

V. Alternativas de tratamiento fisicoquímico en lixiviados recalcitrantes y su manejo en el territorio nacional

Hugo Alejandro Nájera Aguilar

I. Generalidades de los lixiviados

Origen y definición de los lixiviados

Cualquier actividad antropogénica conlleva la generación de residuos sólidos, coloquialmente conocidos con el término de “basura”, los cuales si no son reincorporados a los procesos productivos, generalmente terminan en lugares conocidos como sitios de disposición final (SDF). De acuerdo con las prácticas que se presentan en la región, estos sitios pueden clasificarse de la siguiente manera; relleno sanitario, vertidos a cuerpos de agua y vertidos en el terreno. Obviamente que estas dos últimas no constituyen los mejores métodos de disposición final, sin embargo y desafortunadamente, son los más socorridos en el territorio nacional, principalmente el relacionado con el vertido en el terreno mejor conocido como “tiradero a cielo abierto” (TCA).

En el territorio estatal se cuenta al menos con 118 sitios para la disposición final de los residuos sólidos, operando alrededor del 95% de ellos como TCA (figura 1), sin control alguno y con daños al entorno. Es en estos lugares de acumulación de basura, donde se genera un líquido que provoca una de las mayores afectaciones al ambiente, y es conocido propiamente con el término de lixiviado. Este líquido provie-

ne de desechos muy heterogéneos en composición y arrastra todo tipo de contaminantes, muchos de ellos en concentraciones elevadas, por lo que es catalogado como uno de los más complejos y difíciles de tratar^[1], al contener concentraciones elevadas de contaminantes orgánicos e inorgánicos incluyendo ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal y metales pesados, además de sales inorgánicas^[2,3].



Figura 1. SDF con afloramiento de lixiviados en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas.

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003^[4] y la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*^[5], en su artículo 5, fracción XVI, definen a los lixiviados como el “líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos”. Algunos autores^[3] definen al lixiviado como el agua de lluvia que pasa a través del SDF además del líquido que se genera en la degradación de los desechos dentro de un relleno sanitario. Otros autores^[6] conciben a estos líquidos como aguas residuales complejas generadas cuando el

contenido de humedad o de agua de los residuos sólidos en un relleno sanitario, es mucho mayor a su capacidad de campo.

Tipos de lixiviados

Los lixiviados se clasifican de acuerdo a su composición, y tanto la calidad como la cantidad de ellos varía sustancialmente entre sitios y estaciones, dependiendo de factores como el contenido de humedad de los residuos dispuestos; la hidrogeología específica del sitio; el diseño, operación y edad del relleno sanitario; así como la biodegradabilidad relativa de los diferentes contaminantes orgánicos presentes en el relleno sanitario^[7].

Aunque no es posible hablar de una composición promedio, pueden manejarse valores típicos a manera de contar con una referencia. En el cuadro 1, se presenta una composición típica de lixiviados de acuerdo con valores propuestos por Bagchi^[8].

Cuadro 1. Rango de composición típica en lixiviados

Parámetro	Intervalo de valores (mg/L) (excepto donde se indica)	Parámetro	Intervalo de valores (mg/L) (excepto donde se indica)
Sólidos Disueltos Totales	584 - 55,000	Fósforo total	ND - 234.0
Sólidos Suspendidos Totales	2 - 140,900	Boro	0.87 - 13.0
Conductancia específica	480 - 72,500 micromhos/cm	Bario	ND - 12.50
DBO ₅	6.6 - 99,000	Niquel	ND - 7.50
DQO	10.0 - 195,000	Nitrógeno de Nitratos	ND - 250.0
Carbono Orgánico Total	ND - 40,000	Plomo	ND - 14.20
pH	3.7 - 8.9	Cromo	ND - 5.60
Alcalinidad total	ND - 15,050	Antimonio	ND - 3.19

Dureza	0.1 - 225,000	Cobre	ND - 9.0
Cloruros	2.0 - 11,375	Talio	ND - 0.78
Calcio	3.0 - 2,500	Cianuro	ND - 6.0
Sodio	12.0 - 6,010	Arsénico	ND - 70.20
Nitrógeno total	2.0 - 3,320	Molibdeno	0.01 - 1.43
Fierro	ND - 4,000	Estaño	ND - 0.16
Potasio	ND - 3,200	Nitrógeno de Nitritos	ND - 1.46
Magnesio	4.0 - 780	Selenio	ND - 1.85
Nitrógeno Amomiacal	ND - 1,200	Cadmio	ND - 0.40
Sulfatos	ND - 1,850	Plata	ND - 1.96
Aluminio	ND - 85.0	Berilio	ND - 0.36
Zinc	ND - 731.0	Mercurio	ND - 3.00
Manganeso	ND - 400.0	Turbiedad	40 - 500 UTJ

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO: Demanda Química de Oxígeno; ND: No detectado.

Con los datos del cuadro 1, queda clara la gran variabilidad que existe en la concentración de contaminantes en un lixiviado, sólo por mencionar un ejemplo (considerando los parámetros de carga orgánica), se observa que los valores de DBO₅ y DQO pueden fluctuar entre 6.6-99,000 y 10-195,000 mg/L, respectivamente.

