



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Farmacia y Bioquímica
Escuela Académico Profesional de Ciencia de los Alimentos

**Utilización de cáscara de plátano como material
adsorbente en la remoción de fosfato en solución
acuosa**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Licenciada en Ciencia y
Tecnología de los Alimentos

AUTOR

Eida Agripina QUISPE MITMA

ASESOR

Eliana Gabriela CONTRERAS LOPEZ

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Quispe E. Utilización de cáscara de plátano como material adsorbente en la remoción de fosfato en solución acuosa [Tesis de pregrado]. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Farmacia y Bioquímica, Escuela Académico Profesional de Ciencia de los Alimentos; 2021.

Metadatos complementarios

| Datos de autor | |
|----------------------------------|---|
| Nombres y apellidos | Eida Agripina Quispe Mitma |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 48187904 |
| URL de ORCID | https://orcid.org/0000-0002-3943-8443 |
| Datos de asesor | |
| Nombres y apellidos | Eliana Gabriela Contreras López |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 09664702 |
| URL de ORCID | https://orcid.org/0000-0003-0685-2004 |
| Datos del jurado | |
| Presidente del jurado | |
| Nombres y apellidos | Ricardo Ángel Yuli Posadas |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 19990006 |
| Miembro del jurado 1 | |
| Nombres y apellidos | Luis Alberto Inostroza Ruiz |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 44457369 |
| Miembro del jurado 2 | |
| Nombres y apellidos | Amadeo Collado Pacheco |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 07535726 |

| Miembro del jurado 3 | |
|--|--|
| Nombres y apellidos | Nelson Bautista Cruz |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 10260086 |
| Datos de investigación | |
| Línea de investigación | B.2.3.1. Toxicología Ambiental |
| Grupo de investigación | Revalorización de Fuentes Naturales y Alimentos Funcionales - REVALF |
| Agencia de financiamiento | Perú. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Vicerrectorado de Investigación y Posgrado. Programa de Promoción de Tesis de Pregrado. E18030044-PTPGRADO. |
| Ubicación geográfica de la investigación | Edificio: Facultad de Farmacia y Bioquímica, Laboratorio de Bromatología País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Calle: Jr. Puno N°1002 Latitud: -12.05572 Longitud: -77.02324 |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | Obligatorio. Ejemplo: Marzo 2019 – octubre 2021 |
| URL de disciplinas OCDE | Ciencias ambientales https://purl.org/pe - repo/ocde/ford#5.07.00 |



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Farmacia y Bioquímica
Decanato



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado Examinador y Calificador de la Tesis titulada:

“Utilización de cáscara de plátano como material adsorbente en la remoción de fosfato en solución acuosa”

Que presenta la Bachiller en Ciencia y Tecnología de los Alimentos:

EIDA AGRIPINA QUISPE MITMA

Que reunidos en la fecha se llevó a cabo la **SUSTENTACIÓN** de la **TESIS**, y después de las respuestas satisfactorias a las preguntas y objeciones formuladas por el Jurado Evaluador, y practicada la votación han obtenido la siguiente calificación:

18 (DIECIOCHO) - SOBRESALIENTE

en conformidad con el Art. 34.º del Reglamento para la obtención del Grado Académico de Bachiller en Ciencia y Tecnología de los Alimentos y Título Profesional de Licenciado (a) en Ciencia y Tecnología de los Alimentos de la Facultad de Farmacia y Bioquímica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

JURADO EVALUADOR (R.D. N.º 000630-2021-D-FFB/UNMSM)

- Dr. Ricardo Ángel Yuli Posadas
- Mg. Luis Alberto Inostroza Ruiz
- Mg. Amadeo Collado Pacheco
- M.Sc. Nelson Bautista Cruz

Lima, 22 de noviembre de 2021.

