

CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PORCINAS Y SU TRATAMIENTO POR DIFERENTES PROCESOS EN MÉXICO

Marco Antonio GARZÓN-ZÚÑIGA* y Gerardo BUELNA

Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales del IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua México

*Autor responsable; marco.cuerna@gmail.com

(Recibido febrero 2013, aceptado noviembre 2013)

Palabras clave: efluentes porcinos, digestores anaerobios de líquidos y sólidos, biofiltros, fosas de decantación, reuso de agua residual tratada en riego agrícola

RESUMEN

La mayoría de los sistemas de tratamiento de efluentes de granjas porcinas a escala real presentan bajas eficiencias de remoción de contaminantes debido a que se han aplicado sistemas que no toman en cuenta la gran variación de concentración de contaminantes de los efluentes de diferentes procesos productivos (maternidad, destete, engorda y mezcla). Este trabajo presenta una investigación sobre la variación en la composición de 14 efluentes de granjas porcinas en México y la eficiencia de cinco diferentes procesos de tratamiento aplicados a escala real. Comparando efluentes de un mismo proceso productivo, p.e. engorda, la concentración aumenta con el tamaño de la granja como sigue: granjas chicas hasta 2500 puercos (la DQO varía entre 3478 y 9300 mg/L); granjas medianas con 2500 a 7999 puercos (la DQO varía entre 19344 y 38544 mg/L); granjas grandes con 8000 o más puercos (la DQO varía entre 34310 y 40498 mg/L). Este aumento en la concentración se debe principalmente a que las granjas de mayor tamaño hacen un uso más eficiente del agua. Por otra parte, en granjas del mismo tamaño también hay una diferencia en la concentración de contaminantes dependiendo del proceso productivo. P.e. se observó que para las granjas de tamaño medio la concentración de DQO aumenta como sigue: maternidad 3500 mg DQO/L; aguas mezcladas entre 19365 y 25205 mg DQO/L; destete 37498 mg DQO/L y engorda entre 19334 y 38544 mg DQO/L. Con respecto a los sistemas de tratamiento actualmente aplicados se determinó que el sistema que presenta la mejor eficiencia fue el digestor anaerobio de líquido y sólidos (dalys) operado con un tiempo de retención hidráulico (TRH) ≤ 60 d, con el cual, al tratar los efluentes de engorda de dos granjas grandes, se obtuvieron las siguientes eficiencias de remoción: SST ≥ 92.5 %; DQO ≥ 97 %; DBO₅ ≥ 96 %; P-T ≥ 66 % y 2 unidades logarítmicas de CF. Sin embargo, a pesar de las altas eficiencias de remoción que presentaron los dalys, la calidad del efluente no es adecuada para ser descargado en cuerpos de agua ni para ser reutilizado en riego agrícola, por lo que se requiere un sistema que continúe el tratamiento y que remueva principalmente nitrógeno, SST, CF y DQO, para lo cual se recomienda un sistema aerobio. Una opción interesante, por ser de bajo costo de operación y mantenimiento, es el sistema de filtración por percolación sobre materiales de empaque orgánicos con bajas tasas de filtración que puede ser operado por el mismo personal de las granjas y presentar de forma estable altas eficiencias de remoción.

Key words: pig farm effluents, anaerobic digesters for liquids and solids, biofilters, decantation fosse, wastewater reuse in agricultural irrigation

ABSTRACT

Many wastewater treatment systems in piggeries have low removal efficiencies due to the processes installed do not take in account the high variation of pollutants concentration in the effluents of different productive stages (maternity, nursery, accretion, and mixed effluents). This work presents a research about the variation in pollutants concentration in 14 effluents of pig farms in Mexico and the removal efficiency reached in five different full scale treatment processes applied at industrial scale. Comparing the pollutants concentration in effluents from a same productive stage, e.g., accretion, the pollutants concentration increase with the farm size as follows: in small farms (until 2500 pigs) the chemical oxygen demand (COD) was between 3478 and 9300 mg/L; in middle size farms (2500 to 7999 pigs) the COD was between 19344 and 38544 mg/L and in big farms (≥ 8000 pigs) the COD was between 34310 and 40498 mg/L. This increase in concentration is due to the fact that water is used more efficiently in big farms. On the other side, in farms with the same size, it was also observed a difference in the pollutants concentration, depending on the productive stage. For example, in middle size farms, the COD concentration increased as follows: maternity (3500 mg COD/L); mixed effluents (between 19365 and 25205 mg COD/L); nursery (37498 mg COD/L) and accretion (between 19334 and 38544 mg COD/L). In relation with the full scale treatment systems evaluated it was determined that the one with the best pollutants removal efficiency was the anaerobic digester of liquid and solids (dalys) operated with a hydraulic residence time (HRT) ≤ 60 d. Treating two accretion effluents, the following efficiencies were achieved: TSS $\geq 92.5\%$, COD $\geq 97\%$, BOD₅ $\geq 96\%$, TP $\geq 66\%$ and 2 log units of fecal coliforms (FC). However, even though the high removal efficiencies achieved in the dalys, the treated effluent quality is not enough, neither to discharge it directly in water bodies nor to reuse it in agricultural irrigation, therefore it is necessary to continue the treatment for removal of nitrogen, TSS, FC and COD in an aerobic polishing system. An interesting option is an aerobic filtration (percolation) system over organic materials. Which is operated at low filtration rate and require a low operation and maintenance cost; being successfully operated by the pig farm workers themselves.

INTRODUCCIÓN

La industria porcina en el mundo produjo, entre 2005 y 2010, aproximadamente 1200 millones de puercos anualmente, de los cuales en 2010 China produjo aproximadamente 650 millones, Europa 260 millones y los EUA 115 millones. En México esta industria, entre 2000 y 2010, tuvo un crecimiento de aproximadamente 15 %, pasando de una producción de 14 millones a 15 millones de puercos anualmente. De acuerdo con la Confederación de porcicultores mexicanos (2012) los principales productores de carne de puerco en el país son Sonora (19 %), Jalisco (19 %), Puebla (10 %), Guanajuato (9 %), Yucatán (8 %), Veracruz (9 %), Michoacán (3 %), Tamaulipas (1 %), Oaxaca (2 %), Chiapas (2 %) y el resto del

país (18 %). Sin embargo, esta importante agroindustria en México presenta problemas ambientales y sociales debido a la contaminación de las aguas y del suelo que se encuentran a su alrededor que, además, son acompañados de malos olores. Un estudio realizado hace aproximadamente una década (Pérez 2001) reveló que solamente un 60 % de las granjas separaba sólidos; de las cuales aproximadamente 50 % acostumbraban acumularlos adentro o afuera de la granja, ocasionando graves problemas de olores, moscas y patógenos. En cuanto al tratamiento de los residuos líquidos 9 % no contaba con ningún tratamiento, 27 % con dos procesos unitarios de tratamiento y 50 % con tres procesos unitarios de tratamiento. Entre los que se encontraban fosas, lagunas (excavadas en el suelo pero sin impermeabilizar), decantadores, y algunos

digestores y procesos aerobios. Un alto porcentaje de estos sistemas no removía ni el 80 % de la carga orgánica presentándose concentraciones en los efluentes ya tratados entre 406 y 9960 mg DBO₅/L y entre 83 y 20020 mg SST/L. Un estudio más reciente (Cervantes *et al.* 2007) reporta que en el estado de Sonora, México la industria porcina ha provocado efectos severos en el ambiente por la acumulación de desechos sólidos sin tratar y por la contaminación de diferentes cuerpos de agua donde son descargadas sus aguas residuales. Otro estudio (de Victorica-Almeida *et al.* 2008) reporta que en México 28 % de las descargas de granjas porcinas no son tratadas. Las descargas de granjas porcinas deben cumplir con los límites máximos de contaminantes especificados en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996) si descargan en un cuerpo de agua y con la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT 1997) si descargan al suelo para riego agrícola. Sin embargo, casi ninguna granja cumple con la normativa por lo que se hacen acreedoras a sanciones de la Comisión Nacional del Agua. Aun cuando se sabe que en el país los sistemas de tratamiento aplicados en granjas porcinas presentan en general bajas eficiencias de remoción de contaminantes, no hay reportes en la literatura que aborden esta problemática. La cual, en buena parte, se debe a una combinación entre a) el desconocimiento de los vendedores de sistemas de tratamiento de que las aguas residuales de esta agroindustria presentan grandes variaciones en su composición dependiendo del tamaño de la granja, el grado de tecnificación, o el tipo de proceso productivo: es decir si se trata de un sitio 1 maternidad, un sitio 2 destete, un sitio 3 engorda, y b) al hecho de que se han aplicado sistemas de tratamiento convencionales que tienen limitaciones de orden técnico y económico. Esto ha llevado a que los sistemas sean mal diseñados, poco apropiados, mal operados, tanto por falta de personal capacitado como por los altos costos de operación y mantenimiento (aireación y/o insumos). Por tal razón, este artículo tiene por objetivo, presentar un estudio sobre la variación en la composición de las aguas residuales porcinas en México y la eficiencia de diferentes procesos de tratamiento, lo que incluye los puntos siguientes: 1, caracterización de las aguas residuales de esta industria en México para evidenciar las diferencias entre granjas y procesos productivos, 2, evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes en cinco procesos y/o trenes de tratamiento que actualmente son aplicados en diferentes granjas del país, y 3, presentación de las perspectivas para mejorar la calidad de los efluentes con un enfoque de reuso de las aguas residuales tratadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de descargas por sitio productivo

