

OBTENCIÓN DE CRISTALES DE ESTRUVITA COMO FERTILIZANTE A PARTIR DE EXCREMENTO DE CERDOS

Katherine Muñoz

Magíster, Ingeniera Civil Industrial

Silvio Montalvo

Doctor en Ciencias Técnicas

La industria agropecuaria, es una de las mayores productoras de residuos en el planeta (FAO, 2016). Esto ha impactado en el aire, en el agua y en el suelo. El consumo de carne de cerdo y por lo tanto su crianza ha ido en aumento estos últimos años, y son los residuos de este animal, conocidos como purines, los que se consideran como uno de los más contaminantes de tipo industrial (FAO, 2016)

Los purines, tienen una alta concentración de Fósforo y Amonio, nutrientes esenciales para la vida, que las plantas utilizan como fertilizante. La problemática de esto es qué si los residuos son puestos directamente en el suelo sin tener consideración de una dosis apropiada, se vuelve un problema ambiental, debido a un exceso de los nutrientes en el suelo, y por tanto capaz de filtrar hacia capas subterráneas llegando al agua y finalmente a cuerpos de aguas superficiales. Es por este mal uso de los residuos que algunos cuerpos de agua terminan siendo pantanos, producto de una sobre explosión de micro algas, que termina por causar un desequilibrio que termina con la vida en el agua, fenómeno conocido como eutrofización.

Teniendo en consideración estos aspectos ambientales, es que es importante que el efluente del tratamiento anaerobio, tenga una baja concentración de nutrientes (Nitrógeno, Fósforo y Magnesio), puesto que de esta forma no se corren riesgos ambientales. Durante el desarrollo de esta investigación, se analizó un efluente, de ahora en adelante digestato, que viene de la empresa AASA.

El propósito de este trabajo fue producir estruvita como fertilizante, la cual es una sal formada por Fosfato (P), Magnesio (Mg) y Nitrógeno (N), que produce una liberación lenta de estos nutrientes al suelo.

La formación de cristales de estruvita (figura 1) es catalizada por la presencia de magnesio, sin embargo, el digestato (que es rico en Fosfato y Amonio) no posee concentraciones necesarias para la reacción (Huang, Y. et al., 2014), por tanto debe ser añadido. Esto aumenta la concentración de Mg^{2+} y la actividad iónica, lo que provoca un aumento en la precipitación. Una alternativa económicamente atractiva es la utilización de la bischofita, que es una sal de cloruro de magnesio utilizada en el mercado como estabilizador de caminos. La formación de estruvita, tiene como reacción la siguiente:



La formación de los cristales de estruvita está dividida en 3 etapas (Koutsdoukos et al., 2004): i) Sobresaturación, ii) Nucleación y iii) Crecimiento.

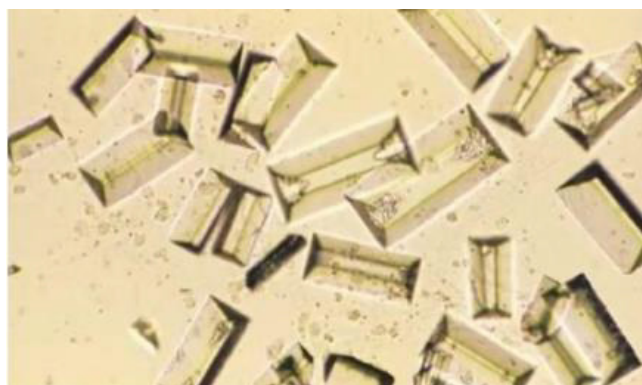


Figura 1

"Cristales de estruvita" / Fuente: Medical Labs 2016

Que exista sobresaturación no es suficiente para que el sistema empiece a cristalizar. Antes de que los cristales se desarrollen debe haber en la solución un número diminuto de cuerpos sólidos o núcleos que actúen como centros de cristalización, este fenómeno se denomina nucleación. Posterior a la nucleación, tan pronto como se formen los primeros núcleos estables, estos empiezan a crecer y a convertirse en cristales de tamaño visible.

De acuerdo a esto, la sobresaturación está dada por la relación molar de los compuestos que forman la estruvita, en este caso el digestato contiene Fosfato y Amonio y debe adicionarse bischofita como precursor de la precipitación.

En la teoría, la relación molar del Magnesio y Fosfato es 1:1, sin embargo, varios autores coinciden que entre mayor sea esta relación mayor será la eliminación del Fósforo. (Rahaman et al., 2008; Adrian et al., 2004).

Los cristales de estruvita pueden adquirir diversas estructuras dependiendo de las condiciones de cristalización (figura 2). Se han identificado cristales como agregados delgados de cristales finos (Adnan et al., 2003), partículas en forma de estrella (Regy et al., 2002), irregulares, sin forma, cristales gruesos (Rahman et al., 2011; Huang, Z. et al., 2009; Westerman et al., 2009), estructuras alargadas (Hutnik et al., 2013; Matynia et al., 2013; Kozik et al., 2011; Le Corre et al., 2007). El tamaño puede variar dependiendo de las condiciones de producción y varía desde los 15 [μm] (Huang, Z. et al., 2009) hasta 3,5 [mm] (Adnan et al., 2003) de largo.

