lodos generados hacen difícil y costoso su manejo y disposición. Estos residuos están constituidos de 60 al 95 % en volumen de agua dependiendo de la tecnología usada. Los métodos de concentración, acondicionamiento, eliminación de agua y secado son usados principalmente para remover humedad de los sólidos. En lo particular, en Ciudad Juárez las dos PTAR principales, las plantas Norte y Sur, no cuentan con sistemas para la completa deshidratación de lodos. De acuerdo con la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad

Juárez, en la actualidad alrededor del 80 % de las aguas residuales del Municipio son tratadas. Para ciudades en desarrollo es primordial maximizar el uso de agua tratada mediante proyectos integrales y sistémicos que incluyan un plan adecuado de manejo, reuso y disposición de los lodos generados, ya que los grandes volúmenes de desecho podrían suscitar un problema ambiental de ecosistemas y salud humana de gran magnitud.

Diversos estudios han demostrado el potencial de los lodos provenientes de las PTAR por su contenido de macronutrientes para la flora, especialmente nitrógeno y fósforo y por las sustancias orgánicas que mejoran las características fisicoquímicas del suelo (Cooker 1983, Abad *et al.* 2005). Sin embargo, la utilización de éstos sin precaución puede ocasionar problemas a la salud humana y al ambiente. Los lodos residuales están compuestos de altas concentraciones de bacterias, virus y parásitos (US EPA 1989, 1999, Carrington 2001, Sahlströma *et al.* 2004), además de compuestos orgánicos (Ottaviani *et al.* 1993, Abad *et al.* 2005, Mantis *et al.* 2005) y metales pesados (Bell *et al.* 1991, Jackson y Alloway 1991, Ottaviani *et al.* 1993, Díaz Aguilar *et al.* 2001, Mantis *et al.* 2005, Bose y Bhattacharyya 2008). La Unión Europea promueve el uso de lodos de las PTAR en actividades agrícolas bajo estricta verificación de la calidad en términos de concentración de metales pesados y compuestos orgánicos ya que éstos podrían afectar adversamente el ambiente (Langenkamp y Part 2001). En México, las especificaciones técnicas para el aprovechamiento de lodos residuales y biosólidos están contempladas en la Norma Oficial Mexicana NOM-004 (SEMARNAT 2002); no obstante, ésta no

incluye indicadores de contaminación por compuestos orgánicos tóxicos.

Para disminuir los costos de manejo y disposición de los grandes volúmenes de lodos residuales generados diariamente, se emplean primero métodos mecánicos con los cuales es posible remover del 20 al 40 % del agua contenida; más allá de estos porcentajes, la remoción de agua sólo es posible por medio de métodos térmicos (Metcalf y Eddy 2003), implicando grandes consumos de combustible y emisiones de gases invernadero hacia la atmósfera. Luboschik (1999) reportó el diseño tecnológico y además los costos de inversión y operación de un secador solar para lodos residuales. El análisis económico de la operación del sistema demuestra los bajos costos de mantenimiento y energía consumida. La eficacia del secador resultó en una evaporación volumen de agua de 700 a 800 kg por m² y por año. Haralambopoulos *et al.* (2002) utilizaron un destilador solar tipo caseta para eliminar agua de un lodo residual producido durante el proceso de lodos activados. Durante este estudio, cinco litros de lodos fueron procesados por cinco días. El análisis del destilado cuantificó la presencia de sólidos volátiles suspendidos, lo cual indicó la imposibilidad del reuso de éste. Bux *et al.* (2002) desarrollaron un secador solar con aireación y mezclado continuo operado a baja temperatura. Durante este estudio se encontró que la concentración de sólidos totales aumentó desde 3 hasta 93 % en peso en 64 días. El consumo de energía para evaporar una tonelada de agua fue de alrededor de 25 kWh, 78 % menor a la energía consumida durante el procesamiento convencional de secado. Salihoglu *et al.* (2007) calcularon un tiempo de amortización de cuatro años de la tecnología de secado solar aplicada a los lodos residuales generados en la ciudad de Bursa en Turquía. Además, el contenido de coliformes fecales fue determinado para los 45 días del procesamiento, con una reducción de las bacterias patógenas desde el orden de 10⁷ hasta 2x10⁶ UFC por gramo seco. Al agregar 15 % de óxido de calcio a los lodos antes del secado, menos de 1000 UFC por gramo seco fueron cuantificadas en sólo cinco días.

El secador solar utilizado en este estudio es propuesto como un método viable tecnológicamente para la eliminación del agua contenida en los lodos residuales y la reducción del alto contenido de microorganismos patógenos. Los indicadores patógenos de contaminación cuantificados en este estudio fueron coliformes fecales y *Salmonella* spp. Ambos fueron cuantificados dinámicamente mediante la técnica microbiológica de tubos de fermentación múltiple o técnica del número más probable (NOM 2002)

durante el proceso de secado solar, utilizando un dispositivo automatizado tipo invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dispositivo experimental de secado

El dispositivo solar está construido de una estructura tipo invernadero de hierro forjado, revestida por un material transparente y acanalado. El dispositivo cuenta con un área de secado de 3×1.5 m² y tiene 1.9 m de altura en el eje central longitudinal. Además, cuenta con una charola para el material a secar de 1 m³ la cual se desliza sobre rodillos para facilitar su acceso. Esta particularidad se incluyó debido al carácter ofensivo del material bajo estudio. El sistema de ventilación está compuesto por dos ventiladores de 1/4 hp y un extractor barométrico de 1/3 hp. Para el monitoreo de variables y la actuación de los sistemas de ventilación y de extracción, el secador posee un sistema automático de adquisición de datos (SAD) y un sistema de control (SAC).