Para poder acotar la variabilidad de estos líquidos, en términos generales, pueden ser clasificados como lixiviados tipo I, II y III. Los primeros son también conocidos como lixiviados jóvenes, los segundos como medios y los del tipo III como viejos o estabilizados (cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación de los tipos de lixiviados en función de la edad^[9]

Parámetro	Edad del relleno (años) y tipo de lixiviado		
	<5 (joven)	5-10 (medio)	> 10 (viejo)
	I (biodegradable)	II (intermedio)	III (estabilizado)
pH	< 6.5	6.5-7.5	> 7.5
DQO (mg/L)	> 20,000	3,000-15,000	< 5,000
DQO/COT	< 2.7	2.0-2.7	> 2.0
DBO ₅ /DQO	> 0.5	0.1-0.5	< 0.1
AGV* (% COT)	> 70	5-30	< 5
Metales pesados (g/L)	2	—	< 50 mg/L

*AGV: Ácidos Grasos Volátiles; COT: Carbono Orgánico Total.

Del cuadro 2 se observa que los lixiviados jóvenes contienen la mayor carga orgánica (DQO mayor a 20,000 mg/L), con una elevada presencia de ácidos grasos volátiles (AGV), lo que explica los bajos valores de pH y como consecuencia altas concentraciones de metales pesados. Asimismo, se observa que al presentar una relación DBO₅/DQO superior a 0.5, más del 50% de la materia orgánica presente es biodegradable. Por su parte, el lixiviado catalogado como viejo, registra una menor carga orgánica con una relación DBO₅/DQO inferior a 0.1, por lo que la mayor parte de los contaminantes orgánicos son de naturaleza refractaria. Debe destacarse, que esta relación es de suma importancia en la elección del sistema de tratamiento para la depuración de estos líquidos. Así, para lixiviados jóvenes como primera etapa de tratamiento, siempre será recomendable pensar en sistemas biológicos; mientras que para un lixiviado viejo, dada su baja biodegradabilidad, de acuerdo con diversos autores^{[9][10]}, los procesos fisicoquímicos se convierten en la mejor opción como primera etapa.

Repercusiones al ambiente

La cantidad generada de lixiviados es baja comparada con los volúmenes producidos en otros tipos de aguas residuales como las domésticas, sin embargo, los contaminantes que contiene son extremadamente peligrosos. De acuerdo con Tizaoui *et al* ^[11], cuando los lixiviados migran de la basura y alcanzan cuerpos de agua, pueden afectar la salud humana y ambientes acuáticos.

En términos generales, cuando estos líquidos no son controlados (captados, almacenados y tratados), pueden permear hasta llegar al agua subterránea o mezclarse con aguas superficiales y contribuir a la contaminación de suelo, agua subterránea y superficial ^[12].

En la actualidad, el nulo manejo de los lixiviados constituye la práctica común en el estado, lo que deja ver el gran vacío, falta de interés y poco conocimiento que hasta la fecha se ha tenido con uno de los líquidos más complejos y contaminantes (sino el mayor), generados ininterrumpidamente en el territorio estatal.

II. Alternativas de tratamiento

En términos generales, las tecnologías disponibles en el tratamiento de lixiviados pueden dividirse en procesos anaerobios, aerobios, sistemas naturales, sistemas de membranas, sistemas avanzados de oxidación, lagunas de evaporación y recirculación ^[13]. Los primeros dos sistemas son por naturaleza empleados para la remoción de materia orgánica, cuando el contenido de materiales biodegradables es elevada. Los sistemas naturales, se emplean como etapas de depuración, cuando el lixiviado ya ha recibido un pretratamiento, o bien, se encuentra diluido. En el caso de los sistemas de membranas, estos han demostrado buenas eficiencias y ser más compactos en el tren de tratamiento; sin embargo, su costo y mantenimiento lo hacen poco atractivos para las condiciones de la región. Autores como Ziyang y Youcai ^[14] citan como ejemplo a la ósmosis inversa, tecnología muy desarrollada en los últimos años pero bastante cara para ser usada en la mayoría de los países en desarrollo debido a su alto consumo de energía, costos operacionales y

contaminación severa en las membranas. Por lo que toca a los sistemas avanzados de oxidación, estos han comenzado a probarse teniéndose eficiencias buenas cuando la materia orgánica contenida en el lixiviado es poco biodegradable (índice de biodegradabilidad <0.3)^[15].

Ahora bien, las dos últimas tecnologías (evaporación y recirculación), son sistemas relativamente fáciles de operar, sin embargo, en el sistema de evaporación por lagunas se demandan superficies considerables, pudiendo presentarse serios problemas durante la época de lluvias debido a una sobreproducción en los lixiviados^[16]. Asimismo, durante el proceso de evaporación, algunos contaminantes (compuestos orgánicos volátiles) se emiten a la atmósfera^[17].