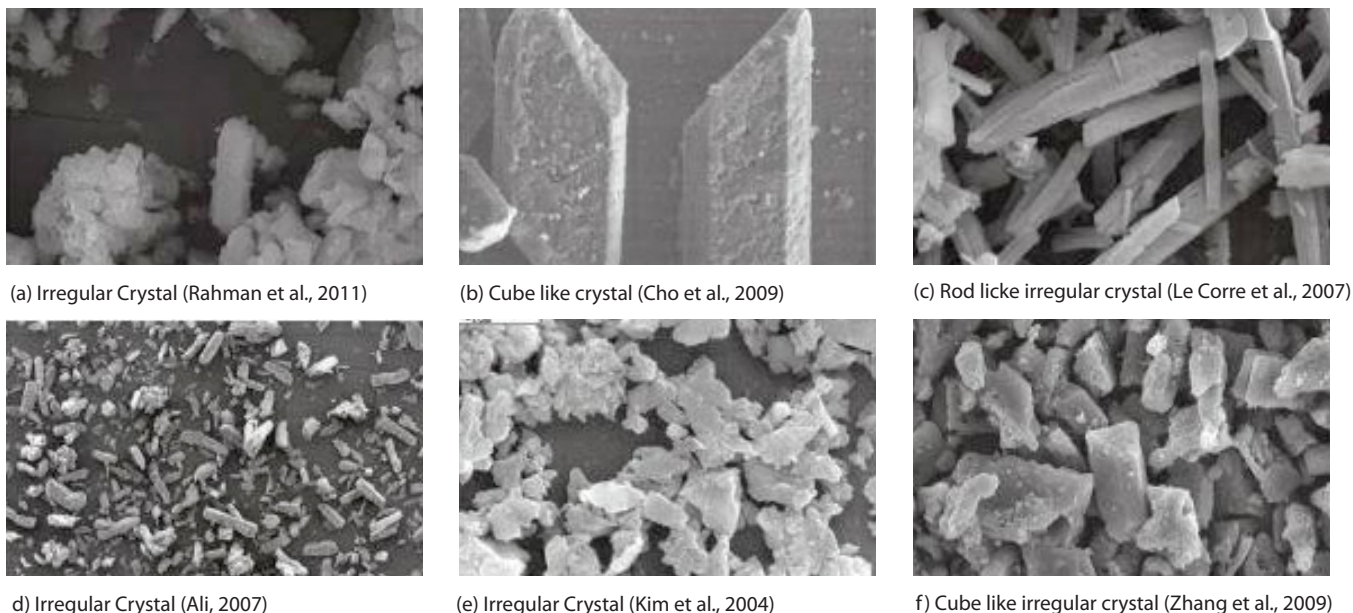


Figura 2

Diferentes formas en que se puede encontrar la estruvita / Fuente: MM Rahman et al., 2013.

Según Le Corre (2009) un aumento en el pH causa un aumento de la sobresaturación y como resultado un aumento en el tamaño del cristal. La bischofita es un producto resultante de la producción de litio y su composición está dada principalmente como $MgCl_2$ (Cloruro de Magnesio) que actúa como precipitante creando estructuras similares a ataúdes (Stolzenburg et al., 2015). (Ver figura 3).

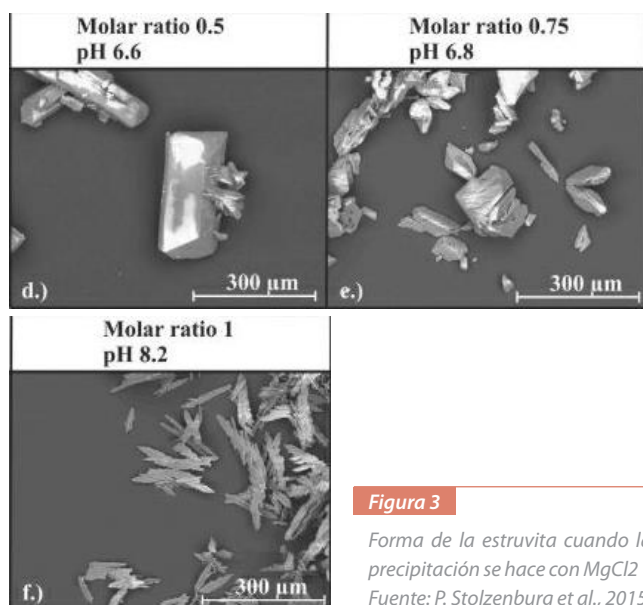


Figura 3

Forma de la estruvita cuando la precipitación se hace con $MgCl_2$ / Fuente: P. Stolzenburg et al., 2015.

En un estudio realizado por Korchef (2011) se realizó una reacción sintética de Mg/P en proporciones de 1:1 hasta 5:1, dando como resultado que un aumento en la relación molar, disminuye el pH de precipitación. La sobresaturación acelera la precipitación, y optimiza la remoción de fósforo (figura 4).

Dado este contexto, para esta investigación se utilizó una relación de 6:1. Cada experimento tuvo 4 ensayos realizados en paralelo utilizando un Test de Jarra (figura 5), para mantener la temperatura entre 28-35°C y en condiciones anaeróbicas.