Dr. Ricardo Ángel Yuli Posadas
Presidente

“FARMACIA ES LA PROFESIÓN DEL MEDICAMENTO, DEL ALIMENTO Y DEL TÓXICO”



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Farmacia y Bioquímica
Decanato



Gmail

- Correo
- Recibidos 1.062
- Destacados
- Pospuestos
- Importantes
- Enviados
- Borradores 9
- Categorías
- Chatear +
- Espacios +

Aún no hay espacios
[Crear o encontrar un espacio](#)

linostrozar@unmsm.edu.pe



Sobre NOTA de Sustentación Bach. Eida QUISPE MITMA Recibidos x

LUIS ALBERTO INOSTROZA RUIZ
para mí

Dr. Ricardo Yuli Posadas

El calificativo de la sustentación de la tesis de la Bachiller EIDA A. QUISPE MITMA es: **18**

Atentamente,

Mg. Luis Alberto Inostroza Ruiz
Miembro del Jurado Examinador y Calificador

OK. GRACIAS. RECIBIDO.

Responder Reenviar

Gmail

- Correo
- Recibidos 1.062
- Destacados
- Pospuestos
- Importantes
- Enviados
- Borradores 9
- Categorías
- Chatear +
- Espacios +

Aún no hay espacios
[Crear o encontrar un espacio](#)

nbautistac@unmsm.edu.pe



Calificación Recibidos x

NELSON BAUTISTA CRUZ
para mí

Calificación: dieciocho (18)

Q.F. Nelson Bautista Cruz
Magíster en Microbiología Aplicada
Magíster en Ciencia de los Alimentos
Docente Asociado
Facultad de Farmacia y Bioquímica - UNMSM
Móvil: 966757127

GRACIAS! RECIBIDO. MUCHAS GRACIAS.

Responder Reenviar

“FARMACIA ES LA PROFESIÓN DEL MEDICAMENTO, DEL ALIMENTO Y DEL TÓXICO”

Jr. Puno N° 1002, Jardín Botánico – Lima 1 – Perú
Teléfonos: (511) 619-7000 anexo 4826 Ap. Postal 4559 – Lima 1
E-mail: decanofyb@unmsm.edu.pe <http://farmacia.unmsm.edu.pe>

ISO 9001

BUREAU VERITAS
Certification

N° BR233265





Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Farmacia y Bioquímica
Decanato



- Correo
- Recibidos 1.062
- Destacados
- Pospuestos
- Importantes
- Enviados
- Borradores 9
- Categorías
- Chatear +
- Espacios +

acolladop@unmsm.edu.pe



NOTA DE SUSTENTANTE

AMADEO COLLADO PACHECO
para mí

Dr. Yuli, mi nota es de 17 para esta Srta. sustentante.
Saludos
Atte,
Mg. Amadeo Collado
Docente

OK. GRACIAS. RECIBIDO.

Responder Reenviar



Aún no hay espacios
[Crear o encontrar un espacio](#)

“FARMACIA ES LA PROFESIÓN DEL MEDICAMENTO, DEL ALIMENTO Y DEL TÓXICO”

Jr. Puno N° 1002, Jardín Botánico – Lima 1 – Perú
Teléfonos: (511) 619-7000 anexo 4826 Ap. Postal 4559 – Lima 1
E-mail: decanofyb@unmsm.edu.pe <http://farmacia.unmsm.edu.pe>