Con lo antes expuesto, puede observarse que prácticamente todas las tecnologías conocidas para el tratamiento de aguas residuales se han probado para el tratamiento de lixiviados de SDF de residuos sólidos, por lo que existe suficiente literatura técnica sobre las aplicaciones de las diferentes tecnologías para el tratamiento de estos líquidos. Sin embargo, la tratabilidad de ellos dependerá de su composición y características^[18], lo que ha propiciado la investigación de los trenes y sistemas acoplados más variados que difícilmente se verá para otro tipo de agua residual. En gran medida, lo anterior puede atribuirse a que a la fecha no existe una sola etapa biológica o fisicoquímica que sea suficiente para remover la gama de contaminantes contenida en cualquier tipo de lixiviado (joven, intermedio o estabilizado). Por ejemplo, Kurniawan *et al.*^[10] realizaron un análisis de 118 trabajos documentados de 1983 a 2005, en donde se reporta que ninguna técnica físico química individual es universalmente aplicable o altamente efectiva para la remoción de compuestos recalcitrantes a partir de lixiviados estabilizados. Siempre ha sido necesario recurrir a sistemas acoplados para el tratamiento de lixiviados jóvenes o maduros, bien sea una combinación de biológico-fisicoquímico, biológico-fisicoquímico-biológico o biológico-fisicoquímico-fisicoquímico para los primeros, o bien, para los segundos, fisicoquímico-biológico, fisicoquímico-fisicoquímico o fisicoquímico-fisicoquímico-biológico^[19].

Tratamientos fisicoquímicos

De acuerdo con la clasificación de lixiviados expuesta en cuadro 2, se observa que la carga orgánica medida como DBO y DQO constituyen parámetros básicos al momento de decidir el sistema de tratamiento a emplearse, especialmente la relación existente entre ambos, dado que define en gran medida la biodegradabilidad del lixiviado. Así, en el presente trabajo teniendo en cuenta los alcances y extensión del mismo, en esta ocasión se abordarán únicamente los tratamientos fisicoquímicos (sin considerar los procesos avanzados de oxidación) disponibles para los lixiviados de baja biodegradabilidad, también conocidos como maduros o del tipo III.

Algunas definiciones acerca de este tipo de lixiviados, lo encontramos con Wang *et al.*^[20], quienes lo conciben como un líquido pobre en biodegradabilidad con una relación o índice de biodegradabilidad menor a 0.17, en tanto que para otros autores cuando es menor a 0.3^[112]. De esta manera, para este tipo de lixiviado como primera etapa de tratamiento, siempre será recomendable aplicar los procesos fisicoquímicos^[10].

Dentro de los tratamientos fisicoquímicos destacan la coagulación-floculación además de la adsorción con carbón activado, la precipitación química y los procesos con membrana. A continuación se destacan los aspectos más importantes de cada uno de estos sistemas, eficiencias alcanzadas, limitaciones y sus aplicaciones en el tratamiento de lixiviados maduros de rellenos sanitarios.

Coagulación-floculación

En el tratamiento de lixiviados, la coagulación se ha empleado como pretratamiento antes de los procesos biológicos o como etapa de pulimento para remover componentes orgánicos no biodegradables, o bien, bajo esquemas acoplados con procesos de oxidación avanzada^[21].

Algunos autores^[9], experimentaron con dos tipos de coagulante cloruro férrico (FeCl_3) y sulfato ferroso [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$] aplicado al mismo lixiviado, reportando eficiencias de remoción del 55 y 42% en DQO, respectivamente. De igual manera, otros estudios de coagulación-floculación^[22], condujeron a remociones altas de sólidos suspendidos

(95%) y de color (90%), y regulares en DQO (43%), con el uso de tres tipos de coagulantes: $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$, (FeCl_3) y sulfato ferroso (FeSO_4). Nuevamente el FeCl_3 demostró una mayor efectividad en la remoción de contaminantes. Estos resultados indican que el FeCl_3 es más efectivo que el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ como coagulante.

Por su parte, Renou *et al.*^[15] reportan 15 estudios conducidos bajo el proceso de coagulación-floculación alrededor del mundo, donde se ha experimentado con diferentes coagulantes tales como $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$, FeCl_3 e hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, buscando las condiciones experimentales óptimas en lo referente al pH, dosis y velocidades de mezclado. Las eficiencias de remoción alcanzadas (8-90% en DQO) empleando uno o dos de estos coagulantes así como las condiciones de trabajo han sido muy variadas.

Dentro de las limitaciones que presenta este proceso, se encuentran los costos operacionales relativamente altos debido al consumo de reactivos, la sensibilidad del proceso al pH y a la generación de lodos, entre los principales^[10].

Ahora bien, como principales bondades del proceso destacan la remoción de sólidos suspendidos y coloidales^[10], así como los tiempos relativamente cortos que se requiere en el tratamiento, y por consiguiente, de unidades más compactas en comparación con otros sistemas.

Adsorción con carbón activado

Básicamente, la adsorción es un proceso de transferencia de masa en la cual una sustancia es transferida de la fase líquida a la superficie de un sólido. Debido a sus propiedades físicas inherentes, gran área superficial, estructura de sus microporos, alta capacidad de adsorción y reactividad superficial, la adsorción empleando Carbón Activado Granular (CAG) o Carbón Activado en Polvo (CAP), ha tenido mucha aceptación en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos^[23]. Se trata de un método de tratamiento avanzado muy aplicado para la remoción de compuestos orgánicos refractarios y de compuestos inorgánicos así como de metales pesados^[24].

Amokrane *et al.*^[9], lo experimentaron en lixiviados maduros para la remoción de materia orgánica alcanzando eficiencias de remoción del orden del 70% en DQO. Por otro lado, Kurniawan *et al.*^[10] reportan di-

versos estudios donde el CAG muestra gran efectividad en la remoción de metales pesados (cadmio, cobre, cromo, manganeso, plomo y zinc) con remociones del 80-96% de la concentración inicial y en rangos de pH que oscilan en la neutralidad (6.0-7.7).