El secado efectivo de lodos fue demostrado al utilizar destiladores con una cámara de apenas 0.39 m de altura (Haralambopoulos *et al.* 2002); así también, con dispositivos a gran escala con 2.5 m de altura (Salihoglu *et al.* 2007). Por razones prácticas de manejo del material, el sistema debe ser de una altura tal que haga posible introducir equipo para la recolección del material. El mecanismo térmico principal del secador es la difusión del vapor de agua desde la superficie del lodo hacia el aire no saturado en la cámara del secador. La variable crítica a controlar mediante la activación del extractor, para la remoción efectiva del agua, es la humedad absoluta del aire contenido en la cámara; ésta debe ser menor a la correspondiente en el punto de saturación para cada temperatura experimentada. Entre más alejada de la saturación se encuentre, mayor transporte de masa será experimentado.

El funcionamiento del secador se inicia cuando la radiación solar ingresa al dispositivo a través de su cubierta transparente y gran parte de dicha energía es absorbida por el lodo. Debido al efecto invernadero, causado por la selección de materiales y la hermeticidad del sistema, la temperatura del lodo y la del aire interno tienden a incrementar. Dicho aumento de temperatura propicia la difusión del agua desde la superficie del lodo hacia el aire contenido en la cámara. La fuerza impulsora del secado corresponde a la diferencia de presiones de vapor del agua entre el lodo y la cámara. La presión de vapor en el aire se eleva cuando aumenta la cantidad de agua contenida en éste. Para acelerar el secado se debe impedir el

equilibrio entre las presiones de vapor; por lo tanto, el aire debe ser evacuado. Entre más alejado se encuentre el aire de la saturación de agua, mayor es el potencial para el transporte de masa. Por otro lado, entre más caliente se encuentre el sistema, el transporte de vapor es mayor. Para evitar estratificación de temperatura y humedad, el sistema cuenta con un sistema de ventilación. El aire húmedo es evacuado mediante la acción de extractores y la reposición de aire seco mediante la apertura de ventilas. Cuando el sistema se encuentra libre de humedad, éste regresa a su estado de sistema cerrado respecto a masa.

Consideraciones del secado

Para el secado efectivo de los lodos, la humedad absoluta dentro de la cámara debe mantenerse alejada del punto de saturación para todas las temperaturas experimentadas. La meta teórica es maximizar la razón variable de evaporación durante el día mediante la actuación del sistema de extracción. Por el carácter dinámico del proceso solar, las variables externas de temperatura y humedad también son de importancia en la búsqueda de dicha razón; por lo tanto, éstas son también monitoreadas continuamente. Diferencias entre condiciones internas y externas de humedades absolutas y temperaturas son predeterminadas en el controlador para la actuación de los sistemas de ventilación y extracción.

Arquitectura del secador: hardware y software

En lo general, el secador solar tiene cinco componentes importantes: 1) medición y adquisición de datos, 2) escalamiento, 3) control lógico del proceso, 4) actuación respecto a las mediciones y 5) bitácora de información.

Se utilizó un Fieldpoint CFP-2020 de National Instruments para llevar a cabo el control, la adquisición y el almacenamiento de datos; éste fue seleccionado por ser modular, flexible y portátil, características que lo hacen de fácil reconfiguración.

Para el monitoreo de las variables se utilizaron los sensores Humirel HTM2500 para determinar humedad relativa y temperatura; este sensor no se ve afectado por la inmersión en agua, posee alta estabilidad, instantánea desaturación después de largos periodos de saturación, presenta alta resistencia a productos químicos, y rápido tiempo de respuesta. La señal del sensor Humirel genera dos voltajes como respuesta a la humedad relativa y la temperatura. La salida típica de voltaje de 1 a 4 V CD desde 0 a 100 % de humedad relativa con una fuente de 5 V CD, permite utilizar una tarjeta de adquisición CFP-AI-112 de National Instruments la cual se conecta directamente

al Fieldpoint. Para la medición de la temperatura, se realizó un acondicionamiento de la señal debido a que las resistencias de salida se encuentran entre 170,000 y 2130 Ω para un rango de temperaturas entre -30 hasta 60 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente. El acondicionamiento consistió en transformar la diferencia de resistencia a una de voltaje. Para cambiar el voltaje se utilizó un divisor de voltaje con dos resistencias de 10 k Ω y una fuente de 5 V CD.

El escalamiento para la temperatura se llevó a cabo al convertir la señal amplificada con voltajes de salida en el rango de 1 a 5 V CD a unidades de temperatura. Las curvas de calibración se realizaron a condiciones de operación reales donde, para el sensor interno, las temperaturas variaron desde 15 hasta 65 $^{\circ}\text{C}$ y para el sensor externo, las temperaturas variaron entre 18 y 36 $^{\circ}\text{C}$. Ambas curvas presentaron alta correlación lineal. El escalamiento para los sensores de humedad relativa es propuesto por el fabricante e incluye un factor de compensación por temperatura.