ISO 9001

BUREAU VERITAS
Certification

N° BR233265



| | |
|---|------|
| ÍNDICE | |
| DEDICATORIA | VI |
| AGRADECIMIENTOS | VII |
| RESUMEN | VIII |
| ABSTRACT | IX |
| I INTRODUCCIÓN | 10 |
| 1.1 Objetivos | 12 |
| 1.1.1 Objetivo general | 12 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 12 |
| 1.2 Importancia y alcance de la investigación | 12 |
| 1.2.1 Estimación de la cantidad de cáscara generada por la exportación de chifles 13 | |
| 1.3 Limitaciones de la investigación | 14 |
| II REVISIÓN DE LA LITERATURA | 15 |
| 2.1 Marco Teórico | 15 |
| 2.1.1 Generalidades | 15 |
| 2.1.2 Producción de chifles (chips de plátano) | 17 |
| 2.1.3 Generación de residuos de las empresas productoras de chifle | 18 |
| 2.1.4 Material adsorbente | 19 |
| 2.1.5 Grupos funcionales que intervienen | 19 |
| 2.2 Antecedentes del estudio | 23 |
| 2.3 Glosario de términos | 26 |
| III HIPÓTESIS Y VARIABLES | 27 |
| 3.1 Hipótesis | 27 |
| 3.2 Variables | 27 |
| 3.3 Operacionalización de variables | 11 |
| IV MATERIALES Y MÉTODOS | 12 |
| 4.1 Área de estudio | 12 |
| 4.2 Diseño de investigación | 12 |
| 4.3 Muestra | 14 |
| 4.4 Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de Información | 15 |
| 4.5 Métodos | 15 |
| 4.5.1 Preparación del adsorbente | 15 |
| 4.5.2 Preparación de adsorbente por pirólisis | 15 |
| 4.5.3 Preparación de la solución de fosfato | 16 |
| 4.6 Caracterización del adsorbente | 16 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.6.1 | Humedad: | 16 |
| 4.6.2 | Cenizas:..... | 16 |
| 4.6.3 | pH..... | 16 |
| 4.6.4 | Determinación de sitios activos - método Boehm | 17 |
| 4.6.5 | Punto de carga cero (pzc)..... | 18 |
| 4.6.6 | Rendimiento:..... | 18 |
| 4.7 | Adsorción de fosfato | 18 |
| 4.7.1 | Determinación de fosfato en solución | 18 |
| 4.7.2 | Técnicas de adsorción por lotes..... | 19 |
| 4.7.3 | Modelos cinéticos utilizados para adsorción de fosfato..... | 19 |
| 4.7.4 | Modelo de Pseudo Primer Orden Reversible | 19 |
| 4.7.5 | Modelo de Pseudo Segundo Orden | 20 |
| 4.8 | Análisis estadístico..... | 22 |
| V | RESULTADOS..... | 23 |
| 5.1 | Elaboración del adsorbente..... | 23 |
| 5.1.1 | Rendimiento de obtención del adsorbente a tres temperaturas de pirólisis 23 | |
| 5.1.2 | Características fisicoquímicas..... | 24 |
| 5.1.3 | Sitios activos..... | 24 |
| 5.1.4 | Punto de carga cero..... | 25 |
| 5.2 | Adsorción | 26 |
| 5.2.1 | Curva de calibración de fosfatos | 26 |
| 5.2.2 | Remoción | 33 |
| 5.2.3 | Capacidad de adsorción | 34 |
| VI | DISCUSIÓN | 35 |
| VII | CONCLUSIONES | 44 |
| VIII | RECOMENDACIONES | 45 |
| IX | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 46 |
| X | ANEXOS..... | 53 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Chifles elaborados a partir de plátano bellaco..... | 18 |
| Figura 2. Grupos funcionales presentes en las superficies | 19 |
| Figura 3. Etapas del proceso de adsorción | 21 |
| Figura 4. Diseño experimental | 13 |
| Figura 5. Mapa de Pangoa– Satipo | 14 |
| Figura 6. Punto de carga cero de P700..... | 25 |
| Figura 7. Punto de carga cero de P600..... | 25 |
| Figura 8. Punto de carga cero de P500..... | 25 |
| Figura 9. Curva de calibración para fosfatos | 26 |
| Figura 10. Modelos cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos | 28 |
| Figura 11. Modelos cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos | 28 |
| Figura 12. Modelos cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos | 28 |
| Figura 13. Modelos cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos | 30 |
| Figura 14. Modelos cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos | 30 |
| Figura 15. Modelos cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos | 30 |
| Figura 16. Modelos cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos | 32 |
| Figura 17. Modelos cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos | 32 |
| Figura 18. Modelos cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos | 32 |
| Figura 19. Porcentaje de remoción de fosfato en solución acuosa de los tres tratamientos a diferentes pH | 33 |
| Figura 20. Capacidad de adsorción fosfato en solución acuosa de los tres tratamientos a diferentes pH. | 34 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Estimación de la cantidad de cáscara de plátano | 14 |
| Tabla 2. Taxonomía del genero Musa | 15 |
| Tabla 3. Diferencias entre fisisorción y quimisorción | 22 |
| Tabla 4. Variables dependientes e independientes | 27 |
| Tabla 5. Matriz de consistencia | 10 |
| Tabla 6. Operación de variables..... | 11 |
| Tabla 7. Rendimiento de las muestras de adsorbentes..... | 23 |
| Tabla 8. Caracterización del material adsorbente | 24 |
| Tabla 9. Determinación de sitios activos mediante el Método Boehm | 24 |
| Figura 8. Punto de carga cero de P500..... | 25 |
| Tabla 11. Parámetros de modelos cinéticos aplicados a pH 10 | 27 |
| Tabla 12. Parámetros de modelos cinéticos aplicados a pH 7 | 29 |
| Tabla 13. Parámetros de modelos cinéticos aplicados a pH 4 | 31 |
| Tabla 14. Porcentaje de adsorción entre adsorbentes. | 42 |