En el territorio nacional, para lixiviados provenientes del rellenos sanitario de la ciudad de Mérida, Yucatán, se llevó a cabo un estudio^[25] mediante el uso de columnas empacadas con carbón activado, a través de las cuales se hizo pasar lixiviado crudo y lixiviado con pH ácido, cercano a 2 y con un índice de biodegradabilidad inferior a 0.3. Los mejores resultados fueron obtenidos en los ensayos en los que se utilizó lixiviados con pH ácido. Para el mismo tiempo de contacto, de 8 horas, se alcanzaron remociones de 65% de DQO para lixiviados sin tratamiento, mientras que en los ensayos con reducción de pH, se obtuvieron remociones de 90%.

En términos generales, considerando que en diversos estudios bajo este proceso más del 90% de la DQO ha sido removida, la aplicación del carbón activado ya sea en forma granular o en polvo, se considera un método efectivo para la remoción de compuestos orgánicos recalcitrantes, pero no para la remoción de nitrógeno amoniacal. Aunado a esto último, otras desventajas que se suman en la aplicación de esta técnica, se encuentra la necesidad de una regeneración frecuente de la columna de carbón activado y el alto costo del CAG, lo cual puede representar una limitante para su aplicación al tratamiento de lixiviados maduros en países en desarrollo^[10].

Precipitación química

Este proceso se inicia con la adición de sustancias químicas (tales como las sales de fierro y aluminio, así como la cal y polímeros orgánicos) que alteran el estado físico de los sólidos disueltos y suspendidos para su posterior remoción por sedimentación. En algunos casos, el mismo coagulante es el principal responsable de la remoción al formar un precipitado voluminoso^[26].

Dependiendo de lo que se quiera remover (nitrógeno amoniacal o metales pesados), la estruvita y la cal son los productos químicos más empleados. La precipitación con estruvita a compuestos insolubles para la separación de la fase líquida, queda representado por la siguiente ecuación:



Partiendo de esta reacción, con una relación molar Mg^{+2} , NH_4^+ y PO_4^{-3} , 1:1:1, Li *et al.*^[27] aplicaron a lixiviados de un relleno sanitario de Hong Kong, la precipitación con estruvita para la remoción de nitrógeno amoniacal, alcanzándose remociones del orden del 98% y a un pH de 9. La remoción en DQO fue apenas del 53%.

Una de las grandes ventajas de la precipitación con estruvita, es que el lodo producido después del tratamiento puede ser utilizado como fertilizante con fuente de nitrógeno, siempre que el lixiviado no contenga metales pesados.

En términos generales, en la aplicación de la precipitación química al tratamiento de lixiviados maduros^[9], se han logrado altas eficiencias de remoción del orden del 90% en metales pesados, 70-90% en la remoción de color, turbiedad y sólidos suspendidos; aunque en la remoción de materia orgánica cuantificada como DQO, se han alcanzado remociones por debajo del 55%.

Finalmente, al igual que sucede con otros procesos fisicoquímicos, la precipitación química demanda altas dosis del precipitante, sensibilidad al pH y la generación de lodo^[10].

Filtración con membrana

Los sistemas de tratamiento a base de membranas aplicado para los diferentes efluentes, son tecnologías de gran expansión en las últimas dos décadas. En el caso del tratamiento de lixiviados, ya sea de manera directa o acoplada, se ha probado con la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa, entre las principales.

Por ejemplo, en una combinación de procesos avanzados de oxidación con fisicoquímicos, se probó^[18] un sistema integrado (Reacción Fenton – Ultrafiltración), donde se alcanzaron remociones del 80% de DQO. En este caso, la ultrafiltración fue utilizada como etapa de depuración para los lixiviados viejos.

Por otro lado, en reactores biológicos también se han adaptado sistemas de micro y ultrafiltración para la separación de sólidos de los

efluentes de lixiviados^[13] (en sustitución de las etapas de sedimentación), teniendo reactores más compactos pero con mayores problemas en la operación, dado a que los módulos de membranas son más complicados de operar y mantener que un sedimentador.

En lo que respecta a la ósmosis inversa, las aplicaciones han sido para lixiviados viejos, o bien, para lixiviados a los cuales se les ha realizado un pretratamiento previo, presentando esta tecnología la ventaja de demandar bajos consumos energéticos comparados con otros sistemas de tratamiento^[13].

Ahora bien, en sistemas integrados se han probado tanto la ósmosis inversa como la microfiltración de manera combinada con reactores anaerobios, siempre que los contaminantes de naturaleza orgánica sean en su mayoría biodegradables. Por ejemplo, Li T. *et al.* ^[28] experimentaron con un sistema de tratamiento compuesto por reactor UASB – reactor secuencial por lote – microfiltración – ósmosis inversa, alcanzándose una eficiencia global de remoción de DQO de 99.8%. De igual manera, en este sistema integrado tanto la microfiltración como la ósmosis inversa fueron empleados como etapas de depuración.