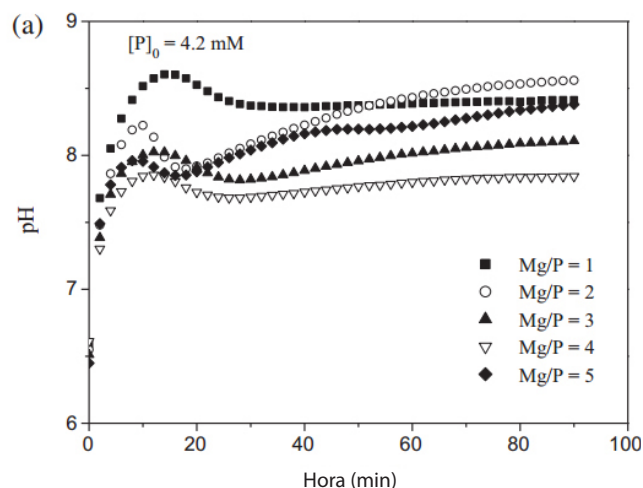


Figura 4

Variación de pH y concentración de fósforo en el tiempo con diferentes Mg:P / Fuente: Korchef, 2011.



Figura 5

Test de Jarra

RESULTADOS

Caracterización Digestato

En la tabla 1 se muestra la composición del digestato.

Tabla 1. “Caracterización del digestato”

Variable	Valor
Fosfato inicial	116 [mg/L]
Nitrógeno Amoniacal	1412 [mg/L]
pH	7,1
Sulfuros	20,59 [mg/L]
Sólidos Totales	342 [mg/L]
Sólidos Suspendidos	256 [mg/L]
Sólidos Volátiles Totales	118 [mg/L]

Fuente

Elaboración propia

Estos valores corresponden al inicio de la reacción, sin embargo, en cada experimento se controla el Fosfato disuelto y el pH.

Como se mencionó con anterioridad para que se produzca estruvita deber haber una relación molar de Magnesio, Fosfato y Amonio de 1:1:1, en este caso se tiene que la concentración de Fosfato es menor a la de Amonio, por lo que el reactivo limitante será el Fosfato y el Magnesio se agregará en la relación antes mencionada.

ENSAYOS CON ZEOLITA

Para conocer el impacto de la adición de Zeolita a la reacción, se aplicaron diferentes cantidades de Zeolitas y se verificó el impacto que cada una de éstas tuvo sobre el proceso. En la Tabla 2 se muestran los resultados:

Tabla 2. “Resultado del testeo de diferentes cantidades de Zeolita”

Experimento	Vaso	pH	Fosfato inicial [mg/L]	Fosfato inicial [mg/L]
1	1	7,1	116	17
	2			15
	3			15
	4			21
2	1	7,1	116	23
	2			23
	3			36
% de Disminución		Tiempo [h]		Zeolita respecto Bischofita (%)
85,3%		0,5(*)		1%
87,1%				5%
87,1%				10%
81,9%				20%
80,2%		0,5(*)		5%
80,2%				20%
69,0%				-

Fuente

Elaboración propia

Estos valores, muestran el porcentaje de disminución del Fosfato disuelto, luego de tener media hora de reacción más un día de estabilización. Ahora bien, estos valores se pueden apreciar mejor en forma gráfica por medio de la figura 2.

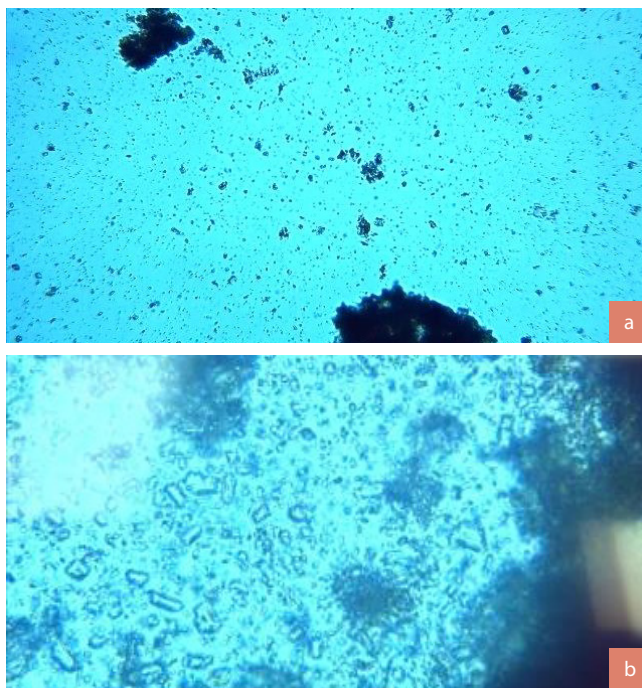


Figura 6

Vista bajo microscopia óptica

En relación a los resultados obtenidos, se valida que la cantidad de Zeolita a utilizar para los siguientes experimentos es de 5% respecto a la bischofita, ya que se obtienen resultados de disminución de más de un 80% luego de un día. De acuerdo a la disminución del Fosfato se puede estimar la formación de estruvita, esto se observa en la figura 6:

En la figura 6 (a) se observa la formación de estruvita con bischofita, mientras que en la figura 6 (b) no se adiciona bischofita. En ambos casos las concentraciones de Fosfato disminuyeron, sin embargo, sólo con la bischofita se observan cristales.

EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE REACCIÓN

Se realizaron varios experimentos donde se varió el tiempo de residencia y pH a 8 muestras. Los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla 3.