DEDICATORIA

A Dios debido a que en su gracia me brinda la oportunidad tener su fortaleza en mi vida, ya que gracias a su incomparable amor me dio la oportunidad de vivir esta aventura de mi etapa profesional. A mi madre Olga Mitma Tineo y mi padre Favio Quispe Pillaca, por enseñarme a caminar por la vida para seguir cumpliendo mis sueños. A mis hermanos por su constante apoyo y compañía. A mis padrinos Zeida Celis Tucto y Jose Mendoza Fernández, que en reflejo de su amor incondicional me motivan a seguir creciendo y a sus hijos por su amor incondicional. A mis compañeras y amigas Karina Hinojoza, Jhanin Ramírez y Elizabeth Reyes por su apoyo incondicional y por la amistad brindada, A mi amiga Adriana Rivera de la Cruz por todo su cariño y motivación a seguir creciendo profesional y espiritualmente. A mis amigos del grupo de FFGN, porque con sus mensajes de amino contribuyeron a que me siguiera instruyendo con los valores y principios en el amor de Dios y amor al prójimo.

Cuando inicie esta aventura Dios me hablo por medio de este pasaje bíblico, gracias por no dejar de recordármelo Prov. 2:10 “cuando la sabiduría entrará en tu corazón y la ciencia fuere grata a tu alma”.

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, Dios, por llenarme de fortaleza para concluir este trabajo y por poner en mí a personas tan precisas para cada momento que han sido pilares en este camino.

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, mi alma máter, a los docentes de la Facultad de Farmacia y Bioquímica y de la Escuela de Ciencia de los alimentos.

A mi asesora de tesis, Ing. Mg. Sc. Eliana Gabriela Contreras López, por su preciada asesoría, dirección, paciencia y consejos precisos que contribuyeron a realizar esta tesis. Agradecerle por la confianza depositada desde el inicio del trabajo.

A los docentes de los distintos departamentos que me acogieron en sus laboratorios con mucho cariño.

A mi familia y amistades por la confianza y sus palabras de ánimo en todo momento de mi vida.

Al Dr. Ricardo Angel Yuli Posadas presidente del jurado y a los miembros del Jurado examinador y calificador Mg. Amadeo Collado Pacheco, MSc. Nelson Bautista Cruz, Mg. Luis Inostroza Ruiz, por las críticas constructivas y aportes brindados para seguir mejorando la presente investigación. El mismo que fue patrocinado con el soporte del Fondo de Promoción de trabajo de Tesis de Pregrado 2018 del Vicerrectorado de Investigación-UNMSM con código N° A18040814 gracias por la confianza.

RESUMEN

En el Perú existe acumulación de residuos originados del procesamiento de snacks de plátanos los cuales pueden ser aprovechados en la obtención de adsorbentes. El objetivo principal fue evaluar la remoción de fosfatos por un adsorbente elaborado a partir de cáscara de plátano de la variedad Bellaco a diferentes temperaturas de pirólisis y pH en solución acuosa. La cáscara de plátano de la variedad Bellaco de procedencia de Satipo se sometió a distintos tratamientos de carbonización a temperaturas de 500 °C, 600 °C y 700 °C (P500, P600 y P700). Los adsorbentes se sometieron a experimentos de adsorción por lotes a distintos pH; en este proceso se elaboró una solución acuosa de 0,3 mg/L de fosfato, ajustando a pH de 4,0; 7,0 y 10,0 y se agregó el material adsorbente en una concentración de 1 g/L, se dejó reposando con agitación ocasional durante 168 horas a temperatura ambiente (23 °C en promedio). El fosfato al inicio del tratamiento y al término del tratamiento se cuantificó mediante espectrofotometría uv-visible. El adsorbente mostró la capacidad de remoción de fosfatos a pH 7 y 10, sin embargo, hubo liberación de fosfatos a pH 4. Los datos cinéticos se describieron con éxito mediante el modelamiento de difusión intraparticular, seguido por el de pseudo-segundo orden. El tratamiento P500 presentó mayor capacidad de remoción de fosfatos (92,1 %) a pH 10. La producción de adsorbente se presenta como una alternativa sostenible a partir del aprovechamiento residuos de la industria de los chifles (snack de plátano), en el marco de una economía circular.