En lo que corresponde al software, se utilizó LabVIEW 7.1 para la generación automática de información y para el control del prototipo debido a que éste es el entorno de programación nativo para el Fieldpoint. La humedad absoluta fue calculada a partir de la relación de datos psicrométricos de humedad relativa y temperatura, mediante interpolaciones programadas de segundo grado en función de las dos variables. Para lograr una alta razón de evaporación durante el día, el controlador acciona el extractor barométrico para la salida del aire húmedo y lo reemplaza mediante la apertura de una persiana motorizada, la cual permite la entrada de aire seco. Para el control de estos motores se utilizó una tarjeta de salida analógica CFP-RLY-423 de National Instruments conectada a los dispositivos a controlar.

La relación entre la geometría del secador, los diferentes mecanismos de transferencia de calor y masa involucrados y el carácter dinámico del proceso, propician que las condiciones internas no sean homogéneas, con la presencia de zonas calientes y frías. Como se mencionó antes, la actuación del extractor depende tanto de las variables de temperatura como de la humedad, las cuales son medidas en un punto caliente del dispositivo. Cuando la temperatura en este punto es 10 $^{\circ}\text{C}$ mayor o igual a la temperatura ambiente, el sistema de control provoca la homogeneidad con la activación de ventiladores. Este requerimiento de temperaturas junto con una diferencia de humedades absolutas de 38 g de agua por kg de aire seco, accionan el extractor. Dichos valores de control son de fácil reprogramación.

Análisis dinámico de lodos durante el secado

El lodo residual utilizado para el experimento de secado fue facilitado por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez. Se tomaron 200 L de los fondos resultantes de los procesos de coagulación y precipitación, sin deshidratación, durante el tratamiento primario avanzado de la Planta Norte de Tratamiento de Aguas Residuales. El material fue transportado hasta el lugar de experimentación en dos tambos de plástico de 100 L debidamente sellados. Equipo de seguridad fue utilizado durante el manejo de los lodos debido a sus características microbiológicas nocivas.

La determinación microbiológica dinámica de los lodos durante el secado solar fue realizada a un conjunto de muestras tomadas a diferentes tiempos de residencia. El tiempo de inicio del experimento fue a las 11:20 h del 30 de junio de 2007. Una mezcla compuesta de 1 kg fue colectada de seis puntos distribuidos en el lecho de secado. Las muestras fueron tomadas en frascos pyrex de 500 mL, con palas de plástico previamente esterilizadas y éstas fueron transportadas inmersas en hielo para su análisis.

Las técnicas para cuantificación *Salmonella* y de coliformes fecales representan varios días de análisis y costos elevados. La capacidad de reproducción y sobrevivencia de estas bacterias depende principalmente de condiciones de contenido de agua, pH y temperatura.

Contenido de humedad: el contenido de agua en el lodo durante el proceso solar fue obtenido mediante las diferencias de peso entre la muestra compuesta y la del material deshidratado remanente, después de ser procesado a 105 °C hasta lograr peso constante.

Determinación de pH: para la determinación del pH del lodo residual se obtuvo un extracto líquido al colocar 500 g del material y 100 mL de agua destilada en un embudo Büchner utilizando un papel filtro Whatman # 40; el embudo se conectó a un matraz kitazato de 500 mL y fue acoplado a una bomba de vacío. Se filtró la muestra por 5 h hasta colectar 100 mL del extracto. Se midió el valor de pH con un potenciómetro Termo Corning (Bartels y Bigham 1996).

Identificación y cuantificación de *Salmonella*: la presencia de *Salmonella* y el conteo consistió fundamentalmente de enriquecimiento, aislamiento e identificación mediante la técnica de fermentación múltiple o del número más probable presentada en el Anexo IV de la NOM-004 (SEMARNAT 2002).

Los medios selectivos utilizados para la etapa de enriquecimiento fueron caldo de tetrionato (BD Bioxon, Lote 3287805) y selenito cistina (Difco, Lote 5264016). Se realizaron diez diluciones de la muestra original en el caldo de tetrionato desde 10^{-1} hasta 10^{-15} . El proceso se realizó por triplicado para el control de calidad del análisis. Se llevó a cabo el aislamiento de los microorganismos sospechosos de *Salmonella* en los agares *Salmonella Shigella* (Difco, Lote 6255238) y verde brillante (Difco, Lote 7043032) para su posterior prueba bioquímica en agar triple azúcar y hierro, TSI (Difco, Lote 6361420) y con agar hierro lisina, LIA (Difco, Lote 6226067). Se empleó la técnica de número más probable para la cuantificación de la bacteria (Clesceri 1998).