Sin embargo, para poder analizar estos datos, fue necesario agruparlos de acuerdo a los tiempos utilizados, a continuación en la figura 7 se tienen los resultados de todas las corridas en 2 horas.

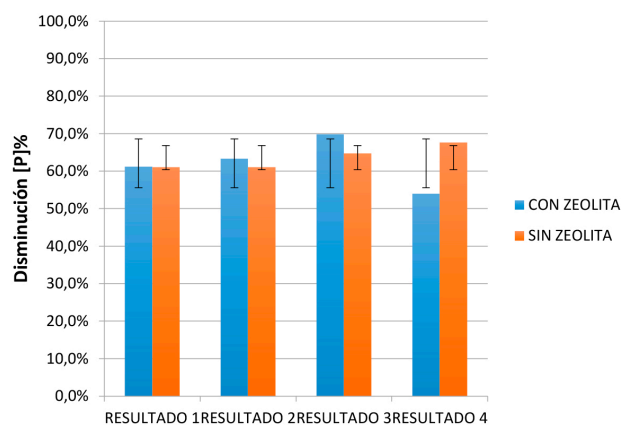


Figura 7

Disminución de fosfato en 2 horas

Tabla 3: "Evaluación del tiempo y pH de reacción"

Corrida	Vaso	pH	Fosfato inicial [mg/L]	Fosfato Final [mg/L]	% de Disminución	Tiempo [h]	Zeolita respecto Bischofita (%)
3	1	8,25	139	38	72,7%	2	5%
	2			54	61,2%		5%
	3			51	63,3%		-
	4			42	69,8%		-
4	3	8,09	118	46	61,0%	2	-
	4			46	61,0%		-
5	1	8,02	139	64	54,0%	2	5%
	2			80	42,4%		5%
	3			49	64,7%		-
	4			45	67,6%		-
6	1	7,89	193	88	54,4%	0,5	5%
	2			121	37,3%		5%
	3			69	64,2%		-
	4			82	57,5%		-
7	1	7,95	119	68	42,9%	0,5	5%
	2			74	37,8%		5%
	3			59	50,4%		-
	4			62	47,9%		-
	1	7,95	119	43	63,9%	2	5%
	2			49	58,8%		5%
	3			54	54,6%		-
	4			50	58,0%		-
	1	7,95	119	38	68,1%	3	5%
	2			37	68,9%		5%
	3			46	61,3%		-
	4			34	71,4%		-

Fuente

Elaboración Propia

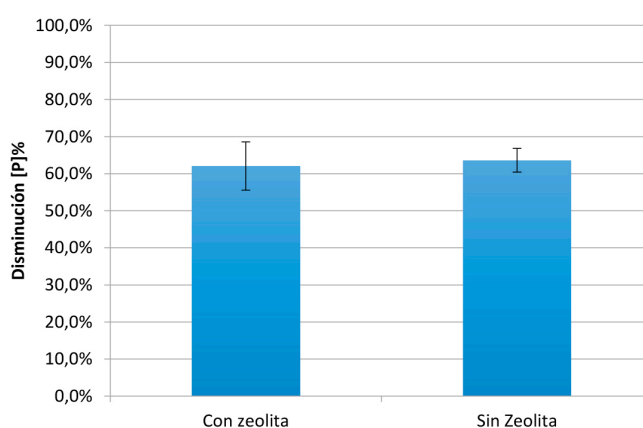


Figura 8

Promedio y desviación estándar, 2 horas

Luego de recoger todos los resultados obtenidos en condiciones iguales de varias corridas, se logra obtener una disminución en promedio de un 63,6% cuando no existe Zeolita adicionada. Por otro lado, se tienen resultados de un 60,55% en promedio cuando sí se cuenta con la presencia de esta sal. La desviación estándar de estos ensayos es de un 0,027 y 0,100 respectivamente de la figura 8.

Para validar el tiempo se vuelve a repetir el ensayo de media hora en condiciones de pH iguales a las anteriores, de forma de comparar el comportamiento del fosfato. Se obtiene lo que se aprecia en la figura 9.