Se realizaron muestreos puntuales en 14 descargas de diferentes procesos productivos (maternidad, destete, engorda y mezcla de ciclo completo) en 11 granjas de diferentes tamaños, ubicadas en zonas de producción porcina intensiva y no intensiva del país; específicamente en los estados de Puebla, Yucatán, Michoacán, Morelos, Campeche y Durango. Durante los muestreos, además se recabó información sobre la capacidad de producción, el volumen de aguas residuales generado, aspectos sobre el uso del agua y el tipo de tratamiento con que cuenta la granja. Las muestras fueron analizadas para los parámetros siguientes de acuerdo con la metodología de los métodos estándar (APHA 1998): demanda química de oxígeno (DQO) por el método colorimétrico de reflujo cerrado 5220 (C); demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de acuerdo con el método de cinco días 5210 (B); sólidos suspendidos totales (SST) por el método seco 2540 (D); sólidos suspendidos volátiles (SSV) por el método de ignición 2540 (E); coliformes fecales (CF) según el método de tubos múltiples 9230 (B); nitrógeno total (NT) por el método de persulfato 4500-N (C); nitrógeno total Kjeldahl (NTK) por el método semi-micro Kjeldahl 4500-Norg (C), nitrógeno de nitritos más nitratos [$\text{N}(\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-)$] por los métodos 4500- NO_2^- (B) y 4500- NO_3^- (B). Los siguientes análisis fueron realizados de acuerdo con el procedimiento Hach: nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) por el método 8038 (Hach) adaptado de los métodos estándar 4500- NH_3 (B) y (C) y fósforo total (PT) por el método del ácido ascórbico 8048 (Hach) equivalente al método estándar 4500-P (E). Adicionalmente se midieron el pH y la conductividad con un medidor marca Hach modelo Sension 156.

La composición del agua residual de todas las granjas fue comparada por proceso productivo (maternidad, destete, engorda y ciclo completo) y por tamaño de granja (granjas chicas de 1000 a 2500 puercos; medianas de 2501 a 7999 puercos y grandes ≥ 8000) con la finalidad de determinar qué clasificación resalta mejor las diferencias entre granjas desde el punto de vista de su composición.

Eficiencia de remoción de contaminantes en diferentes esquemas de tratamiento aplicados

Se hizo una descripción de los siguientes procesos o trenes de tratamiento instalados a escala real y se realizó un muestreo puntual a la salida de cada uno, con el fin de presentar su eficiencia de remoción de

contaminantes: 1, fosa de homogeneización o cárcamo de almacenamiento; 2, fosa con adición de enzimas; 3, digestor anaerobio de líquidos y sólidos (dalys); 4, fosa de homogeneización + digestor dalys; 5, dalys + 2 lagunas en serie. Las muestras fueron analizadas para los mismos parámetros que se midieron al agua residual cruda, los cuales fueron mencionados en el apartado anterior. Adicionalmente, se recabó información sobre la actividad en la granja al momento de la toma de muestras para el análisis de los resultados.

Alternativas para mejorar la calidad de los efluentes

Se realizó un análisis bibliográfico enfocado a estudios internacionales que combinan diferentes tecnologías, presentando aquellas opciones que permitirían obtener efluentes que cumplan con las normativas mexicanas de descarga.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las descargas de las granjas por proceso productivo

En los cuadros I y II se presenta una caracterización de la descarga por proceso o sitio productivo muestreado en cada granja. Los procesos se clasifican con números como se indica a continuación: 1) Maternidad (vientres y lechones de 0 a 20 días); 2) Destete (lechones de 20 a 45 días); 3) Engorda (puercos de 45 a 150 días aproximadamente o de 10 a 110 kg de peso); 4) Gestación (vientres preñados) y 5) Mezcla (granjas en donde la descarga de dos o más etapas de desarrollo se mezclan). En los cuadros también se puede apreciar el tamaño (número de puercos) de cada granja muestreada.

En las granjas 1 y 5 fueron muestreadas las aguas

CUADRO I. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES POR SITIO PRODUCTIVO DE DIFERENTES GRANJAS PORCINAS DE TAMAÑO MEDIANO

Granja	1		2			3	4	5*
	Maternidad	Destete	Maternidad y gestación	Engorda	Mezcla	Engorda	Mezcla	Maternidad
Proceso productivo caracterizado								
Capacidad animales	6 000	6 600	3 000	3 000	3 000	5 000	5 500	5 600
Tamaño de granja	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana
Disponibilidad de agua	Media	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Media
Clima del lugar	Cálido-semiseco	Cálido-semiseco	Sub-tropical	Sub-tropical	Sub-tropical	Sub-tropical	Tropical	Templado
Observaciones sobre el muestreo	Durante lavado de naves	Durante lavado de naves	Durante lavado de naves	Durante lavado de naves	Durante lavado de naves	Durante lavado de naves	Dato no disponible	Final de lavado poca agua
DQO (mg/L)	3 339	37 498	19 365	38 544	6 419	19 344	25 205	3 809
DBO ₅ (mg/L)	2 494	5 600	9 262	9 188	2 646	9 613	8 460	1 657
SST (mg/L)	1 130	16 357	11 250	25 166	2 210	10 125	15 042	1 994
SSV (mg/L)	478	13 000	9 125	21 500	1 657	7 875	11 792	1 852
N Total (mg/L)	550	1 345	1 371	1 452	576	1 515	2 034	
NTK (mg/L)	550	1 345	1 369	1 450	574	1 515	2 033	405
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	380	440	640	1 270	380	1 500	1 760	178
N-(NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻) (mg/L)	0.13	0.13	2.06	1.87	1.89	0.13	0.63	0.13
P Total (mg/L)	28.6	79.5	118.6	149	41.1	76.7	180.1	41.4
pH	7.83	6.14	6.99	6.79	7.17	7.06	6.94	6.87
Coliformes fecales	1.50E+07	2.10E+07	4.60E+08	1.10E+08	9.30E+07	4.60E+04	9.20E+08	1.60E+08
DBO/DQO	0.75	0.15	0.48	0.24	0.4	0.50	0.3	0.4

* Granja de tipo ciclo completo. Pero al momento del muestreo solo estaba descargando el área de maternidad

CUADRO II. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES POR SITIO PRODUCTIVO DE DIFERENTES GRANJAS

Granja	6	7	8	9†	10	11
Proceso productivo caracterizado	Mezcla	Engorda	Engorda	Engorda	Engorda*	Engorda
Capacidad animales	2 200	1 200	1 000	1 560	10 800	15 600
Tamaño de granja	Chica	Chica	Chica	Chica	Grande	Grande
Disponibilidad de agua	Media	Media	Abundante	Poca	Media	Media-Baja
Clima del lugar	Templado	Templado	Tropical	Extremo Seco	Templado	Cálido Semi-seco
Observaciones sobre el muestreo	Durante lavado de las naves	Durante lavado de las naves	Dato no disponible	Durante lavado de naves	Se liberó el agua de una nave de engorda para tomar muestra	Durante lavado de naves
DQO (mg/L)	7 922	9 300	3 478	16 888	40 498	34 310
DBO ₅ (mg/L)	5 330	5 751	996	11 697	15 061	6 092
SST (mg/L)	3 269	2 332	942	19 857	25 034	42 500
SSV (mg/L)	2 981	2 030	672	18 142	19 334	32 500
N Total (mg/L)			524	1 179	1 048	1 666
NTK (mg/L)	1 018	1 907	524	1 179	1 048	1 666
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	496	1 472	200	875	844	890
N-(NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻) (mg/L)	0.13	0.13	0.13	0.12	0.13	0.13
P-Total (mg/L)	101.6	62.2	27.4	214	430.1	97.6
pH	7.08	7.75	7.80		6.65	7.30
Coliformes fecales	1.30E+08	7.90E+05	1.60E+ 06	1.50E+08	1.60E+09	4.70E+07
DBO/DQO	0.7	0.6	0.3	0.69	0.4	0.18

† Granja de tipo engorda final los puercos se reciben de 70 kg y se llevan hasta 105kg por lo que solo están aproximadamente 1.5 meses en la granja. En la granja también se hace sacrificio de animales para venta de carne.