Dentro de los principales problemas asociados a los sistemas con membrana, destacan sus altos costos operativos, la disminución en los flujos por problemas de colmatación y el taponamiento mismo en las membranas, lo que propicia que deba tenerse el suministro adecuado de reemplazos de membrana. Asimismo, se considera que esta tecnología no elimina propiamente la carga contaminante de los efluentes, sino que sólo la transfiere de la fase líquida a la sólida, lo que la pone en desventaja ante otros sistemas como los procesos avanzados de oxidación, que son capaces de transformar los contaminantes recalcitrantes a compuestos menos peligrosos y más fáciles de remover en etapas adicionales, a través de la implementación de procesos convencionales. En la figura 2 se muestra una planta de ósmosis inversa donde se realizaron ensayos durante el 2008 para el tratamiento de una fracción de lixiviados recalcitrantes producidos en el relleno sanitario de Bordo Poniente Distrito Federal.

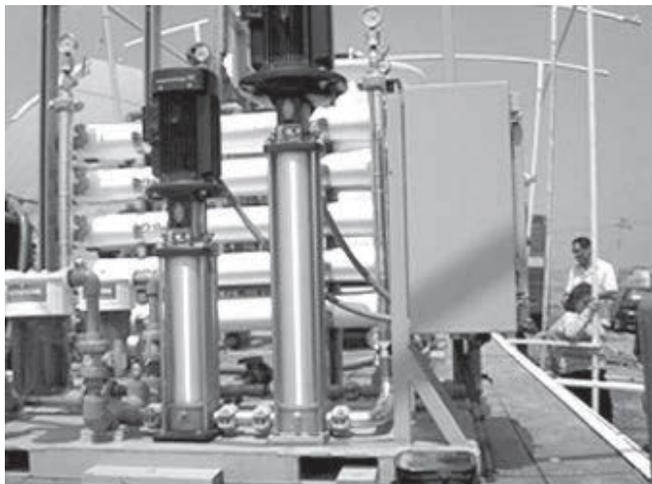


Fig. 2. Planta de ósmosis inversa con una capacidad de tratamiento de $30\text{m}^3/\text{día}$.

Finalmente, aunque no es propiamente un sistema de membranas fabricadas, es digno mencionar que bajo el mismo principio utilizado en el tratamiento de efluentes a través de membranas, pero con la ventaja adicional de contar con una gama de poblaciones microbianas bien establecidas en el lecho, se han utilizado camas filtrantes de basura estabilizada, como es el caso de Gupta y Singh^[29], quienes reportan eficiencias de remoción del 82% como DQO. Esta nueva modalidad de cama filtrante (biofiltro) tuvo sus inicios con Zhao *et al.*^[30] obteniendo eficiencias del 90% de materia orgánica medida como DQO. De igual manera, usando esta etapa pero con 2 bioreactores en serie, Lei *et al.*^[31] reportan remociones del orden del 95% de DQO. Cabe señalar que en el ámbito internacional, esta técnica representa de los últimos trabajos innovadores con resultados muy favorables para el tratamiento de lixiviados.

III. Tratamiento de lixiviados en el territorio nacional

Tratamiento de lixiviados en el ámbito nacional

A nivel nacional, a pesar de que los lixiviados son líquidos con alto poder de contaminación y que siempre se producirán en los lugares donde

la basura sea dispuesta, aún son escasas las investigaciones acerca de su tratabilidad. Dentro de estas investigaciones podemos citar el tratamiento de lixiviados con carbón activado realizado en la ciudad de Mérida, Yucatán^[25], con el que se obtuvieron eficiencias de remoción de materia orgánica del orden del 65%. De igual manera, Méndez *et al.*^[32], realizaron pruebas de tratabilidad fisicoquímica en estos líquidos, obteniendo eficiencias bajas de remoción de materia orgánica, medida como DQO, con valores apenas del 40%. Por otro lado, Monje y Orta^[21], evaluaron la coagulación y ozonación como un proceso alternativo para la remoción y transformación de materia orgánica recalcitrante de lixiviados estabilizados provenientes de un relleno sanitario salino-relleno sanitario Bordo Poniente. Con la coagulación con cloruro férrico removieron 67% de materia orgánica reportada como DQO y 96% de color. El porcentaje remanente de DQO fue removido con ozono. De igual manera, Orta *et al.*^[33], experimentaron un co-tratamiento con lixiviados de este sitio, a través de pruebas de tratabilidad por dilución en el sistema de lagunas facultativas ubicadas en el lago de Texcoco, a menos de 2 km de donde se generan los lixiviados, obteniéndose eficiencias de remoción de materia orgánica del 71% medida como DBO, incorporando un 10% de lixiviado por 90% de agua residual doméstica.

Ahora bien, el tratamiento de estos líquidos fuera de los laboratorios (a escala piloto) prácticamente es inexistente en los miles de sitios de disposición final que se tienen en el país, donde como se sabe, se opere de una forma controlada o no controlada, estos líquidos siempre serán generados. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía^[34], en el país existen 104 rellenos sanitarios y 23 sitios controlados, lo que haría suponer que el manejo de lixiviados en ellos es adecuado y sin afectaciones al entorno, sin embargo y desafortunadamente, esto no se presenta. De los rellenos sanitarios considerados, menos de 15 contaban con laguna de evaporación. En el resto, los lixiviados escurren libremente pudiendo contaminar cuerpos de agua de los alrededores.