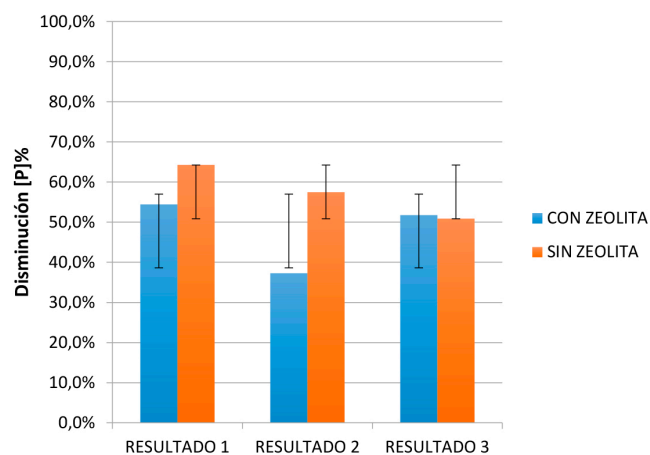


Figura 9

Resultados de disminución de fosfato con media hora

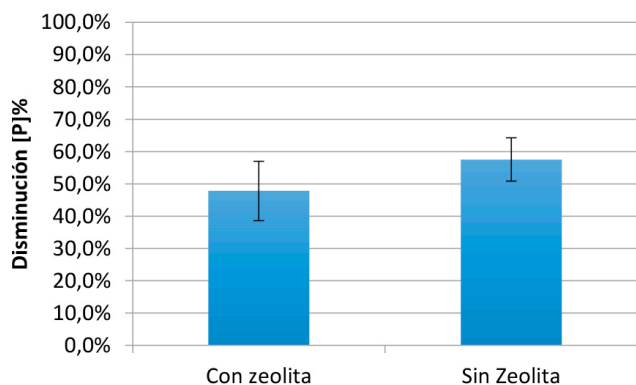


Figura 10

Promedio y desviación standard, media hora

Estos resultados arrojan que cuando no se adiciona Zeolita se tiene una disminución en promedio de un 57,5% y en presencia de la Zeolita la disminución de fosfato llega a valores de sólo 47,8% en promedio, con una desviación estándar de 0,054 y 0,075 respectivamente. La desviación es mayor cuando la Zeolita participa de la reacción, esto puede deberse a que la sal al tener un interior negativo, el catión de Magnesio es atraído por esta, y por lo tanto no hay tanto precursor de la precipitación disuelto y atrasa la cristalización.

Se puede decir que a mayor tiempo mejores resultados, por lo mismo se realiza una siguiente corrida, en donde se siguen todas las condiciones antes mencionadas, sólo que con un tiempo de 3 [h] y se toman datos en los tiempos antes mencionados. La figura 11 refleja los resultados obtenidos.

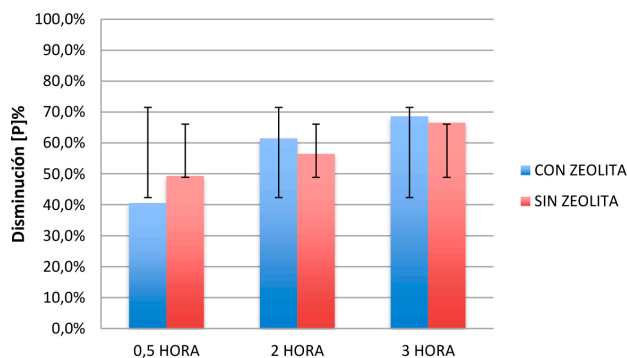


Figura 11

Disminución de fosfato hasta 3 horas

En esta ocasión los porcentajes de disminución son del orden de 49,4%; 56,5% y 66,5% en media, dos y tres horas respectivamente cuando la Zeolita no se encuentra presente. En el caso en que sí se le adicione se tiene 40,6%, 61,5%, 68,6% en los mismos tiempos antes mencionados.

Luego de analizar todas figuras, se puede decir que con un tiempo de tres horas, se logran obtener mejores resultados con Zeolita se tiene un porcentaje de remoción del 68,6% y sin Zeolita de un 66,5%, sin embargo según Stratful et al. (2001), menciona que la diferencia en porcentaje de recuperación de Fósforo de 1 a 7 horas es de un 3%, por lo tanto con las 2 horas encontradas se tiene suficiente.

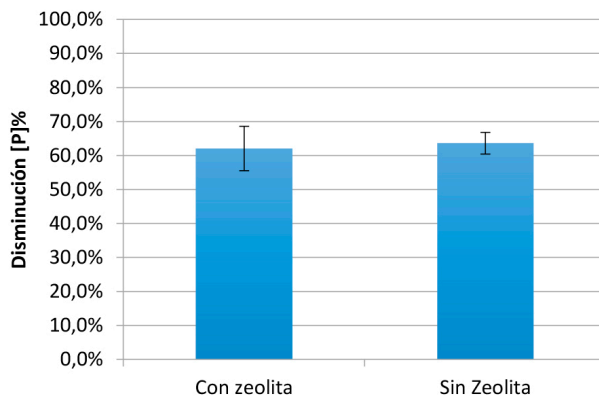


Figura 12

Promedio y desviación estándar, 2 horas

Como en la figura 10 se vio la desviación estándar de las corridas de media hora, se realiza el mismo análisis respecto de las corridas de dos horas. De forma de tener una idea de cómo se distribuyen los resultados. En esta ocasión en la figura 12 la desviación es 0,065 y de 0,032 cuando hay y no hay Zeolita en la reacción. Nuevamente la desviación cuando la Zeolita está presente es mayor, sin embargo, sigue siendo menor que 1, por tanto, se tienen porcentajes de remociones de Fosfato estables, dentro de los parámetros investigados.

Finalmente se tiene que la adición de Zeolita producía eficiencia de eliminación de Fosfato del 50% cuando se tenía concentraciones iniciales superiores a los 100 [mg/L], bajo este contexto los resultados en general nos indican que la Zeolita sí actúa en el digestato haciendo la remoción de fosfato.

Cuando el tiempo aumenta, los resultados son más contundentes en la disminución del fosfato por tanto, también se puede decir que el tiempo es un factor importante en la formación y disminución del fósforo.

VERIFICACIÓN DE FORMACIÓN DE CRISTALES

Para verificar la formación de cristales de estruvita los cristales generados fueron comparados con obtenidos en diferentes investigaciones. En la revisión del Estado del Arte se pudo recopilar varias imágenes de cómo se verían los cristales de estruvita bajo un microscopio; ahora, luego de cada experimento, se utilizó un microscopio para obtener imágenes como las que se muestran en la figura 13.