* Granja de tipo ciclo completo. Pero al momento del muestreo se liberó el agua de una porqueriza de engorda para tomar la muestra.

residuales del proceso productivo de maternidad (sitio 1). En ambos casos se observaron concentraciones parecidas: DQO de 3339 y 3809 mg/L, DBO₅ de 2494 y 1657 mg/L, una concentración de SST de 1130 y 1994 mg/L y una concentración de NTK de 550 y 405 mg/L para las granjas 1 y 5, respectivamente (**Cuadro I**). Estas semejanzas se presentaron aún cuando ambas granjas se localizan en estados diferentes y con climas distintos, una en zona cálida seca y otra en zona templada. Sin embargo, ambas son de tamaño mediano (alrededor de 6000 puercos) y ambas tienen una disponibilidad media de agua.

También se muestreó el agua residual del proceso productivo de engorda (sitio 3) de dos granjas de tamaño mediano (granjas 2 y 3), en este caso loca-

lizadas en zona subtropical con alta disponibilidad de agua. Se observó que el agua residual de engorda tiene una mayor concentración de contaminantes que el agua residual de las áreas de maternidad. Comparando los dos sitios 3 se observa alta variación en la DQO (entre 19 334 y 38 544 mg/L) y en los SST (entre 10 125 y 25 166 mg/L); pero una DBO₅ (entre 9188 y 9613 mg/L) y una concentración de NTK (entre 1450 y 1515 mg/L) más similares entre sí (**Cuadro I**).

En otras dos granjas de tamaño mediano, localizadas en zona subtropical y tropical (granjas 2 y 4) se muestrearon aguas residuales mezcladas (5) de diferentes áreas de producción. En el primer caso una mezcla de las áreas de maternidad y gestación y en el

segundo caso la mezcla de todos los sitios; se encontró en las aguas mezcladas una concentración intermedia de contaminantes entre la engorda y la maternidad. Esto es una DQO entre 19365 y 25205 mg/L; SST entre 11250 y 15042 mg/L; una DBO₅ entre 9262 y 8460 mg/L y una concentración de NTK entre 1369 y 2033 mg/L para las granjas 2 y 4, respectivamente (**Fig. 1**).

Finalmente, en una granja de tamaño mediano localizada en zona cálida seca se muestreó el agua residual del área de destete y se observó que la concentración de contaminantes es muy alta, similar a la de la zona de engorda, presentando una DQO de 37498 mg/L pero con una menor concentración de DBO₅ (5600 mg/L) y de SST (16357 mg/L) y una concentración de NTK de 1345 mg/L (**Fig. 1**).

Con base en los resultados anteriores se determinó que en las granjas de tamaño medio la concentración de contaminantes en las diferentes áreas sigue el siguiente comportamiento: maternidad < aguas mezcladas < destete ≤ engorda (**Fig. 1**).

En el caso de granjas de tamaño chico (menos de 2500 puercos) se muestreó el proceso productivo

de engorda en tres granjas: una localizada en zona con clima templado y disponibilidad media de agua (granja 7), otra en zona tropical con alta disponibilidad de agua (granja 8) y una más en zona con clima semiseco extremo y poca disponibilidad de agua (granja 9). En las dos primeras, la concentración de contaminantes fue mucho menor a la encontrada en las áreas de engorda de granjas medianas. En la granja de zona tropical, el agua residual del sitio de engorda presentó concentraciones parecidas a las del área de maternidad de las granjas de tamaño mediano. Esto es: DQO de 3478 mg/L; DBO₅ de 996 mg/L; SST de 942 mg/L y NTK de 524 mg/L. En la granja de zona templada el agua residual de engorda presentó concentraciones mayores a las de maternidad pero menores a las de las aguas mezcladas en granjas de tamaño mediano. Esto es: DQO de 9300 mg/L; DBO₅ de 5751 mg/L; SST de 2332 mg/L y NTK de 1907 mg/L (**Cuadro II**). En ambos casos la menor concentración, respecto de las granjas medianas, puede atribuirse a que el uso del agua es muy poco eficiente y el resultado es mayor consumo de agua por animal y mayor dilución del efluente. En el caso de la granja 11,

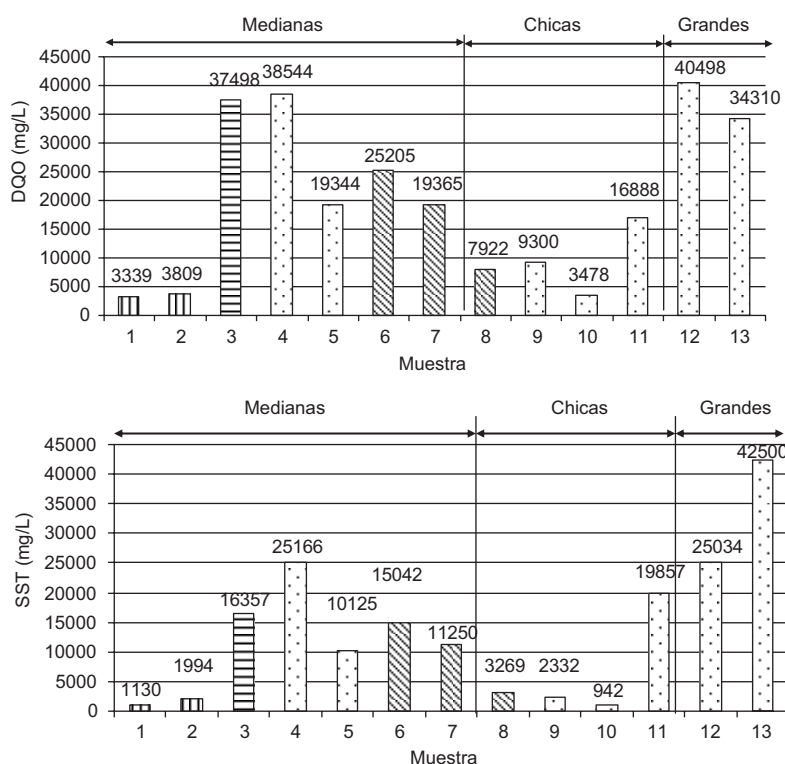


Fig. 1. Comparación de la concentración de materia orgánica y sólidos en la descarga de diferentes sitios productivos (líneas verticales=maternidad; líneas horizontales=destete; puntos=engorda; líneas oblicuas=mezcla) en granjas porcinas de diferentes tamaños (Chica=menos de 2500 cerdos; Mediana=2500-7999 cerdos; Grande= más de 8000 cerdos)

ubicada en zona con clima semiseco extremo y poca disponibilidad de agua, el recurso se utiliza más eficientemente (7.7 L puerco/d) y el efluente se encuentra mucho más concentrado que en el caso de otras granjas, p.e. la granja 3 ubicada en zona con clima subtropical y alta disponibilidad de agua en donde se utilizan 15 L puerco/d. La restricción en la disponibilidad del agua fuerza a hacer un mejor uso del recurso y la concentración de contaminantes en la granja 11 es semejante a la de las granjas de engorda de tamaño mediano o grande dependiendo del contaminante. Esto es: DQO de 28 335 mg/L; DBO₅ de 18 848 mg/L; SST de 19 857 mg/L y NTK de 2270 mg/L (**Cuadro II**). Cabe mencionar que el caso de esta granja es particular porque los animales ingresan con 70 kg y se engordan hasta 105 kg, y además en el sitio también se hace el sacrificio de algunos animales. Por esta razón las concentraciones de DBO₅ y SST son mas elevadas con respecto a la DQO en granjas de engorda de tamaño mediano.