Identificación y cuantificación de coliformes fecales: la presencia y el conteo de coliformes fecales consistió en el aislamiento directo de los lodos mediante la utilización del medio selectivo lactosado A-1 (BD Difco, Lote 6299490) (Clesceri 1998). Se realizaron diez diluciones de la muestra original en agua de dilución desde 10^{-1} hasta 10^{-10} . El proceso se realizó por triplicado para el control de calidad del análisis. Una vez identificada la bacteria, se contó la concentración mediante la técnica del número más probable (Clesceri 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las **figuras 1 y 2** se presentan la humedad absoluta del aire dentro de la cámara de secado en función del tiempo bajo condiciones distintas en el control automático. El objetivo de dichas pruebas

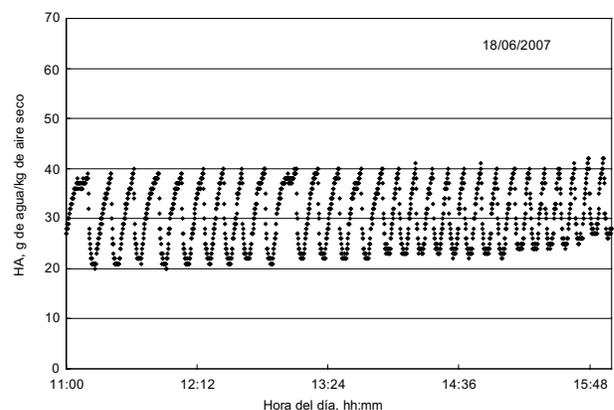


Fig. 1. Humedad absoluta alrededor del mediodía dentro del secador solar, sistema de extracción a ΔT 10 °C, tiempo de extracción 4 min y ΔHA 30 g de agua por kg de aire seco

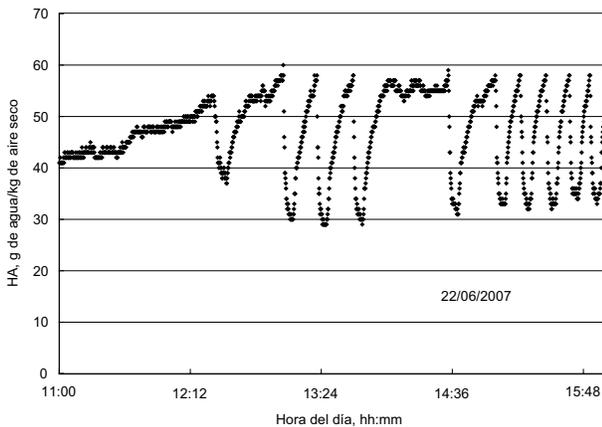


Fig. 2. Humedad absoluta alrededor del mediodía dentro del secador solar, sistema de extracción a ΔT 10 °C, tiempo de extracción 4 min y ΔHA 45 g de agua por kg de aire seco

térmicas, previas al experimento real con lodo residual de la PTAR, fue encontrar las condiciones de control que favorecieran el transporte de masa desde el lecho de secado hacia el aire, optimizar la cantidad de agua extraída del sistema y maximizar la temperatura dinámica interna de operación. Para las dos experiencias, se vertió medio metro cúbico de agua en la charola de secado por la noche. La **figura 1** es el resultado de preestablecer diferencias mínimas de humedad absoluta (ΔHA) y de temperatura (ΔT) entre las condiciones internas del secador y las del ambiente de 30 g de agua por cada kg de aire seco y 10 °C, respectivamente, para la activación del sistema de extracción. El proceso de extracción consistió de 2.5 min con el extractor encendido, seguido por la operación del extractor por 1.5 min junto con una ventila motorizada para reposición de aire seco. Después de la remoción del aire húmedo, se obligó al sistema a permanecer cerrado por cuatro minutos para alcanzar de nuevo condiciones adecuadas de extracción. La **figura 2** fue obtenida al preestablecer 45 g de agua por kg de aire seco y ΔT de 10 °C con la misma operación de extracción. En las dos figuras se debe observar que cada vez que disminuye rápidamente la humedad es debido a que el sistema de extracción fue activado. La energía global incidente para las dos experiencias fue de 7.1 y 5.6 kW-h/(m²-día) y la totalidad de agua extraída cuantificable por el SAD fueron de 699 y 367 g de agua por kg de aire seco. Las condiciones ambientales para ambos días de experimentación fueron similares. Los valores promedio registrados para temperatura ambiente fueron de 32 y 28 °C; para humedad relativa fueron de 10 y 19 %; y para velocidad de viento fueron de 9 y 4 m/s. Esta última

variable influye fuertemente en las pérdidas de calor de la cámara de secado. Las extracciones indican que, de considerarse una dependencia lineal entre radiación incidente y cantidad de agua extraída, el segundo experimento es 32 % menos eficiente que el primero. Esto se debe a que el transporte de masa neto fue frenado, ya que en el sistema de control se preestableció una ΔHA demasiado amplia, lo cual provocó que el aire en la cámara estuviera cerca de las condiciones de saturación. Condiciones más adecuadas fueron observadas para valores intermedios de ΔHA .

La **figura 3** presenta la variación de humedad absoluta y temperatura interna como resultado de las operaciones discontinuas de extracción. Cuando el sistema se encuentra cerrado, la rapidez en el aumento de temperatura y humedad son dependientes mayormente de la incidencia de radiación global; mientras que, cuando el sistema de extracción se encuentra activado, la temperatura disminuye un grado por cada minuto. Los valores de ΔHA y ΔT de operación precisados en las experiencias reales con los lodos residuales fueron de 38 g de agua por kg de aire seco y 10 °C. Para favorecer altas temperaturas que sean capaces de inactivar microorganismos patógenos en los lodos, después de la operación de extracción se sometió al sistema bajo el efecto invernadero por diez minutos.