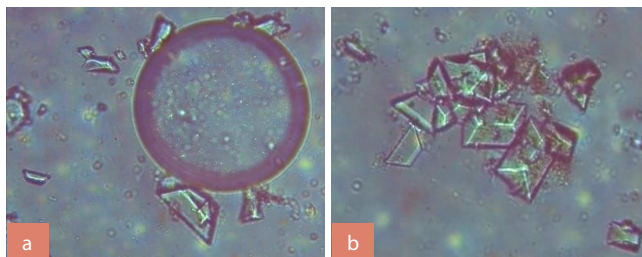


Figura 13

Cristales en el laboratorio

Al comparar los cristales de la figura 13 (a) y 13 (b), se puede observar la misma estructura de "ataúdes", por tanto, se utiliza como validación de la formación de cristales de estruvita en este estudio. Cabe señalar que la imagen de la figura 13 (a) corresponde al resultado obtenido con la Zeolita agregada a la reacción, donde se produce la aglomeración de cristales, efecto que se repitió en todos los experimentos. La figura 13 (b) corresponde a una corrida donde no se adiciona Zeolita.

Para corroborar de forma definitiva, el fenómeno de aglomeración de cristales se desarrolló un experimento con una solución sintética, obteniéndose los siguientes resultados respecto a la disminución de Fósforo:

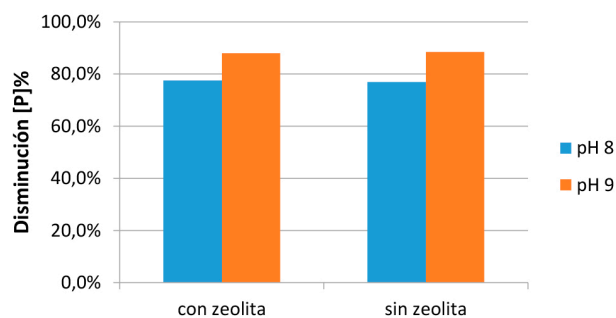


Figura 14

Disminución fósforo en reacción sintética / Fuente: Elaboración propia

Las mayores disminuciones de fósforo son a pH 9, alcanzando valores de 88% y un 88,5% cuando se tiene Zeolita y cuando no, respectivamente. Es importante mencionar, que se debe controlar paulatinamente el pH con NaOH, puesto que a medida que ocurre la formación de estruvita, los iones H^+ se liberan al medio, lo que resulta en la disminución del pH (Stratful et al., 2001).

Las imágenes de los cristales se muestran en la figura 15 (a) y 15 (b), observándose una vez más la aglomeración de cristales cuando se adiciona Zeolita (a) y la dispersión de éstos (b) en ausencia de ésta.

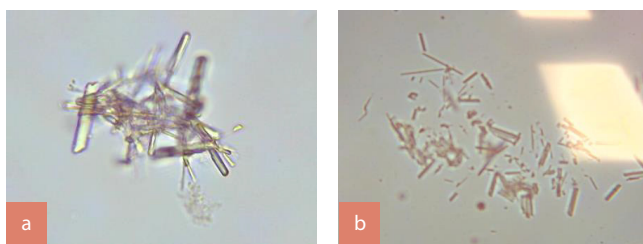


Figura 15

Cristales en reacción con solución sintética

En el trabajo realizado por Le Corre (2007) se menciona cristales irregulares, también considerados como estruvita. En esta ocasión y como se mencionó anteriormente la forma pudo haber estado afectada por las variaciones de pH.

TAMAÑO DE LOS CRISTALES DE ESTRUVITA

Una vez que se verificó la formación de cristales, estos fueron dimensionados con la ayuda del software de análisis de imágenes y se tomaron medidas a continuación, en la figura 16 se muestra el resultado.

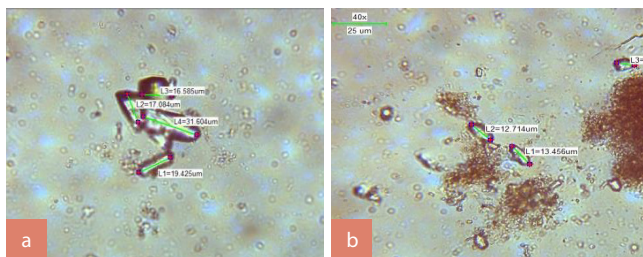


Figura 16

Tamaño de los cristales con zeolita

En la imagen, los tamaños encontrados van desde 16,6 μm hasta 31,6 μm . Según Zhang (2009) los cristales varían entre 15 μm a 3,5 mm, lo cual está dentro del rango. Abe (1995) planteó que el tamaño del cristal está influenciado por la concentración de fósforo y por el tiempo de reacción. En este caso como se señaló anteriormente, la concentración de Fósforo fue bastante menor por tanto se explica el resultado.

Utilizando el mismo zoom anterior, se evalúan los cristales cuando la Zeolita no está presente, en este caso los tamaños encontrados van desde 8,6 μm hasta 13,4 μm . En esta ocasión los tamaños son más pequeños que los anteriores. Cabe destacar que la única diferencia entre ambas imágenes es la Zeolita, el pH, la concentración de Fósforo y el tiempo de reacción es el mismo.