En la granja 6 de tamaño chico, ubicada en zona templada, se muestreó el efluente mezclado y se observó que la concentración de los contaminantes es mayor a la de un proceso productivo de maternidad y mucho menor a las aguas mezcladas de una granja de tamaño mediano. Esto es: DQO de 7922 mg/L; DBO₅ de 5330 mg/L; SST de 3269 mg/L y NTK de 1018 mg/L (**Cuadro II**).

También se muestrearon las aguas del área de engorda en dos granjas de tamaño grande (de 10 800 y 15 600 puercos, respectivamente) una localizada en zona templada (granja 10) y otra en zona con clima cálido semiseco (granja 11). En estos efluentes se encontró una concentración de contaminantes mayor que en los efluentes de engorda de granjas medianas. Esto se debe a que el uso del agua es más eficiente y el consumo diario por animal es menor. Las concentraciones encontradas son las siguientes: DQO entre 34 310 y 40 498 mg/L; SST entre 25 034 y 42 500 mg/L; DBO₅ entre 6092 y 15061 mg/L y NTK entre 1048 y 1666 mg/L (**Cuadro II**). En general se observa que esta agua tienen una proporción de materia orgánica biodegradable más baja (relación DBO/DQO baja entre 0.37 y 0.18). Esto también se debe al uso más eficiente del agua que favorece la concentración de una mayor proporción de sustancias recalcitrantes.

Algunos resultados previamente reportados en la literatura coinciden con la clasificación que presentamos por tamaño de granja. Por ejemplo, Montalvo *et al.* (2007) presentan una caracterización por sitio (maternidad, destete y engorda) para una granja del estado de Puebla con 1000 puercos, en donde las

concentraciones de contaminantes varían como sigue: DQO entre 3468 y 4489 mg/L; SST entre 1000 y 2980 mg/L; DBO₅ entre 1157 y 2162 mg/L y NTK entre 65 y 1088 mg/L. Estos valores son muy bajos y comparables a los que en el presente documento se encontraron en granjas chicas ubicadas en zonas con abundante disponibilidad de agua.

Por otra parte, Pérez (2001) reporta los siguientes intervalos de concentración de contaminantes para granjas de la zona productora de Michoacán y Guanajuato: DBO₅ entre 580 y 8580 mg/L; SST entre 83 y 20020 mg/L; N-total entre 294 y 1520 mg/L y P-total entre 34 y 2226 mg/L. Estos valores coinciden con los valores de concentración que en el presente documento se encontraron en granjas de tamaño chico a mediano, ubicadas en zonas templadas con disponibilidad de agua entre media y alta.

Comparando la concentración de las descargas en México con las de otros países ocurre que, por ejemplo en Canadá, la descarga de una granja chica (200 cerdos) de ciclo completo, a la salida de una fosa de homogeneización presenta las siguientes concentraciones promedio de contaminantes: 15462 mg DQO/L; 9320 mg DBO₅/L; 1970 mg SST/L y 2080 mg NTK/L (Garzón-Zúñiga *et al.* 2007). Esta concentración se encuentra en el mismo nivel que la encontrada en el presente documento en la granja chica ubicada en clima extremo con escasez de agua en donde se hace un uso más eficiente de este recurso y por lo tanto las descargas son más concentradas que en las otras granjas chicas de México.

Buelna *et al.* (2008) reportan las siguientes concentraciones para el efluente de una granja chica (800 puercos) de ciclo completo en Quebec, Canadá: 13 000 mg DBO₅/L; 16 000 mg SST/L; 2300 mg NTK/L y 650 mg P-total/L. Éstas corresponden a las concentraciones encontradas en sitios de engorda y destete de granjas de tamaño mediano a grande en el presente documento. Esta comparación revela que en Canadá, aún en las granjas pequeñas, el uso del agua es muy eficiente ya que las concentraciones reportadas son elevadas, practica que debe ser favorecida en México.

Evaluación de diferentes esquemas de tratamiento aplicados

Tratamiento en fosa o cárcamo de almacenamiento

Este proceso unitario es muy importante ya que la fosa sirve para homogeneizar el caudal y la concentración de las descargas intermitentes de la granja a lo largo del día. En el **cuadro III** se presenta la concentración de contaminantes de entrada y salida de una fosa, en una granja de ciclo completo, de tamaño medio (5000 cerdos), ubicada en zona tropical. En

CUADRO III. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE UNA FOSA DE HOMOGENEIZACIÓN

	Granja 4		
	Entrada a fosa	Salida de fosa	Remoción (%)
DQO (mg/L)	25 205	15 445	38.7
DBO ₅ (mg/L)	8 459	6 152	27.3
SST (mg/L)	15 041	7 916	47.4
SSV (mg/L)	11 791	6 000	49.1
NTK (mg/L)	2 033	1 466	27.9
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	1 760	1 200	31.8
N-(NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻) (mg/L)	0.63	0.13	79.4
P _{Total} (mg/L)	180.1	52.4	70.9
pH	6.94	7.58	
Coliformes fecales	9.20E+08	1.40E+07	98.5

*Granja 4, tamaño medio ubicada en zona tropical

ella se puede apreciar que en la fosa se retienen el 47 % de los SST y el 49 % de los SSV; 38 % de la DQO; 27 % de la DBO₅ y 70 % del P-total, muy probablemente porque gran parte de estos contaminantes se encuentran en forma de residuos particulados que son retenidos por sedimentación. Finalmente, también se puede observar una reducción de una unidad logarítmica de CF y una disminución de 32 % del N-NH₄⁺. Esta última corresponde más bien a un efecto de homogeneización (ya que el muestreo fue puntual) y no a un proceso de transformación porque en la fosa no hay condiciones aerobias para la oxidación del ión amonio. Estas eficiencias coinciden con el intervalo de remoción (SST entre 55 % y 70 %; DQO entre 4 y 60 %) presentado por Ramírez *et al.* (2010) para granjas de ciclo completo en un proceso

de sedimentación después de 3 h, así como con los resultados presentados por Buelna *et al.* (2008) en una fosa de decantación con aproximadamente 10 d de TRH: 35 % de DBO₅, 94 % de SST, 71 % de P-total y 26 % de NTK. Como se puede observar las eficiencias son similares a las reportadas por otros autores. Sin embargo, la concentración de contaminantes aún es muy elevada (**Cuadro III**) por lo que este proceso sólo debe ser considerado como un paso de tratamiento primario y no como un tratamiento completo (primario, secundario y terciario).

Tratamiento en fosa con adicción de enzimas

En una granja chica ubicada en zona templada (granja 7), el piso donde se encuentran los cerdos es una rejilla de concreto (porquerizas con “Slap”) y por debajo de este hay una fosa que recibe las excretas, la orina de los cerdos y el agua de lavado. En la fosa se adicionan enzimas con el objetivo de estabilizar los sólidos lo cual, de acuerdo con los propietarios es bueno porque reduce sustancialmente la generación de amoníaco de las excretas (y la corrosión) y, porque cuando se saca el lodo de la fosa lo disponen directamente en el suelo. En estos sistemas los residuos sólidos que caen a la fosa se sedimentan y el nivel del agua se incrementa hasta llegar a un rebosadero por donde sale el agua de forma continua. Los propietarios consideran que el tiempo que pasa el agua en la fosa en contacto con la enzima (la cual se adiciona continuamente) permite realizar un tratamiento parcial del agua residual. Finalmente, después de cada ciclo de engorda el lodo tratado es descargado por un sistema de desagüe al suelo. En el **cuadro IV** se presentan los resultados de un muestreo puntual

CUADRO IV. EFICIENCIA DE TRATAMIENTO EN UNA FOSA SIN Y CON ADICIÓN DE ENZIMAS

Parámetro	*Granja 7		
	Agua residual en fosa sin adición de enzima	Agua residual en fosa con adición de enzima	Diferencias de remoción sin y con adición de enzima (%)
DQO (mg/L)	9 300	10 243	-10.14
DBO ₅ (mg/L)	5 751	6 697	-16.45
SST (mg/L)	2 332	2 886	-23.76
SSV (mg/L)	2 030	2 636	-29.85
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	6 405	4 305	32.79
NTK (mg/L)	1 907	1 450	23.96
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	1 472	1 168	20.65
N-(NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻) (mg/L)	0.13	0.13	0.0
P _{Total} (mg/L)	62.2	58.3	6.27
pH	7.75	7.82	
Coliformes fecal.	7.90E+05	7.90E+05	0.0

*Granja 7 chica ubicada en zona templada con disponibilidad media de agua

realizado al agua residual cruda homogeneizada en una fosa sin y con adición de enzima en la misma granja. Como se puede apreciar, la adición de enzimas a la fosa de homogeneización favorece un aumento de los SST (23 %) y de la materia orgánica, DQO (10 %) y DBO₅ (16 %), contrariamente a lo esperado por los propietarios de las granjas, es decir a una reducción de los contaminantes. Este incremento puede deberse al ataque enzimático y desintegración de las excretas y a la consecuente liberación de contaminantes que se disuelven ó se mantienen en suspensión del agua residual. Por otra parte, lo que si se observa es una ligera reducción de nutrientes: 23 % del NTK y 6 % del P-Total, misma que puede relacionarse con procesos de asimilación. Sin embargo, las concentraciones de materia orgánica, SST, nutrientes y CF siguen siendo muy elevadas y la calidad del efluente sigue estando muy lejos de las normas mexicanas requeridas para poder ser descargado en cuerpos receptores de agua (NOM-001-SEMARNAT-1996) y/o para reutilizado.