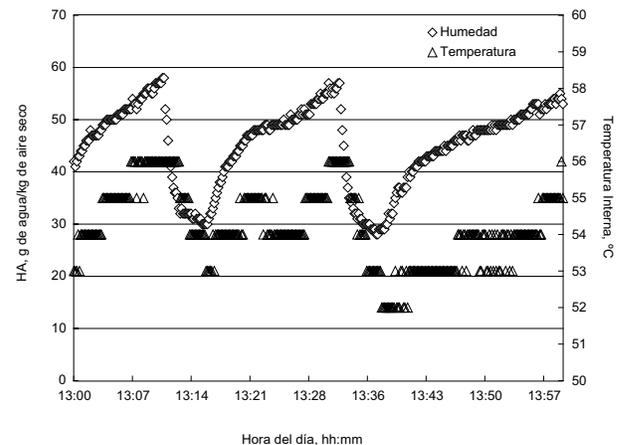


Fig. 3. Variación de temperatura interna y humedad absoluta del aire de la cámara durante la activación del extractor

Las características del lodo en términos de humedad, temperatura y pH tienen un efecto importante en la supervivencia y el crecimiento de microorganismos bacterianos. Por esta razón fue importante observar durante el proceso el número de bacterias y las diferentes variables de carácter incontrolable como pH,

CUADRO I. CONDICIONES EXPERIMENTALES DURANTE EL SECADO SOLAR DE LODOS RESIDUALES

Día	Tiempo de residencia, h	Radiación solar global acumulada, kW-h/m ²	Contenido de agua en lodo dentro del secador, %	Contenido de agua en lodo fuera del secador, %	pH	Coliformes fecales, NMP/g seco	Coliformes fecales eliminadas, %	<i>Salmonella</i> , NMP/g seco	<i>Salmonella</i> eliminada, %
30/06/2007	0	0.0	86.22	86.22	6.80	3.87E+06	0.0000	1.57E+13	0.0000
30/06/3007	7	4.5	82.00		6.58	1.34E+06	65.3747	6.03E+11	96.1651
07/01/2007	24	6.0	80.21		6.28	2.77E+06	28.4238	6.36E+08	99.9959
07/02/2007	50	14.7	77.10	77.10	6.11	1.34E+06	65.3747	4.29E+08	99.9972
07/03/2007	74	20.4	77.20	76.00	6.07	1.08E+06	72.0930	2.03E+08	99.9987
07/04/2007	98	25.9	64.10	76.40	6.05	5.78E+04	98.5078	8.08E+07	99.9994
07/09/2007	218	50.0	43.00	66.00	6.02	3.23E+04	99.1646	1.22E+05	99.9999
07/11/2007	269	59.0	6.67	55.00	6.00	1.60E+00	99.9999	1.92E+03	99.9999

contenido de agua y temperatura en los lodos. El **cuadro I** muestra el contenido de *Salmonella* y de coliformes fecales y las distintas condiciones experimentadas en el proceso de secado solar de lodos. En ocasiones, contrario a los objetivos del estudio de reducir microorganismos, el crecimiento puede ser favorecido debido a que la combinación de variables climatológicas de radiación solar, nubosidad, temperatura, humedad y velocidad de viento pueden propiciar condiciones óptimas de incubación dentro del dispositivo.

Los coliformes fecales son organismos mesofílicos cuyo crecimiento óptimo se encuentra entre 25 y 40 °C; a temperaturas menores de 20 °C se hallan en estado de latencia y a temperaturas mayores de 50 °C mueren. Por otro lado, la *Salmonella* también es un organismo mesofílico cuyo crecimiento óptimo ocurre entre 35 y 43 °C y a pH de 7 a 7.5; sin embargo, ésta puede tener actividad de reproducción en un amplio rango de temperatura entre 5.2 °C y 46.2 °C y de pH entre 4.1 y 9.0. En las condiciones mínimas de nutrientes, humedad, temperatura y pH, puede multiplicarse cada 20 minutos (Abushelabi *et al.* 2003). Además, se ha documentado que *Salmonella*, al igual que las coliformes fecales, mueren al estar expuestos a temperatura de 55 °C por una hora o entre 15 y 20 min a 60 °C (Tchobanoglous *et al.* 2003).

En la **figura 4** se muestran las condiciones internas de temperatura y humedad absoluta para los tres primeros días de experimentación. Se debe observar que a medida que transcurre el día, el incremento de temperatura dentro de la cámara es favorecido debido a la incidencia de radiación solar, mostrando un aumento acelerado en las horas de la mañana hasta alcanzar un máximo antes de mediodía. Con dicho aumento de temperatura, se debe notar que la humedad absoluta presentó la misma tendencia.

