



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



Evaluación de cenizas de cáscara de arroz como adsorbente y su desempeño en reactores de adsorción

Jonathan Jesus Lacuesta Cabral

Programa de Posgrado en Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Enero de 2022



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



Evaluación de cenizas de cáscara de arroz como adsorbente y su desempeño en reactores de adsorción

Jonathan Jesus Lacuesta Cabral

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado en Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en Ingeniería Química.

Director:

D.Sc. Prof. Soledad Gutiérrez

Codirector:

D.Sc. Prof. Néstor Tancredi

Director académico:

D.Sc. Prof. Soledad Gutiérrez

Montevideo – Uruguay

Enero de 2022

Lacuesta Cabral, Jonathan Jesus

Evaluación de cenizas de cáscara de arroz como adsorbente y su desempeño en reactores de adsorción / Jonathan Jesus Lacuesta Cabral. - Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 2022.

XVII, 85 p.: il.; 29, 7cm.

Director:

Soledad Gutiérrez

Codirector:

Néstor Tancredi

Director académico:

Soledad Gutiérrez

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa en Ingeniería Química, 2022.

Referencias bibliográficas: p. 68 – 74.

1. Adsorción en fase líquida, 2. Ceniza de cáscara de arroz, 3. Reactores de adsorción, 4. Caracterización, 5. Modelado. I. Gutiérrez, Soledad, *et al.* II. Universidad de la República, Programa de Posgrado en Ingeniería Química. III. Título.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

D.Sc. Prof. Gustavo Sánchez

D.Sc. Prof. Alejandro Amaya

D.Sc. Prof. Claudia Santiviago

Montevideo – Uruguay
Enero de 2022

Agradecimientos

A mis tutores Soledad Gutiérrez y Néstor Tancredi, por su supervisión, apoyo y paciencia durante la realización de esta tesis de maestría. En particular quiero agradecer a Néstor por aceptar codirigir esta tesis, la cual se vio nutrida gracias a su presencia y participación.

A GALOFER S.A. que amablemente brindó las muestras de ceniza de cáscara de arroz con las cuales fueron realizados los ensayos.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por su apoyo financiero durante el programa de maestría.

Al Departamento de Ingeniería de Materiales y Minas, al Departamento de Bioingeniería y al grupo de Biotecnología de procesos para el ambiente por la amabilidad recibida al utilizar sus instalaciones y equipos en varios ensayos y análisis. En particular agradecerle a María Eugenia, Florencia y demás integrantes de Bioingeniería por las horas (a veces compartidas) en los agitadores, y a Carolina por los análisis de fenol.

Al Area de Fisicoquímica, al Area de Física y al Area de Química Inorgánica de la Facultad de Química, y al Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la Facultad de Ciencias por la realización de los ensayos para caracterizar las cenizas.

A todos los integrantes del Instituto de Ingeniería Química, en particular a mis compañeros del grupo de Ingeniería de Sistemas Químicos y de Procesos, con quienes se ha generado un excelente relacionamiento que hace agradable compartir ese espacio de trabajo.

A Santiago, Jimena y Viviana, por su amistad, sus consejos y sus palabras de aliento en esos momentos que uno las necesitaba. A Andrés, Antonella, Fabián, Federico, Fernanda, Florencia, Hernán, María, Mariana y Nicolás por lograr hacer social el distanciamiento.

Finalmente, a mi familia por su amor incondicional, por apoyarme en mis decisiones, y por brindarme todas las oportunidades que estuvieran a su alcance.

RESUMEN

En los últimos años se ha incrementado el interés en el uso de residuos provenientes de los procesos agroindustriales como estrategia alineada con la economía circular. Entre estos residuos está presente la cáscara de arroz, la cual es generada durante la elaboración del arroz al separar la cáscara del grano. Esta cáscara puede tener diversos usos, aunque en el país es mayormente quemada para la generación de energía eléctrica y vapor de agua. Esta quema produce un nuevo residuo, la ceniza de cáscara de arroz. Con el objetivo de valorizar la ceniza de cáscara de arroz, se han propuesto distintas alternativas como la extracción de la sílice presente en la ceniza, la utilización de la ceniza en la producción de cementos, y el uso como adsorbente. En este trabajo se analizó el potencial de la ceniza de cáscara de arroz como adsorbente de compuestos en fase líquida.

En primer lugar, se obtuvieron cenizas de cáscara de arroz de distintos equipos o puntos de la planta de quema de cáscara de arroz, a las cuales se les denomina fracciones. Se recogieron las siguientes fracciones: *Fin de grilla*, *Economizador*, *Multiciclón*, *Filtro de mangas* y *Mezcla final*. Se caracterizaron las diferentes fracciones mediante los siguientes ensayos y técnicas: determinación de la densidad *bulk* y *tapped*, distribución de tamaño de partícula, análisis termogravimétrico, análisis elemental, microscopía electrónica de barrido y espectroscopía por energía dispersiva, difracción de rayos X, espectroscopía Raman, e isotermas de adsorción-desorción de N₂. Se observó que las fracciones presentaron diferencias importantes, particularmente en su tamaño de partícula y composición química.

A continuación, se realizaron ensayos de adsorción en fase líquida utilizando azul de metileno y fenol. Se observó que las fracciones de ceniza eran capaces de adsorber estos compuestos. Sin embargo, presentaron capacidades de adsorción máximas menores a las observadas con carbón activado. La fracción de mejor desempeño fue la de *Filtro de mangas*, con 56,5 mg/g y 13,8 mg/g para azul de metileno y fenol respectivamente. Esta fracción fue la que presentó un

menor tamaño de partícula, un mayor contenido de carbono, y los mayores valores de volumen de microporos y volumen total de poros, además de un área BET similar a las máximas áreas determinadas para otras fracciones de ceniza. La fracción *Fin de grilla* fue la que presentó una adsorción de azul de metileno máxima más baja (10,6 mg/g). Esto se asoció a una mayor cristalinidad de esta fracción, aparte de ser la que presentó menor área BET, volumen de microporos y volumen total de poros. Para esta fracción también se observó el menor contenido de carbono en su estructura entre todas las fracciones de ceniza. Por otro lado, se evaluó la cinética de adsorción de esos adsorbibles para algunas fracciones de ceniza y carbón activado, y se propusieron modelos cinéticos, obteniéndose los correspondientes parámetros.

Se valoró como especialmente adecuado utilizar la ceniza de cáscara de arroz como adsorbente en reactores continuos agitados con adsorbente en suspensión, en contraposición al uso de reactores de lechos rellenos. Los reactores continuos presentan el desafío de operar en condiciones dinámicas. Con base en la cinética obtenida previamente, se propuso un modelo general dinámico de operación en continuo para reactores de adsorción con remoción parcial o total de fases líquida y sólida. Se demostró para los casos en estudio que el reactor alcanza un estado final invariante no trivial al tender el modelo a tiempo infinito.

Se construyó un reactor de adsorción de laboratorio que se operó, y cuyos resultados se compararon con los arrojados por el modelo, alcanzándose concentraciones experimentales razonablemente similares a las predichas para el estado invariante.

Los resultados de este trabajo demostraron que las cenizas de cáscara de arroz presentan un potencial como adsorbente que varía significativamente con el punto de generación, y se estudiaron las propiedades y composiciones que permiten explicar algunos de los comportamientos. A partir de este estudio, se ha caracterizado las fracciones de ceniza con vistas a su uso como posible sustituto de los adsorbentes comerciales que son utilizados actualmente.

Palabras claves:

Adsorción en fase líquida, Ceniza de cáscara de arroz, Reactores de adsorción,
Caracterización, Modelado.