Dentro de los rellenos sanitarios que cuentan con laguna para la evaporación de los lixiviados y recirculación de los mismos a estratos de basura y plataformas de celdas, se tienen al de las ciudades de Méri-

da, Durango, Nuevo Laredo, Puebla, León, Aguascalientes, Monterrey, Distrito Federal y del estado de México (Tlanepantla, Bordo Poniente, Tecamac, entre los principales). La acción de utilizar la evaporación y recirculación de estos líquidos como sistema de tratamiento se encuentra en discusión dada la generación de aerosoles y de otros compuestos peligrosos con la subsecuente exposición de los trabajadores, además de otros impactos negativos tales como posibles daños a la vegetación^[17]. Por ello es necesario proporcionar tratamientos adecuados a los lixiviados, como los utilizados en las aguas residuales convencionales (sistemas biológicos o fisicoquímicos).

Del total de rellenos sanitarios existentes en el país, únicamente los de Tlanepantla -Estado de México- y de Bordo Poniente, cuentan además de lagunas de evaporación de lixiviados y sistemas de recirculación, con otros sistemas de tratamiento. El primero, emplea un serpentín de 6 km de longitud para acelerar la evaporación en los lixiviados; el segundo, utiliza un proceso fisicoquímico (la única planta de tratamiento de lixiviados en México hasta el año 2008), para tratar los lixiviados maduros que se producen en la zona conocida como primera etapa del relleno que comprende una superficie de 70 Ha. La planta opera con un gasto de 2-3 L/seg tratando alrededor de 25 m³/día, con concentraciones promedio en el influente en DBO₅ y DQO de 675 y 3500 mg/L, respectivamente (resultados del año 2005), con un índice de biodegradabilidad de 0.19. El agua tratada es utilizada para el riego de caminos de la 4ta. etapa del relleno sanitario, dando cumplimiento con la NOM-001-SEMARNAT-1996, y los lodos producidos -3-4 m³/día- una vez pasados por un equipo de centrifugación, son dispuestos en los frentes de trabajo del relleno. En el proceso se emplean como coagulantes cloruro férrico y sulfato de aluminio.

Tratamiento de lixiviados en el estado de Chiapas

En el estado de Chiapas son escasos los estudios relacionados con el manejo de lixiviados. Por un lado puede citarse al Instituto de Historia Natural y Ecología, quien realizó un diagnóstico acerca del manejo de la basura, sin tratar el fondo de la problemática de las emisiones líquidas.

Por otro lado, se tiene al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez que en colaboración con el laboratorio de monitoreo ambiental del Instituto de Historia Natural y Ecología, realizaron en los años 2005 y 2006 muestreos mensuales (3 en el año 2005 y 12 en 2006) para la caracterización de los lixiviados que se producen en el SDF de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Por la edad que lleva operando este sitio, los lixiviados resultaron ser predominantemente del tipo III o estabilizados, con cargas orgánicas promedios durante el año 2006 de 21,424 y 3,434 mg/L en DQO y DBO₅, respectivamente. Estos resultados de caracterización pueden observarse en el cuadro 3, en donde se manejan únicamente los promedios y el rango de cada uno de ellos así como su desviación estándar.

Cuadro 3. Características de los lixiviados del área clausurada del SDF de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

Parámetros	2006 ^[35]				2008 ^[36]			
	Conc. (mg/L)			Desv.	Conc. mg/L			Desv.
	Prom.	Mín.	Máx.	est.	Prom.	Mín.	Máx.	est.
pH	8.022	7.01	8.43	0.638	8.556	8.37	8.83	2.9715
DQO	21424	159	15855	32595	6177.8	4657.5	7102	84.273
DBO	3434.3	6362	44033	11979	926.8	103.5	1301	36.069
IB	0.160	0.004	0.525	0.606	0.146	0.02	0.19	0.4359
Alcalinidad	10011	2900	16640	6679.7	9133.7	8546	9769	98.838
SST	559.25	37.5	2730	1275.2
Fierro	31.539	9.34	111.51	46.382	21.159	17.12	25.197	5.7113
Niquel	1.092	0.646	1.969	0.6161	1.64	1.4	1.88	0.3394
Plomo	0.244	0.135	0.475	0.205	1.851	0.477	3.225	1.9431
Zinc	1.631	0.632	2.94	1.768	3.425	2.445	4.405	1.3859
Cobre	0.119	0.063	0.171	0.062	0.190	0.144	0.235	0.0643
Cadmio	0.026	0.008	0.038	0.097	2.727	3.49	1.964	1.079
Cromo	1.919	0.623	3.977	2.234	0.827	0.4122

IB: índice de Biodegradabilidad; SST: Sólidos Suspendidos Totales.