Cuando el controlador midió una ΔHA igual o mayor a 38 g de agua por cada kg de aire seco se activó el sistema de extracción. Durante las extracciones se observó un decremento de la temperatura a una razón aproximada de un grado por minuto. De tal manera que a partir de las 10 hasta las 17 horas se presentó un comportamiento oscilatorio en las dos variables. A medida que disminuye la incidencia de radiación solar en el día, el sistema también se va enfriando. En días típicamente claros, a las 18 h la temperatura y humedad cayeron rápidamente hasta alcanzar sus mínimos en la madrugada. Con el objetivo de aumentar la temperatura interna para facilitar la aniquilación de las bacterias, el sistema de extracción fue inactivado entre las 13 y las 14 h, sacrificando la extracción de humedad. En la figura es posible notar el incremento en la temperatura y en la humedad como consecuencia de dicha práctica.

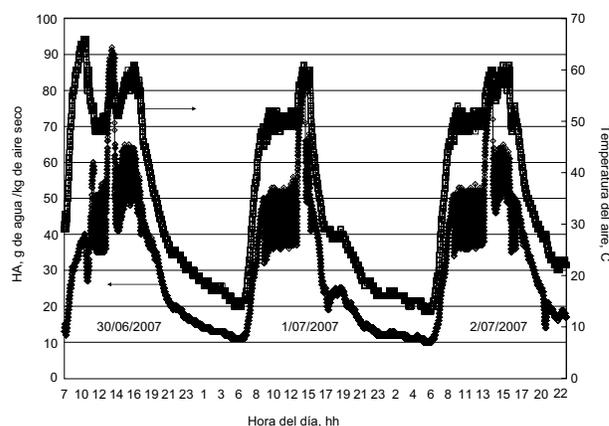


Fig. 4. Condiciones internas de temperatura y humedad absoluta dentro del secador solar para los tres primeros días de experimentación

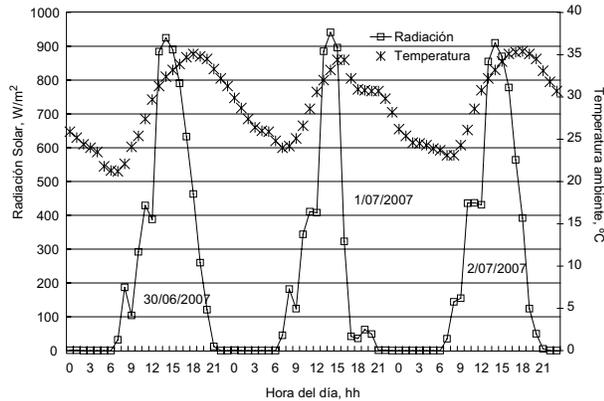


Fig. 5. Condiciones ambientales de radiación solar y temperatura durante los tres primeros días de experimentación

En la **figura 5** se presentan las condiciones climáticas para los tres primeros días de experimentación. La segunda campana de datos de radiación solar es una muestra clara de las condiciones climáticas de la mayoría de los días de experimentación. Por lo general fueron días despejados por la mañana, seguidos por nublados densos, acompañados por fuertes ráfagas de viento de hasta 9 ó 10 m/s. Las condiciones no fueron las adecuadas para realizar efectivamente la remoción de humedad y además se experimentaron periodos largos con temperaturas internas que favorecieron la supervivencia o el desarrollo de los microorganismos. La hipótesis referente al tiempo de secado esperado para días continuos típicamente claros en Ciudad Juárez es de 5 días hasta lograr un 5 % de humedad en el material; sin embargo, el tiempo de experimentación se extendió hasta 11 días para lograr un contenido de humedad del 6 %. En la **figura 6** se muestra la varia-

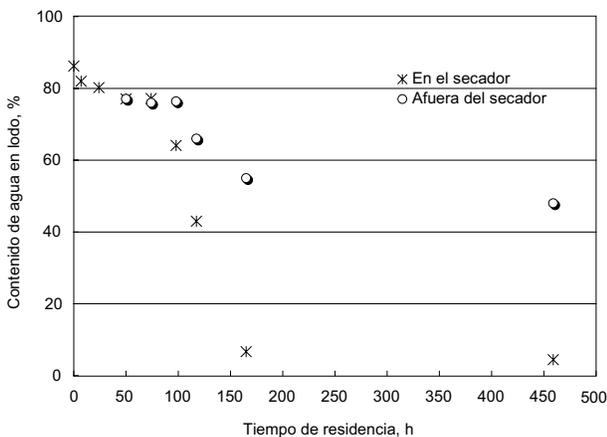


Fig. 6. Variación de la humedad de los lodos residuales dentro y fuera de la cámara de secado a distintos tiempos de residencia

ción del contenido de agua en los lodos. Al inicio del experimento, el lodo proveniente de la PTAR contenía 86 % de agua. Se debe observar que el decaimiento del porcentaje de agua durante el secado solar siguió un comportamiento exponencial.

En la **figura 7** se puede observar en escala logarítmica el decaimiento de las concentraciones de coliformes fecales y *Salmonella* por gramo seco de lodo residual para los distintos tiempos de residencia en el secador solar. El contenido inicial de bacteria en los lodos fue de 5.6×10^7 y 1.5×10^{13} NMP/g seco para coliformes fecales y *Salmonella*, respectivamente. Para coliformes fecales se eliminó el 98.5 % éstos en los primeros cuatro días de procesamiento, y para *Salmonella*, el 99.9 %. Los valores mínimos alcanzados fueron de menos de 2 NMP/g seco para coliformes y 2000 para *Salmonella*.