Digestores anaerobios de líquido y sólidos (dalys)

En la primera década de los años 2000 se comenzaron a instalar, en algunas granjas porcinas del país, digestores anaerobios para tratar los efluentes crudos sin separar los sólidos. Estos dalys fueron inicialmente financiados por los bonos de carbono por lo que uno de sus principales objetivos es maximizar la producción de biogas para destruir los gases de efecto invernadero (GEI) en una antorcha y/o para reutilizar el biogas en la producción de energía eléctrica. Por esta razón operan con tiempos

de retención hidráulica (TRH) muy altos (≤ 60 d). En el **cuadro V** se presentan los valores de entrada y salida de dos dalys instalados en granjas grandes ($>10\,000$ puercos). El primero se encuentra en zona cálida semiseca (granja 11) y el segundo en zona templada (granja 10). En el cuadro se puede observar que la reducción de la materia orgánica y de los sólidos es muy buena. La DQO se redujo entre 34 310 y 40 498 mg/L a valores entre 797 y 267 mg/L, siendo la remoción ≥ 97 % en ambos casos. La DBO₅ pasó de valores entre 6092 y 15 060 mg/L, a menos de 300 mg/L (remoción ≥ 96 %). Con respecto a la los SST, en la granja 11 la concentración pasó de 42 500 mg/L a 169 mg/L (remoción del 99.6 %). Mientras que en la granja 10 la remoción fue menor (92.5 %) quedando una concentración importante de SST en el efluente (1880 mg SST/L). La menor eficiencia se debió a que del segundo digestor salían lodos biológicos (biomasa) junto con el efluente tratado, porque éste no había sido purgado en más de 2 años de operación continua. Los dos digestores también presentaron una remoción de P-total cercana al 70 %, la cual es similar a la observada en la fosa o cárcamo de homogeneización, razón por la cual se infiere que el mecanismo principal puede ser la sedimentación de los residuos sólidos de alimento y de las partículas de estiércol. Finalmente, se observó que en ambos digestores se presentó una reducción de dos unidades logarítmicas de coliformes fecales, equivalente a 99 % de remoción. Con estos resultados se puede comprobar que los dalys presentan muy elevadas eficiencias de remoción de contaminantes,

CUADRO V. DESEMPEÑO DE UN DIGESTOR ANAEROBIO INSTALADO EN DOS GRANJAS PORCINAS

Parámetro	*Granja 11			†Granja 10		
	Agua Residual Cruda	Salida Dalys ^o	Remoción (%)	Agua Residual Cruda	Salida Dalys ^o	Remoción (%)
DQO (mg/L)	34 310	797	97.7	40 498	267	99.3
DBO ₅ (mg/L)	6 092	147	97.6	15 060	540	96.4
SST (mg/L)	42 500	169	99.6	25 034	1 880	92.5
SSV (mg/L)	32 500	99	99.7	19 334	1 685	91.3
NTK (mg/L)	1 666	1674		1 048	774	26.0
P _{Total} (mg/L)	97.6	32.8	66.3	430.1	70.9	83.5
pH	7.30	7.80		6.65	7.82	
CF (NMP/100mL)	4.70E+07	2.80E+05	99.4	1.60E+09	2.20E+07	98.6

*Granja 11, tipo engorda con 15 600 cerdos. El agua de las naves es dirigida a un cárcamo de bombeo de donde se envía al digestor anaerobio. La muestra se tomó a la entrada del digestor después del cárcamo en donde el agua se homogeneiza. Muestras puntuales.

†Granja 10, tipo ciclo completo con 10 800 cerdos. El agua del área de engorda estaba retenida en el canal de desalojo que lleva al digestor. Para tomar la muestra de entrada al digestor se desbloqueó el canal. No hay cárcamo de homogeneización. Muestras puntuales.

^oDigestor anaerobio de Líquidos y sólidos (Dalys).

mayores al 90 % para casi todos los parámetros. Sin embargo, su concentración remanente de SST, DBO₅, nitrógeno y CF son aún muy elevadas para cumplir con la normativa mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996), para descargar a cuerpos de agua. Por otra parte, las concentraciones remanentes de SST y CF sobrepasan la regulación mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997) para poder reutilizar el efluente tratado en riego de campos agrícolas.

Fosa de homogeneización + digestor anaerobio de líquido y sólidos (dalys)

En la granja 4 las aguas residuales de los corrales de las diferentes etapas productivas se mezclan en una fosa, con lo cual se amortiguan las variaciones de concentración de cada descarga (**Fig. 2**). Se puede observar que en la fosa se remueve 39 % de la DQO y 27 % de la DBO₅. Mientras que en el digestor se remueve adicionalmente 82 % de la DQO y 94 % de la DBO₅. Respecto a los sólidos, en la fosa se retiene el 47 % de los SST y el digestor remueve el 76 % adicional. En cuanto a los nutrientes, en la fosa se presenta una pequeña disminución (10 %) del N-total, debida a un proceso de sedimentación. Mientras que en el digestor prácticamente la concentración de nitrógeno no cambia. Respecto al fósforo, en la fosa se remueve un 70 % y en el digestor adicionalmente se remueve 66 %. En ambos casos, la disminución se puede atribuir principalmente a procesos de sedimentación de residuos de alimento y de partículas sólidas de estiércol y en menor medida a una asimilación bacteriana. Finalmente, con respecto a las coliformes fecales, se observó una reducción de una unidad logarítmica en la fosa y

cuatro unidades logarítmicas adicionales en el dalys. A pesar de las buenas eficiencias de remoción de este sistema, si se comparan las eficiencias del digestor dalys sin y con fosa previa (**Cuadros V y VI**) se observa que las eficiencias del digestor disminuyeron en el segundo caso. Esto puede deberse a que la concentración de entrada al digestor es menor por tratar agua más diluida de la mezcla de todos los sitios y por pasar previamente por una fosa donde las concentraciones se reducen aún más por la sedimentación de las partículas sólidas de contaminantes. Al parecer, adicionar una fosa previa a un dalys no mejora la eficiencia global del tratamiento y las concentraciones de SST, DBO₅, nitrógeno y CF, siguen siendo elevadas para cumplir con la normatividad mexicana para descarga en cuerpos de agua (NOM-001-SEMARNAT-1996) y tampoco alcanza a cumplir con las regulaciones mexicanas para ser reutilizada en riego de campos agrícolas (NOM-003-SEMARNAT-1997) con respecto a SST y CF. Por otra parte, aunque globalmente se remueve un 89 % de la DQO, la concentración final sigue siendo muy elevada (2824 mg DQO/L) y debe buscar reducirse aunque no se encuentra todavía considerada dentro de las regulaciones mexicanas. Sin embargo, las autoridades mexicanas encargadas de la normatividad de las descargas se encuentran discutiendo la inclusión de éste y otros parámetros.