Este resultado es importante, ya que si bien se ratifica que la eficiencia en cuanto al porcentaje de disminución del Fósforo es un poco menor con el uso de Zeolitas se tienen tamaños mayores de cristales los que es decisivo a la hora de la recuperación de estruvita formada en el reactor.

CONCLUSIONES

La formación de estruvita es una manera efectiva de recuperar los nutrientes que están presentes en el digestato de purines de cerdos a partir de la adición de Bischofita y Zeolitas naturales. El contenido de Fósforo en el digestato es relativamente bajo mientras que amonio está en cantidades mucho más elevada, por lo que para la reacción de obtención de estruvita, el Fósforo será el reactante limitante. El pH del digestato, sin ser el óptimo (8,7) es adecuado para la formación de la estruvita (>8). El cual se mantiene básico a medida que transcurre la precipitación, por medio de la hidrólisis, lo que genera un ahorro en el proceso de ajuste de pH, siendo innecesario en esta investigación. Se verifica que con un 5% de Zeolita respecto del Magnesio se obtienen óptimos resultados de remoción y adicionalmente al ser una cantidad tan baja tampoco tiene un impacto económico en su utilización. El tiempo de reacción más adecuado para la formación de estruvita es de dos horas, ya que se alcanzan valores del orden de 63% con Zeolita y de 62% sin ésta, mientras que para media hora sólo se alcanzan un 57% y un 48% respectivamente.

Los cristales de estruvita obtenidos cuando la concentración inicial de fósforo es de 119 [mg/L] está entre 16,6 μm hasta 31,6 μm cuando hay Zeolita y entre 8,6 μm hasta 13,4 μm , cuando no hay Zeolitas. Se demostró de forma fehaciente la influencia positiva de la Zeolita e la formación o agregación de cristales de estruvita, lo cual favorece la extracción de estos cristales.

BIBLIOGRAFÍA

- AASA S.A: <http://www.agrificiente.cl/buenas-practicas/agricola-aasa/>
 Abbona F, Boistelle, R., 1979. Growth morphology and cristal habit of struvite cristal ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$). *Journal of Crystal Growth*, 46, 339-354
 Agrawal, S., Guest, J.S., Cusick, R.D., 2018. Elucidating the impact of initial supersaturation and seed crystal loading on struvite precipitation kinetics, fines production, and crystal growth. *Water Research*, 132, 252-259.
 Ali, Md. Imtiaj, 2005. Struvite Crystalization from Nutrient Rich Wastewater. Tesis doctoral, James Cook University, Australia.
 Ariyanto, E., Sen, T.K., Ang, H.M., 2014. The influence of various physicochemical process parameters on kinetics and growth mechanism of struvite crystallization. *Advances Powder Technology*, 25, 682-694.
 Asociación gremial de productores de cerdos de Chile. <http://www.asprocer.cl/>
 Booker, N.A, Prestley, A.J., Fraser, I.H., 1999. Struvite formation in wastewaters treatment plants: opportunities for nutrient recovery. *Enviroment Technology*, 20, 777-782.
 Buchanan, J.R., Mote, C.R., Robinson, R.B., 1994. Thermodynamics of struvite formation. *Trans. ASAE* 37, 617-621.
 Çelen, I., Buchanan, JR., Burns, R.T., Robinson, R.B., Raj Raman, D., 2007. Using