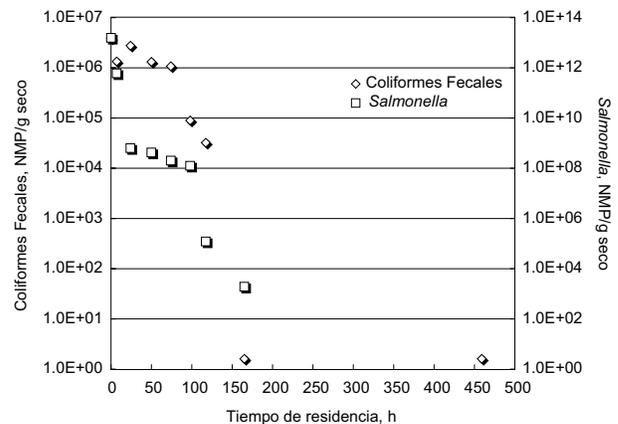


Fig. 7. Concentración de coliformes fecales y *Salmonella* en función del tiempo de residencia en el secador solar

La calidad de los lodos residuales de las PTAR depende de la compleja actividad de las ciudades. El agua residual de Ciudad Juárez está conformada en 90 % por residuos domésticos y el restante en su mayor parte es de origen de la industria del ensamble. El alto contenido de *Salmonella* y coliformes fecales en los lodos residuales de esta ciudad se deben a la alta prevalencia de enfermedades gastrointestinales en la población de Juárez y el alto contenido de materia orgánica en el agua. En países desarrollados, de forma alterna, se presentan bajas proporciones de *Salmonella* en lodos de 10^2 - 10^3 UFC (unidades formadoras de colonias) por gramo (Carrington 2001), lo cual es asociado a la baja prevalencia de dichas enfermedades; sin embargo, valores de 10^7 UFC de *Salmonella* por gramo han sido reportados (Parnar *et al.* 2001).

En la **figura 8** se muestran las concentraciones dinámicas de ambas bacterias en función del pH natural del proceso. Al observar el número de coliformes fecales, se debe relacionar que para pH ácidos menores de 6.2, dichos microorganismos no son favorecidos en su reproducción y esta condición contribuye a su inactivación. El pH en el rango ácido-neutro, arriba de 6.3, refleja condiciones favorables para la supervivencia, y para la reproducción si se toma el antecedente mostrado en la **figura 7**, ya que se cuantificó la aparición de microorganismos entre las muestras tomadas a las 7 y 24 h de residencia. En lo concerniente a la relación entre *Salmonella* y pH, se observa el mismo patrón de dependencia.

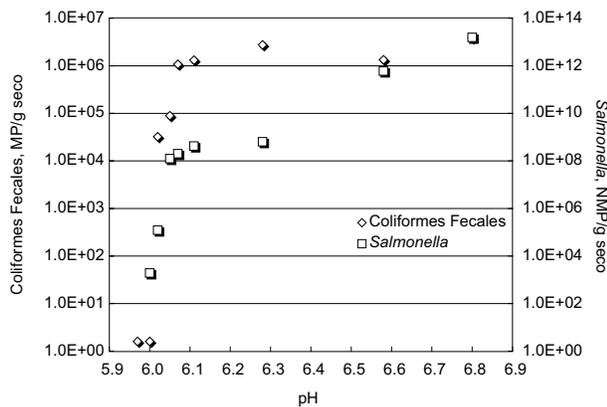


Fig. 8. Variación de la concentración de coliformes fecales y *Salmonella* en función del pH durante el secado solar de lodos

CONCLUSIONES

El prototipo experimental de secado solar de lodos fisicoquímicos residuales de las PTAR, representa una opción técnicamente viable para la reducción de volumen y eliminación de alto contenido de microorganismos patógenos, lo cual aumenta la posibilidad de su aprovechamiento en usos productivos agrícolas o como sustrato para invernaderos.

El pH, la temperatura y el contenido de agua son factores que afectan fuertemente el desarrollo o deterioro de los microorganismos. La disminución de pH durante el proceso favorece a la eliminación de las dos bacterias y tal decremento es debido a la descomposición de la materia orgánica y la liberación del dióxido de carbono. En el caso de las temperaturas, por las características dinámicas e incontrolables de las condiciones atmosféricas, se experimentaron temperaturas de operación en rangos desde 15 hasta

70 °C. Durante periodos de cielos nublados y por las noches se exhibieron temperaturas de incubación entre 25 y 40 °C. Se registró un crecimiento de coliformes en el segundo día de experimentación, donde las condiciones combinadas de temperatura, pH y contenido de agua en los lodos fueron propicias. Esta última variable juega un papel muy importante en la supervivencia de las bacterias. A humedades altas mejor será el ambiente para las bacterias.