Digestor anaerobio dalys + 2 lagunas de estabilización en serie

En dos granjas de tipo ciclo completo (6 y 5) localizadas en zona templada, que cuentan un tren de tratamiento compuesto por digestor anaerobio dalys

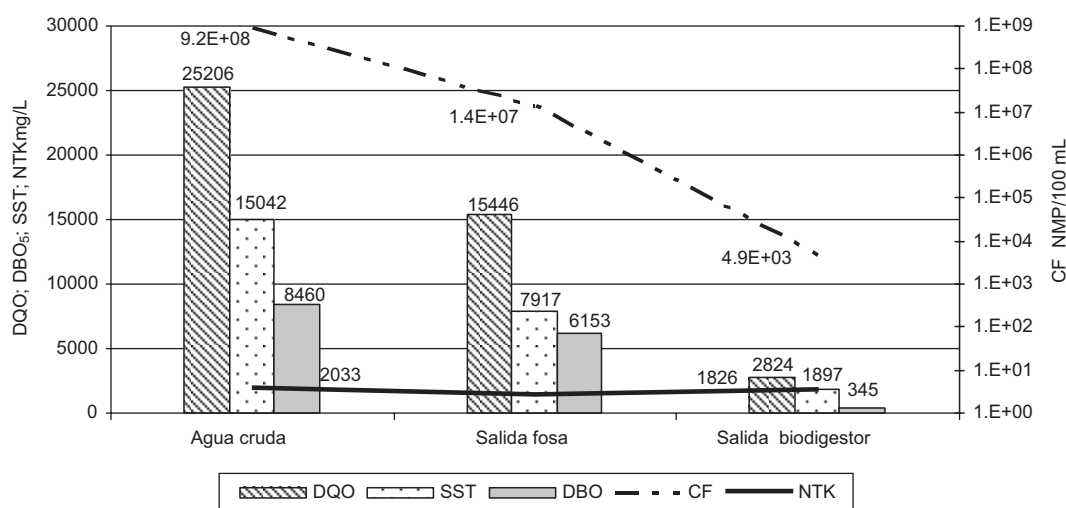


Fig. 2. Eficiencias de remoción de contaminantes en el sistema de tratamiento compuesto por fosa de homogeneización y digestor anaerobio de líquidos y sólidos (dalys)

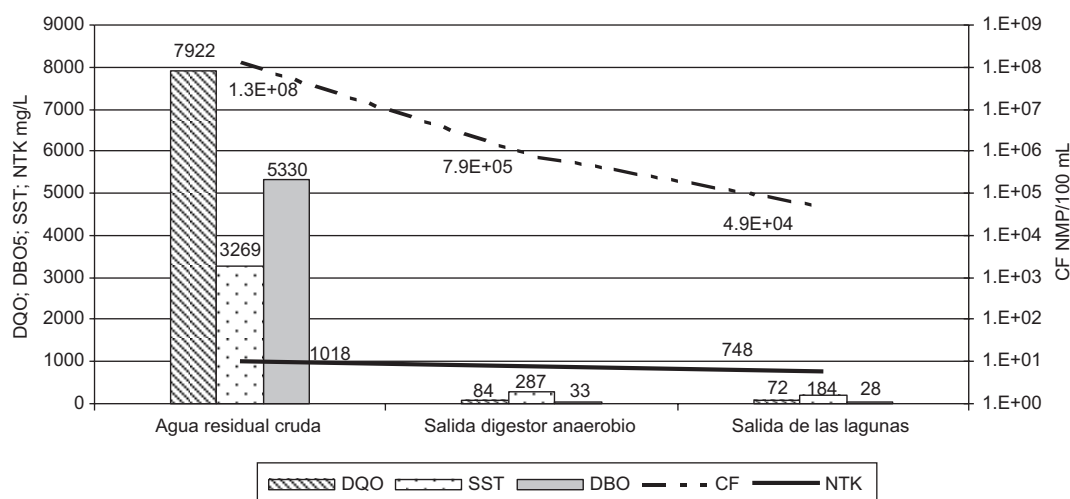
CUADRO VI. DESEMPEÑO DEL TREN DE TRATAMIENTO: FOSA DE HOMOGENEIZACIÓN MÁS DIGESTOR ANAEROBIO DE LÍQUIDOS Y SÓLIDOS (DALYS)

Parámetros	Granja porcina # 4*					
	Agua residual cruda*	Salida fosa	Remoción en fosa (%)	Salida de digestor †	Remoción en digestor (%)	Remoción Total (%)
DQO (mg/L)	25 205	15 445	38.7	2 824	81.7	88.8
DBO ₅ (mg/L)	8 460	6 153	27.3	345	94.4	95.9
SST (mg/L)	15 042	7 917	47.4	1 897	76.0	87.4
SSV (mg/L)	11 792	6 000	49.1	1 334	77.8	88.7
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	4 930	3 640	26.2	8 240	-126	-67.1
N _{Total} (mg/L)	2 034	1 826	10.2	1 826	0.0	10.2
NTK (mg/L)	2 033	1 826	10.1	1 826	0.0	10.1
P _{Total} (mg/L)	180.1	52.4	70.9	17.5	66.6	90.3
pH	6.94	7.58	-9.22	7.77	-2.51	-11.96
Colif.Fecales (NMP/100mL)	9.20E+08	1.40 E+07	98.48	4.90 E+03	99.97	99.99

* Agua residual cruda proveniente de la granja 4 de tipo ciclo completo con 5 500 cerdos, ubicada en clima tropical, con abundante disponibilidad de agua. †El digestor tiene un TRH de aproximadamente 90d. Muestras puntuales

+ 2 lagunas en serie, se realizó un muestreo puntual para estimar sus eficiencias. La primera granja es de tamaño chico y la segunda de tamaño mediano. Los resultados se muestran en las **figuras 3 y 4** respectivamente. En ambas figuras se puede observar que los 2 dalys presentan alta remoción de SST ≥ 84 % y de materia orgánica >90 % tanto para DQO como para DBO₅. Mientras que en los sistemas de lagunas de estabilización se observó lo siguiente: en la Granja 6 hay un pequeño porcentaje de remoción adicional de aproximadamente 35 % de los SST y de entre 13 % y 16 % de materia orgánica (**Fig. 3**). Sin embargo, en la granja 5, en vez de disminuir la concentración de estos contaminantes, aumentan 50 % los SST, 150 % la DQO y 50 % la DBO₅ (**Fig. 4**). Esta reducción en la eficiencia de remoción puede atribuirse a que

del digestor dalys salían lodos (biomasa) de forma intermitente por falta de purga. Cabe mencionar que al momento de tomar la muestra no salían lodos. Sin embargo, antes y después se pudo observar lodo negro anaerobio que salía del dalys. La cantidad era tal que éste se encontraba formando pequeños islotes en las lagunas. Otra causa del aumento de materia orgánica en las lagunas es el crecimiento de algas que se observó en la segunda laguna (color verdoso). Con respecto a los nutrientes, en la granja 6 se presentó una remoción global del 26 % del NTK y 72 % del P-total. Mientras que en la granja 5 la remoción de NTK fue de sólo 4 % y la de P-total de 6 % (**Cuadros VII y VIII**). Estos resultados demuestran que la adición de lagunas no mejoró la remoción de NTK necesaria para cumplir con los límites máximos permisibles que

**Fig. 3.** Remoción de contaminantes en un sistema de digestor anaerobio + 2 lagunas instalado en la granja # 6

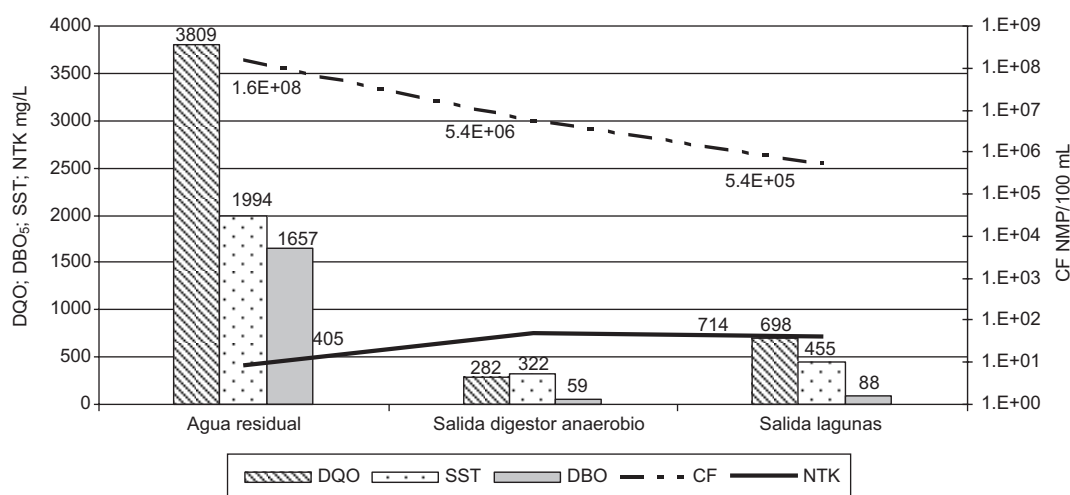


Fig. 4. Remoción de contaminantes en un sistema de digestor anaerobio + 2 lagunas instalado en la granja #5

marca la NOM-001-SEMARNAT-1996. Aunque sí mejoró la remoción de CF en una unidad logarítmica, su concentración sigue siendo una limitante para el reuso del agua en riego agrícola. Finalmente, también quedó evidenciado que cuando el digestor no se purga oportunamente salen sólidos (biomasa) de exceso que se acumulan y descomponen en la laguna deteriorando la calidad del efluente final.