- a chemical equilibrium model to predict amendments requires to precipitate phosphorus as struvite liquid swine manure. *Water Research*, 42, 2689-2696.
- Cordell, D., Drangert, J.-O. & White, S., 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), pp.292-305.
- Cordell, D. & White, S., 2014. Life's Bottleneck: Sustaining the World's Phosphorus for a Food Secure Future. *Annual Review of Environment and Resources*, 39(1), pp.161-188.
- Crutchik, D., Garrido, J.M., 2016. Kinetics of the reversible reaction of struvite crystallisation. *Chemosphere*, 154, 567-572.
- De-Bashan, L.E., Bashan, Y., 2004. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003). *Water research*, 38, 4222-4246.
- Doyle, J., Parson, S., 2002. Struvite formation, control and recovery. *Water Research*, 36, 3925-3940.
- Doyle, J., Oldring, K., Churchley, J., Parson, S.A., 2002. Struvite formation and propensity of different materials. *Water Research*, 36, 3971-3978.
- FAO, 2016. The State of food and agriculture. Kiroka, United Republic of Tanzania.
- Frazier, A. W., & WAERSTAD, K. (1992). The phase system $MgO-(NH_4)_2O-P_2O_5-H_2O$ at 25°C. *Industrial & engineering chemistry research*, 31(8), 2065-2068.
- Huang, H., Xiao, D., et al., 2014. Removal of ammonia from landfill leachate by struvite precipitation with the use of low-cost phosphate and magnesium sources. *Journal of Environmental Management*, 145, pp.191-198.
- Huang, H., Zhang, P., et al., 2016. Simultaneous removal of ammonia nitrogen and recovery of phosphate from swine wastewater by struvite electrochemical precipitation and recycling technology. *Journal of Cleaner Production*, 127, pp.302-310.
- Huang, H., Yang, J. & Li, D., 2014. Recovery and removal of ammonia-nitrogen and phosphate from swine wastewater by internal recycling of struvite chlorination product. *Bioresource Technology*, 172, pp.253-259.
- Kemacheevakul, P., Chuangchote, S., Otani, S., Matsuda, T., Shimizu, Y., 2015. Effect of magnesium dose on amount of pharmaceuticals in struvite recovery from urine. *Water Science & Technology* 72.7, 1102-1110.
- Korchef, A., Saidou, H., Amor, M.B., 2011. Phosphate recovery through struvite precipitation by CO_2 removal: Effect of magnesium, phosphate and ammonium concentrations. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 602-613.
- Lapeña Muñoz, Abel. Recuperación de fósforo en forma de estruvita a partir de la orina y el agua de mar. Memoria de Máster. Valencia, 2014.
- Le Corre, K.S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., Jefferson, B., Parson, S.A., 2007. Struvite crystallisation and recovery using a stainless Steel structure as a seed material. *Water Research*, 41 (11), 2449-2456.
- M.L Nguyen NN Taner "ammonium removal from wastewater using natural New Zealand zeolite". *New Zealand Journal of agricultural Research* [N.Z. J. Agric. Res] Vol 41m nº3, Sep 1998.
- Makara, A. & Kowalski, Z., 2013. Pig manure treatment and purification by filtration. *Journal of environmental management*, 60(4), pp.839-844.
- Md Mukhlesur Rahman. Mohamad Amran Mohd. Salleh. Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization - A review. *Arabian Journal of Chemistry*, Vol 7, pp 139-155, 2014.
- Mersmann, A., 2001. Crystallization technology handbook. Second Edition, Marcell Dekker, New York.
- Mehta, G.N., Batstone, D.J., 2013. Nucleation and growth kinetics of struvite crystallization. *Water Research*, 47, 2890-2900.
- Misaelides, P., 2011. Application of natural zeolites in environmental remediation: A short review. *Microporous and Mesoporous Materials*, 144(1), pp.15-18.
- Muñoz Lázaro, Laura. Separación y recuperación de fosfato y amonio de purines mediante sorción con zeolita sintética. Memoria de Máster. Barcelona, 2016.
- Mulling, J.W., 2001. Crystallization. 4ta edición. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Nelson, O. N, Mikkelsen, R. L y Hesterberg, D. L. Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: effect of pH and MG:P ratio and determination of rate constant. *Bioresource Technology*, pag 229-236, 2003.
- Ohlinger, K. N, Young, T. M y Schroeder, E.D. Predicting Struvite Formation in Digestion. *Wat. Res.* Vol 32, No 12, pp. 3607-3614, 1998.
- Paixao, J.L., Tonetti, A.L., Tavanielli, M., Silva, D., 2017. Nitrient recovery from airplane wastewater: composition, treatment and ecotoxicological assay. *Water Science & Technology*, 75.8, 1952-1960.
- Pastor, Laura. Estudio de la precipitación y recuperación del fósforo presente en las aguas residuales en forma de estruvita. Memoria doctoral. Valencia, 2008.
- Phillips, T. & Price, S., 2013. Rocks in your Gas Tank. *Science @ Nasa*. Disponible en: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/17apr_zeolite/ [Accedido en agosto, 2016].
- Silva, J., Volschan, I. Jr., Yokoyama, L., 2017. precipitação de estruvita em sobrenadante do digestor anaeróbico de lodo visando a recuperação de fósforo. *Congresso ABES, Fenasan, Brasil*.
- Stratful, I., Scrimshaw, M.D., Lester, L.N., 2001. Condition influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate. *Water Research*, 35 (17), 4191-4199.
- Stolzenberg, P., Capdevielle, A., Teychené, S., Biscans, B., 2015. Struvite precipitation with MgO as a precursor: Application to wastewater treatment. *Chemical Engineering Science*, 133, 9-15.
- Tansel, B., Lunn, G., Monje, O., 2018. Struvite formation and decomposition characteristics for ammonia and phosphorus recovery: A review of magnesium-ammonia. *Phosphate interactions*. *Chemosphere*, 194, 504-514.
- Triger, A., Pic, J.C., Cabassud, C., 2012. Determination of struvite crystallization mechanisms in urine using turbidity measurement. *Water Research* 46, 6084-6094.
- Villablanca, Camila. Modelación de la recuperación de fósforo y pureza de la estruvita mediante la superficie de respuesta considerando el efecto del pH y la razón $Mg+2/PO_4-3$. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Chile 2016.
- VVAA, 2015. Evaluación de técnicas de gestión de deyecciones en ganadería, Madrid. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/ganaderia/temas/ganaderia-y-medioambiente/evaluaciondetecnicasdegestiondedeyeccionesganaderas_tcm7-414251.pdf
- Wang, J., Burker, J.G., ASCE, M., Zhang, X., Surampalli, R., 2005. Engineered Struvite Precipitation: Impacts of Component-Ion molar ratio and pH. *J. Environ. Eng.* 131, 1433-1440.
- Wang, S. & Peng, Y., 2010. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), pp.11-24.
- Wang, Y., Lin, F. and Pang, W., 2008. Ion exchange of ammonium in natural and synthesized zeolites. *Journal of Hazardous Materials*, 160(2), pp.371-375.
- Yuan, T., Huang, W., Lei, Z., Zhao, Z and Zhang, Z., 2018. Effects of different alkalis on hydrolysis of swine manure during dry anaerobic digestion and resultant nutrients availability. *International Biodeterioration & Biodegradation* 123, 138-145.