El secador es propuesto como una alternativa técnicamente factible para la reducción de volumen de los lodos, considerando las 135 toneladas generadas por día. A pesar de las condiciones climáticas no adecuadas para el experimento, fue posible demostrar la efectividad de remoción de agua de los lodos hasta en 99 %. Durante el procesamiento, no se presentaron olores desagradables a distancias mayores de cuatro metros y además, el ambiente cerrado no permitió la dispersión de patógenos por vectores. La implementación de un secador solar de lodos en Ciudad Juárez podría ser benéfica modificando los mecanismos actuales de tratamiento, manejo y disposición de los lodos a costos bajos.

REFERENCIAS

- Abad E., Martínez K., Planas C., Palacios J., Caixach J. y Rivera J. (2005). Priority organic pollutant assessment of sludges for agricultural purposes. *Chemosphere* 61, p. 1358-1369.
- Abushelabi A.A., Sofos J.N., Sameli J. y Kendall P.A. (2003). Survival and growth of *Salmonella* in reconstituted infant cereal hydrated with water, milk or apple juice and stored at 4 °C, 15 °C and 25 °C. *Food Microbiol.* 20, 17-25.
- Bartels J.M. y Bigham J.M. (1996). *Methods of Soil Analysis Part 3- Chemical Methods*. SSSA Book Series No 5, Wisconsin, EUA, pp. 437-474.
- Bell F.P., James B.R. y Chaney R.L. (1991). Heavy metal extractability in long-term sewage sludge and metal salt amended soils. *J. Environ. Qual.* 20, 481-486.
- Berset J.D. y Holzer R. (1996). Determination of coplanar and orthosubstituted PCBs in some sewage sludges of Switzerland using HRGC/ECD and HRGC/MSD. *Chemosphere* 32, 2317-2333.
- Bose S. y Bhattacharyya A.K. (2008). Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge. *Chemosphere* 70, 1264-1272.
- Bux M., Baumann R., Quadt S., Pinnekamp J. y Mulhlbauer W. (2002). Volume reduction and biological stabilisation of sludge in small sewage plant by solar drying. *Dry Technol.* 20, 829-837.

- Carrington E.G. (2001). Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction - Report No. CO 5026/1. Study Contract No. B4-3040/2001/322179/MAR/A2 for the European Commission. ISBN 92-894-1734-X.
- Clesceri L.S., Greenberg A.E. y Eaton A.D. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation. 20ava. Ed., Washington D.C. 1325 p.
- Cocker E.G. (1983) The use of sewage sludge in agriculture. *Water Sci. Technol.* 15, p. 195.
- Díaz Aguilar I., Laarqué Saavedra M.U., Alcántar González G., Vázquez Alarcón A., González Cossio F.V. y Carrillo González R. (2001). Acumulaciones Tóxicas de Níquel en el crecimiento y la nutrición del trigo. *Terra Latinoamer.* 19, 199-209.
- Haralambopoulos D.A., Biskos G., Halvadakis C., Lekkas T.D. (2002) Dewatering of wastewater sludge through a solar still. *Renew. Energy* 26, 247-256.
- Jackson A.P., Alloway B.J. (1991). The bioavailability of cadmium to lettuce and cabbage in soils previously treated with sewage sludges. *Plant Soil* 132, 179-186.
- Langenkamp H. y Part P. (2001). Organic contaminants in sewage sludge for agricultural use. Proyecto ambiental coordinado por: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Soil and Waste Unit.
- Luboschik U. (1999). Solar sludge drying-Based on the IST process. *Renew. Energy* 6, 785-788.
- Mantis I., Voutsas D. y Samara C. (2005). Assessment of the environmental hazard from municipal and industrial wastewater treatment sludge by employing chemical and biological methods. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 62, 397-407.
- SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-004. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 15 de Agosto de 2003.
- Ottaviani M., Crebelli R., Fusselli S., La Roca C. y Baldassarri L.T. (1993). Chemical and Mutagenic evaluation of sludge from a large wastewater treatment plant. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 26, 18-32.
- Parmar N., Singh A. y Ward P. (2001). Characterization of the combined effects of enzyme, pH and temperature for removal of pathogens from sewage sludge. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 17, 169-72.
- Ricco G., Tomei M.C., Ramadori R. y Laera G. (2004). Toxicity assessment of common xenobiotic compounds of municipal activated sludge: comparison between respirometry and Microtox®. *Water Res.* 38, 2103-2110.
- Sahlströma L., Aspana A., Baggea E., Danielsson-Thamb M.L. y Albihna A. (2004). Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. *Water Res.* 38, 1989-1994.
- Salihoglu N.K., Pinarli V., Salihoglu G. (2007). Solar drying in sludge management in Turkey. *Renew. Energy* 32, 1661-1675.
- Stevens J., Green N.J.L., Jones K.C. (2001). Survey of PCDD/Fs and non-ortho PCBs in UK sewage sludges. *Chemosphere* 44, 1455-1462.
- Tchobanoglous G., Burton F.L. y Stensel H.D. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse. Metcalf and Eddy*. McGraw-Hill Professional, Nueva York. 1848 p.
- US EPA (1999). Environmental regulations and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. Report EPA/625/R-92/013, US EPA, Washington DC.
- US EPA (1989). Environmental regulations and technology. Control of pathogens in municipal wastewater sludge. Report EPA 625 10-89 006, US EPA, Cincinnati OH.