Necesidades adicionales de tratamiento

Después de revisar los resultados de eficiencia que presentan los sistemas que se encuentran actualmente instalados en las granjas porcinas, se puede ver que ha habido un avance con respecto a la situación presentada por Pérez (2001), ya que los sistemas de digestión anaerobia presentan eficiencias de remoción

entre 81.7 y 97.5 % de la DQO; entre 94.4 y 99.3 % de la DBO₅; entre 76.0 y 99.6 % de SST y entre 32.8 y 70.9 % del P-total. Estos valores son mejores que los reportados por Chao *et al.* (2008) quienes encontraron una eficiencia de remoción de 71 % de la DQO y 74 % de los sólidos totales al tratar agua residual porcina en un digestor anaerobio de bajo costo. Pero esta diferencia se debe básicamente a que estos autores utilizan un TRH de 15 d y una concentración de materia orgánica importante (35520 ± 5914 mg/L DQO). Mientras que los digestores dalys del presente documento operan con $\text{TRH} \geq 60$ d. Por otra parte, las eficiencias encontradas en los sistemas que utilizan un dalys son parecidas a las reportadas en reactores experimentales a escala laboratorio y piloto que utilizan aguas residuales porcinas con baja

CUADRO VII. DESEMPEÑO DEL TREN DE TRATAMIENTO COMPUESTO POR UN DIGESTOR ANAEROBIO + 2 LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN SERIE INSTALADO EN LA GRANJA 6

Parámetro	Granja 6*					
	Agua residual cruda	Salida Digestor anaerobio	Remoción digestor (%)	Salida Laguna de estabilización	Remoción en Laguna (%)	Remoción Total (%)
DQO (mg/L)	7922.00	83.00	98.95	72.3	12.89	99.09
DBO ₅ (mg/L)	5330.00	33.33	99.37	28	15.99	99.47
SST (mg/L)	3269.23	287.04	91.22	184.2	35.83	94.37
SSV (mg/L)	2980.77	203.71	93.17	184.2	9.58	93.82
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	2331.00	1218.00	47.75	882	27.59	62.16
NTK (mg/L)	1018.00			748		26.52
N-(NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻) (mg/L)	0.13	0.13	0.00	0.45		
P _{Total} (mg/L)	101.56	36.39	64.17	28.68	21.19	71.76
pH	7.08	7.33		8.29		
Coliformes fecal	1.30E+08	7.90E+05	99.39	4.90E+04	93.80	99.96

* Granja porcina chica ubicada en zona templada

CUADRO VIII. DESEMPEÑO DEL TREN DE TRATAMIENTO COMPUESTO POR UN DIGESTOR ANAEROBIO + 2 LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN SERIE INSTALADO EN LA GRANJA 5

Parámetro	Granja 5*					
	Agua residual cruda	Salida digestor anaerobio	Remoción en digestor (%)	Salida Laguna de estabilización	Remoción en Laguna (%)	Remoción Total (%)
DQO (mg/L)	3 808.60	282.00	92.60	698.4	-147.66	81.66
DBO ₅ (mg/L)	1 656.67	58.50	96.47	87.5	-49.57	94.72
SST (mg/L)	1 994.05	321.65	83.87	455.13	-41.50	77.18
SSV (mg/L)	1 852.38	298.08	83.91	455.13	-52.69	75.43
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	1 155.00	2 919.00	-152.73	2 730	6.47	-136.36
NTK (mg/L)		748.00		714	4.55	
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)		490.00		464	5.31	
N-(NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻) (mg/L)	0.13			0.13	0.0	0.00
P _{Total} (mg/L)	41.4	25.1	39.5	38.8	-55.01	6.16
pH	6.87	8.22		8.22		
Coliformes fecal.	1.60E+08	5.40E+06	96.63	5.40E+05	90.00	99.66

* Granja porcina mediana ubicada en zona templada

carga de contaminantes. Tal es el caso de Chenga *et al.* (2001) quienes al utilizar un reactor secuencial por lotes (SBR) de dos etapas, la primera con biopelícula y la segunda con biomasa suspendida, para efluentes con concentraciones bajas de materia orgánica entre 500 y 4000 mg/L de carbono orgánico total (COT), obtienen una eficiencia de remoción de 97.5 % de la DBO₅ y 97.3 % de los SST. Asimismo, Escalante y Hernández (2002), al tratar agua residual de una pequeña granja porcina (4 m³ de efluente) con una baja concentración de contaminantes (900 mg/L DQO y 590 mg/L DBO₅) en un sistema de tratamiento compuesto por separación sólido/líquido, laguna anaerobia, laguna facultativa y tres lagunas de maduración con un TRH total de 34 d obtuvieron una remoción de 88 % de la DQO, 73 % de los SST y una reducción entre tres a cinco unidades logarítmicas de coliformes fecales. Sin embargo, es importante subrayar que aún cuando las eficiencias en los sistemas con digestor dalys son buenas, incluso al compararlas con sistemas que operan a escalas laboratorio y piloto con más control, el efluente que producen aún tiene una contaminación importante. Por esto, es indispensable adicionar un postratamiento después del tratamiento anaerobio para incrementar la remoción de nitrógeno, SST, materia orgánica y CF y así alcanzar la calidad que se requiere para cumplir con la normatividad mexicana sobre descargas a cuerpos receptores (NOM-001-SEMARNAT-1996) y, si lo que se requiere es cumplir con la normatividad para reuso en riego agrícola (NOM-003-SEMARNAT-1997), también es necesario un postratamiento para abatir la concentración de SST y CF principalmente. Al

respecto, varios autores han presentado sistemas de tratamiento compuestos por al menos dos etapas que incluyen procesos biológicos anaerobios y/o procesos aerobios y/o procesos físico-químicos. Por ejemplo, Liang-Wei *et al.* (2006) presentan dos opciones de tratamiento: la primera consiste en un reactor anaerobio con circulación interna seguido de un sistema SBR. En este caso, el reactor anaerobio presentó una remoción del 80 % de DQO (al aplicar una carga de 6-7 kg DQO/m³/d) y en el SBR de mejora solamente se removió un 7.5 % adicional de la DQO, pero se pudo remover un 81 % del nitrógeno en forma de N-NH₄⁺. La segunda opción consistió en utilizar solamente un SBR con circulación interna con un TRH de 5-6 d. En este caso, las eficiencias fueron superiores: 95.5 % de la DQO y 99.4 % del N-NH₄⁺. Por otra parte, Vanotti *et al.* (2007) utilizaron un sistema de tratamiento que incluye inyección de polímero para separación sólido/líquido, una etapa de desnitrificación biológica y una etapa de precipitación de fósforo y desinfección para tratar las aguas residuales porcinas de una granja de engorda de 4400 cerdos y reportan eficiencias de remoción de 99.7 % de la DBO₅, 97.6 % de los SST, 98.5 del NTK y 98.7 del P-total. Sin embargo, el postratamiento también debe ser apropiado para el contexto socioeconómico y la capacidad de operación y mantenimiento de las granjas por lo que se recomienda que el postratamiento sea un proceso que requiera muy poca operación y mantenimiento y que sea de bajo costo de operación. Al respecto Garzón-Zúñiga *et al.* (2007) reportan que al utilizar un sistema de bajo costo y necesidad de poco tiempo para operarlo y mantenerlo obtienen