Continuando con los estudios en este sitio, en el año 2008^[36], se realizaron otra serie de muestreos corroborando que en ambos periodos de tiempo el IB promedio estuvo en el rango de 0.15 a 0.16. Este índice toma gran relevancia dado que define en gran medida el tipo de lixiviado y tratamiento al cual deberá someterse el líquido en cuestión. De acuerdo con diversos autores^[112], registros inferiores a 0.3 determinan que el lixiviado es maduro o de tipo III y por tanto, autores como Aziz *et al.*^[22] lo catalogan como poco biodegradable con la presencia de materiales orgánicos recalcitrantes que son parcialmente estables y biológicamente resistentes. De igual manera, los valores de pH y alcalinidad registrados corresponden a un lixiviado del tipo III, con valores entre el rango de 6.8-9.0 y 1,020-12,300 mg/L, respectivamente^[20]. De esta manera, la literatura recomienda^[10] que ante lixiviados de tal composición, los tratamientos fisicoquímicos deben ser considerados como primera etapa. Es así, que entre los años 2008 y 2009, se experimentó^[36] el tratamiento de estos líquidos bajo el proceso de coagulación-floculación (figura 3) utilizando cloruro férrico y sulfato ferroso. Los resultados del estudio arrojaron que el primer coagulante fue por mucho más efectivo que el segundo, en la eliminación de materia orgánica medida como DQO con un 67.3% de remoción. En suma, dentro de las principales conclusiones derivadas de este trabajo, se tuvo que el proceso de coagulación-floculación aplicado a los lixiviados maduros del SDF de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, demostró ser efectivo en la remoción de carga orgánica medida como DQO cuando se empleó FeCl_3 como coagulante, obteniéndose las mejores eficiencias de remoción (67%) a pH 6 y a una dosis de 1.4 gr/L, bajo las condiciones de 250 y 30 rpm de mezcla rápida y lenta, respectivamente.



Fig. 3. Ensayos de coagulación-floculación en lixiviados maduros de Tuxtla Gtz.

Por tanto, con lo anterior se demuestra que el proceso de coagulación-floculación puede ser aplicado como un pretratamiento dentro de un sistema integrado de tratamiento para los lixiviados maduros producidos en el SDF de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, quedando pendiente de remover a través de un proceso avanzado de oxidación o de un sistema biológico, la carga orgánica remanente.

Comentarios finales

El panorama general presentado en este documento sobre las características de los lixiviados tipo III, sus repercusiones al medio y las investigaciones entorno a su tratabilidad a través de procesos fisicoquímicos en diferentes partes del mundo, así como su manejo en los SDF del territorio nacional, arrojan como puntos relevantes los siguientes comentarios:

- Los lixiviados representan hoy en día, uno de los problemas más desafiantes en el campo de la ingeniería del tratamiento de las aguas residuales, dada la heterogeneidad en su composición y la complejidad y cantidad de sus constituyentes.

- Los diferentes procesos fisicoquímicos probados en el tratamiento de lixiviados recalcitrantes alrededor del mundo, contrario a los resultados que ellos ofrecen en aguas residuales menos complejas, no son suficientes como única etapa medular dentro de un tren de tratamiento, dado que siempre estarán acompañados de otras técnicas fisicoquímicas, de procesos avanzados de oxidación, o bien, de sistemas biológicos para la remoción de los contaminantes, hasta alcanzar las concentraciones permisibles de descarga a cuerpos receptores o usos posteriores.
- En México, las investigaciones en el tema aún son escasas, constituyendo un gran reto y oportunidad para los centros de investigación, las universidades, las instituciones gubernamentales, las empresas privadas y todo aquel individuo interesado en hacer frente a uno de los líquidos más complejos de tratar hoy en día y de gran potencial de contaminación al entorno por su fácil liberación al ambiente, lo que sin duda está representando riesgos a la salud de la población.
- En países desarrollados, los lixiviados realmente se están sometiendo a sistemas de tratamiento para la depuración de los mismos, contrario a las prácticas comunes a las que se recurre en países como el nuestro, en la que la “tecnología” empleada es a base de lagunas de evaporación y sistemas de recirculación, que en su mayoría son deficientes y cuestionables por los problemas de salud que puede representar para los trabajadores. Prácticamente esta forma de manejar los lixiviados en México, ha caído en desuso en aquellos países, donde la legislación dicta que los lixiviados a pesar de su complejidad, sean vistos prácticamente como un agua residual más a la que es necesario tratar.
- Finalmente, con lo antes expuesto, queda claro el gran campo por explorar en la búsqueda de tecnologías que hagan frente a la complejidad de estos líquidos, los sistemas hasta hoy aplicados en el país ya no son suficientes... si es que algún día llegaron a serlo.

Bibliografía

- [1] Luna, Y., Otal, E., Vilches, L., Vale, J., Querol, X., Fernández, C., 2007, "Use of zeolitised cal fly ash for landfill leachate treatment: A pilot plant study", en *Waste Management*. 27, pág. 1877-1883
- [2] Lopes, J., y Peralta, P., 2005, "Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates", en *Journal of Hazardous Materials*. B123. 181-186.
- [3] Wiszniowski, J., Robert, D., Gorska, J., Miksch, K., Weber, J., (2006), "Landfill leachate treatment methods: A review", en *Environ Chem Lett*. 4 (1). pág. 51-61
- [4] Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. "Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial". 20 de Octubre de 2004. p. 3
- [5] Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2003). Publicada en el DOF el 08 de Octubre de 2003. Última reforma DOF 19-06-2007.
- [6] Wang, F., Smith, D., & El-din, M., 2003, "Application of advanced oxidation methods for landfill leachate treatment – A review", en *Environmental Eng. Sci.* 2: 413-427.