una eficiencia de remoción de 99 % de la DBO_5 ; 98 % de los SST y 99.7 % del N-NH_4^+ al tratar agua residual porcina de una granja pequeña de tipo ciclo completo previamente sedimentada, con una concentración media-alta de contaminantes (DQO inicial de 15 000 mg/L). El sistema en cuestión es un filtro rociador aireado en el cual la biopelícula crece sobre un material filtrante orgánico de astillas de coníferas y turba. Por otra parte, Escalante-Estrada y Garzón-Zúñiga (2010) proponen el siguiente sistema de tratamiento para obtener un efluente con una concentración de DBO_5 de 30 mg/L y menos de 1000 CF/100 mL en una granja porcina mediana (5000 cerdos), que presenta una concentración de contaminantes media (DBO_5 inicial de 15061 mg/L y $9.2\text{E}+08$ CF): a) sistema de separación de sólidos suspendidos totales seguido de digestión anaerobia y como postratamiento de mejora, un sistema lagunar (dos facultativas y dos de maduración) con un TRH global de 41 d. Finalmente, Hernández *et al.* (2010) reportan que al tratar el agua residual porcina de una granja de engorda de tamaño medio (5000 cerdos) previamente cribada y sedimentada con concentración media de contaminantes de 13000 ± 3325 mg/L de DQO influente en un sistema compuesto por dos filtros rociadores empacados con material de soporte para la biopelícula orgánico, compuestos por trozos de madera de ficus (*Ficus benjamina*), obtuvieron una eficiencia de remoción de 93 % de la DQO, 92 % de los SST y 97 % del N-NH_4^+ . Como se ha podido ver sí existen sistemas de postratamiento apropiados para poder llevar el tratamiento de las aguas residuales de granjas porcinas a los niveles que se requieren para su adecuada descarga a cuerpos de agua receptores o para su reuso en riego agrícola, por lo que es importante que los productores continúen trabajando para mejorar la calidad de sus efluentes.

CONCLUSIONES

1. En las aguas residuales de granjas porcinas se presenta una alta variación en la concentración de contaminantes dependiendo del proceso productivo (maternidad, destete, engorda, mezcla, ciclo completo), tamaño de la granja y manejo del agua. Existe una correlación entre el tamaño de la granja y el uso eficiente del agua. Generalmente a mayor tamaño de granja, el agua se utiliza de forma más eficiente y la concentración de contaminantes en el efluente es mayor.

2. El tratamiento en una fosa de homogeneización no puede considerarse como completo por presentar bajas eficiencias de remoción de contaminantes (SST

47 %; DBO_5 27 %; N-NH_4^+ 32 % y una unidad logarítmica de CF).

3. Adicionar enzimas a una fosa aumentó las concentraciones de SST, DQO y DBO_5 en 23, 10 y 16 % respectivamente, probablemente debido a la desintegración de las excretas por el ataque enzimático y liberación de compuestos a la fase líquida. Mientras que las concentraciones de NTK y P-total presentaron una ligera disminución de 23 y 6 % respectivamente.

4. La utilización de digestores anaerobios de líquidos y sólidos (dalys) con altos tiempos de retención hidráulico ($\text{TRH} \geq 60$ d), mejoró notablemente el tratamiento de efluentes de granjas porcinas, alcanzando las siguientes eficiencias de remoción: SST ≥ 92.5 %; DQO ≥ 97 %; $\text{DBO}_5 \geq 96$ %; P-T ≥ 66 % y 2 unidades logarítmicas de CF.

5. Se observó que colocar una fosa de homogeneización previa a un dalys no mejoró la eficiencia de tratamiento ya que las funciones principales de la fosa (homogeneización y sedimentación) ocurren también en el dalys.

6.- El sistema de tratamiento constituido por un dalys más dos lagunas en serie presentó muy buenas eficiencias de remoción globales: SST ≥ 94 %; DQO ≥ 99 %; $\text{DBO}_5 \geq 99.5$ %; P-T ≥ 72 %, NTK 26.5 % y cuatro unidades logarítmicas de CF. Sin embargo, el efluente aún no cumple con las regulaciones mexicanas por altas concentraciones de nitrógeno y CF.

7. Para que el efluente de los dalys pueda alcanzar las concentraciones que marca la normatividad mexicana para descarga en cuerpo receptor o para reuso en riego, se requiere un postratamiento aerobio, adecuado para reducir la concentración de nitrógeno, materia orgánica, SST y CF.

8. En relación con lo anterior, la mejor opción es un sistema de tratamiento de bajo costo de operación y mantenimiento que no requiere personal altamente capacitado para ser operado, que presente altas eficiencias de remoción y que genere efluentes tratados que cumplen con la regulación mexicana (Buelna *et al.* 2008 y Hernández *et al.* 2010); el cual consiste en un filtro aireado empacado con materiales orgánicos, p.e. astillas de madera y fibras vegetales, que funcionan como medio de soporte y como un carbón activado simultáneamente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y al Centre de Recherche Industrielle du Québec, Canadá, por el apoyo económico para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- APHA (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. 20a. ed. American Public Health Association. Washington, EUA. 1325 pp.
- Buelna G., Dubé R. y Turgeon N. (2008). Pig manure treatment by organic bed biofiltration. *Desalination* 231, 297-304.
- Cervantes F. J., Saldívar-Cabral J. y Yescas J. F. (2007). Estrategias para el aprovechamiento de desechos porcinos en la agricultura. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 3, 3-12.
- Chao R., Sosa R., Pérez A. y Cruz E. (2008). A study on pig wastewater treatment with low cost biodigesters. *Livestock Research for Rural Development* 20 article 149 (en línea). <http://www.lrrd.org/lrrd20/9/chao20149.htm>, fecha de consulta 20/12/11.
- Chenga N., Lob K.V. y Yipa K.H. (2001). Swine wastewater treatment using attached-growth and suspended-growth two stage sequencing batch reactors with real-time control. *J. Environ. Sci. Heal. B.* 36, 189-207.
- Confederación de porcicultores mexicanos (2010). Principales estados productores de carne de porcino [en línea]. <http://www.cmp.org/estadisticas/produccion.htm>, fecha de consulta 17/11/11.
- de Victorica-Almeida J.L., Galván-García M. y Ayala-Ruiz R. (2008). Sustainable Management of effluents from small piggery farms in Mexico. *American Journal of Environmental Sciences* 4, 185-188.
- Escalante E.E.V. y Hernandez D.E.A. (2002). Treatment of piggery wastes in waste stabilization ponds. *Water Sci. Technol.* 45, 55-60.
- Escalante-Estrada E. V. y Garzón-Zúñiga M.A. (2010). Opciones de tratamiento para aguas residuales de tres granjas porcinas. *Ingen. Agríc. Biosist.* 2, 87-90. doi: 10.5154/r.inagbi.2010.10.015.
- Garzón-Zúñiga M.A., Lessard P., Aubry G., y Buelna G. (2007). Aeration effect on the efficiency of swine manure treatment in a trickling filter packed with organic materials. *Water Sci. Technol.* 55, 135-143.
- Hernández C.A., Ramírez C.E. y Garzón-Zúñiga M.A. (2010). Desempeño de un biofiltro sin aire acoplado con uno aireado para tratar aguas residuales porcícolas. *Ingeniería Sanitaria Ambiental* 112, 43-48.
- Liang-Wei D., Ping Z. y Zi-Ai Ch. (2006). Anaerobic digestion and post-treatment of swine wastewater using IC-SBR process with bypass of raw wastewater. *Process. Biochem.* 41, 965-969.
- Montalvo C., López F., Luna S. y Arellano A. (2004). Caracterización del agua residual de una granja porcícola en el municipio de Palmar de Bravo, Puebla. *Memorias. XIV Congreso Nacional 2004 de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales.* Mazatlán, Sinaloa. 12 al 14 de mayo, 2004. CD-ROM.
- SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 6 de enero de 1997.
- SEMARNAT (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 21 de septiembre de 1998.
- Pérez R. (2001). Porcicultura y contaminación del agua en la Piedad, Michoacán, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 17, 5-13.
- Ramírez C. E., Garzón-Zúñiga M.A. y García S. L. (2010). Técnicas para la separación de sólidos de aguas residuales de granjas porcinas. *Memorias. XXXII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental,* Punta Cana, República Dominicana. 7 al 11 de noviembre, 2010. CD-ROM.
- Vanotti B.M., Szogi A.A., Hunt G.P., Millner D.P. y Humenik J.F. (2007). Development of environmentally superior treatment system to replace anaerobic swine lagoons in the USA. *Bioresource Technol.* 98, 3184-3194.