- [7] Reinhart, D., Townsend, T., 1998, *Landfill Bioreactor Design & Operation*, Lewis Publishers. p. 18-19.
- [8] Bagchi, A. 1990, *Design, construction and monitoring of Sanitary Landfill*, Ed. Wiley. p. 44.
- [9] Amokrane, A., Comel, C., & Veron, J., 1997, "Landfill leachates pre-treatment by coagulation-flocculation", en *Water Research*. **31** (11), 2775-82.
- [10] Kurniawan, T., Lo, W., y Chan, G., 2006, Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*. B129. 80-100.
- [11] Tizaoui, C., Bouselmi, L., Mansouri, L. & Ghrabi, A. (2007). Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide systems. *Journal of Hazardous Materials*. **140**. 316-324.
- [12] Deng, Y., 2007, Physical and oxidative removal of organics during Fenton treatment of mature municipal landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*. **146**. 334-340
- [13] Giraldo E., 2001, Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. *Revista de Ingeniería*. Universidad de los Andes. No. 14.
- [14] Ziyang, L. & Youicai, Z., 2007, Size-fractionation and characterization of refuse landfill leachate by sequential filtration using membranes with varied porosity. *Journal of Hazardous Materials*. **147**. 257-264.
- [15] Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P., 2008, Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*. **150**. 468-493.
- [16] Castillo, B., Salazar, G., Méndez, N., & Sauri, R., 2006, Remoción

de metales pesados en el lixiviado de un relleno sanitario mediante un tratamiento fisicoquímico. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales*.

- [17] Gray, D., Pollard, S., Spence, L., Smith, & Gronow, J. (2005). Spray irrigation of landfill leachate: Estimating potential exposures to workers and bystanders using a modified air box model and generalized source term. *Environmental Pollution*. **133**. 587-599
- [18] Primo, O., Rueda, A., Rivero, M., y Ortiz I. (2008). An Integrated process, Fenton reaction – ultrafiltration, for the treatment of landfill leachate: Pilot plant operation and analysis. *Ind. Engineering Chemical Research*. **47**. 946-952.
- [19] Deng, Y., y Englehardt J. (2006). Treatment of landfill leachate by the Fenton process. *Water Research*. **40**. 3683-3694.
- [20] Wang, F., Smith, D., & El-din, M. (2003). Application of advanced oxidation methods for landfill leachate treatment – A review. *Environmental Eng. Sci.* **2**: 413.127.
- [21] Monje, R. & Orta, de V. (2004). Removal and transformation of recalcitrant organic matter from stabilized saline landfill leachates by coagulation-ozonation coupling processes. *Water Research*. **38**. 2359-2367.
- [22] Aziz, H., Alias, S., Assari, F., y Adlan M. (2007). The use of alum, ferric chloride and ferrous sulphate as coagulants in removing suspended solids, color and COD from semi-aerobic landfill leachate at controlled pH. *Waste Management & Research*. **25**. 556-565.
- [23] Ramalho R. S. (1993). Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverté.
- [24] Romero G. (2000). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios por métodos fisicoquímicos: influencia del pretratamiento sobre el proceso de adsorción como etapa de pulimiento. Tesis de Maestría. UNAM.

- [25] Méndez, N., Medina, H., Quintal, F., Sauri, R. & Castillo, B. (2002). Tratamiento de lixiviados con carbón activado. *Ingeniería* 6-3. Facultad de Ingeniería – UADY. pp. 19.
- [26] Metcalf & Eddy Inc. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales “Tratamiento, vertido y reutilización”*. Volumen I. 3ª Edición. Mc Graw Hill.
- [27] Li, X., Zhao, Q., Hao, X. (1999). Ammonium removal from landfill leachate by chemical precipitation. *Waste Management*. **19**. 409-415.
- [28] Li, T., Li, X., Chen, J., Zhang, G., y Wang, H. (2007). Treatment of landfill leachate by electrochemical oxidation and anaerobic process. *Water Environment Research*. **79** (5). 514-520.
- [29] Gupta, S., y Singh, G. (2007). Assessment of the efficiency and economic viability of various methods of treatment of sanitary landfill leachate. *Environ Monit Assess*. **135**. 107-117.
- [30] Zhao, Y.C., Li, H., Wu, J., Gu, G.W. (2002). Treatment of leachate by aged-refuse-based biofilter. *Journal Environmental*. **128**, 662-668.
- [31] Lei, Y., Shen, Z., Huang, R., y Wang, W. (2007). Treatment of landfill leachate by combined aged-refuse bioreactor and electro-oxidation. *Water Research*. **41**. 2417-2426.
- [32] Méndez, N., Castillo, E., Sauri, M., Quintal, C., Giacoman, G., Jiménez, B. (2004). Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario. *Ingeniería* 8-2. Facultad de Ingeniería – UADY. p. 155.
- [33] Orta, de V., Rojas, V., Yañez, I., Monje, I., & Londoño, J. (2006). Alternativa de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en plantas de aguas residuales urbanas. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Vol. I. Núm.1.

- [34] Instituto Nacional Estadística y Geografía (2008). Área Metropolitana del la Ciudad de México. Estadísticas ambientales. Tema: Medio Ambiente. Asentamientos y Actividades Humanas. Residuos.
- [35] Cisneros, P., Ventura, C., Meza, G., Chávez, M., Colado, A., y Castañón, G., (2007). Composición fisicoquímica de los lixiviados generados en el basurero municipal de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Bol. Soc. Quím.* 1. 39-41.
- [36] Nájera, H.; Castañón, J.; Figueroa, J. y Rojas-Valencia, M. (2009). Caracterización y tratamiento fisicoquímico de lixiviados maduros producidos en el sitio de disposición final de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Barranquilla, Col. p. 1-9