Palabras clave: cáscara de plátano, adsorbente, fosfato, cinética de adsorción.

ABSTRACT

In Peru there is an accumulation of residues originating from the processing of banana snacks which can be used to obtain adsorbents. The main objective to evaluate the removal of phosphates by an adsorbent made from banana peel of the Bellaco variety at different pyrolysis temperatures and pH in aqueous solution. The banana peel of the Bellaco variety from Satipo was subjected to different carbonization treatments at temperatures of 500 °C, 600 °C and 700 °C (P500, P600 and P700). The adsorbents were subjected to batch adsorption experiments at different pH; In this process, an aqueous solution of 0.3 mg / L of phosphate was made, adjusting to pH 4.0; 7.0 and 10.0 and the adsorbent material was added in a concentration of 1 g / L, it was left to stand with occasional stirring for 168 hours at room temperature (23 ° C on average). Phosphate at the beginning of treatment and at the end of treatment was quantified by uv-visible spectrophotometry. The adsorbent showed the ability to remove phosphates at pH 7 and 10, however, there was release of phosphates at pH 4. The kinetic data was successfully described by intraparticle diffusion modeling, followed by pseudo-second order. The P500 treatment presented a higher phosphate removal capacity (92.1%) at pH 10. The production of adsorbent is presented as a sustainable alternative from the use of waste from the chifon industry (banana snack), in the framework of a circular economy.

Keywords: banana peel, adsorbent, phosphate, adsorption kinetics.

I INTRODUCCIÓN

El progreso agroindustrial en el Perú ha obtenido que el país, pueda localizar sus diversos productos tanto a nivel nacional e internacional, contribuyendo a mejorar las condiciones de vida, el incremento y la creación de diversos empleos que han traído gran desarrollo al país. En el 2020, la cantidad de frutas producidas en Perú se estimó en los 7,2 millones de toneladas, entre ellas destacó la producción de plátano, cuya producción fue 2 305 300 toneladas (32 % de la producción total de frutas). El plátano es la fruta más demandada por los peruanos, en los datos brindados por la encuesta Nacional de Hogares del 2019 (Enaho 2019) menciona que, concentrando el 55 % del total de la demanda (el Perú alcanza a consumir 55 kilos de fruta por persona de manera anual) (1).

Los chifles o chips de plátano, se obtienen a partir de láminas delgadas de plátano verde o maduro, fritos. La exportación peruana de chifle fue 7879,082 kg en el año 2020. Entre las principales empresas exportadoras de este rubro se posicionaron Inka Crops S.A., Piura Foods SAC, Delicias y Sabores del Perú EIRL, Danper Trujillo SAC, Unión Negocios Corporativos SAC, Agroindustrias AIB SA y Solimar Industria EIRL.(2). No obstante, junto con el crecimiento económico de industria platanera y el incremento de la producción chifles, también se fueron generando grandes cantidades de residuos orgánicos (cáscara de plátano), siendo un problema su gestión.

Por otra parte, en nuestro país, la contaminación del agua es un problema ambiental importante. Por ello, es necesario proteger nuestro recurso agua de potenciales contaminaciones para conservarlo. Las fuentes de agua poseen diferentes contaminantes que conduce a un deterioro de las mismas, una de estas es la presencia de materia orgánica que en los fuentes de agua reducen el oxígeno disuelto provocando un déficit del mismo, y a la vez problemas muy serios para la biota del agua. También la presencia de suspensiones sedimentadas pueden reducir el ingreso de la luz que es indispensable para el desarrollo de los organismos fotosintéticos (3).

El fosfato es la forma como el fósforo se encuentra en el ambiente. Niveles altos de fosfato en un medio acuático conduce al crecimiento excesivo de algas azul-verdes.

Para la descomposición de estas algas, se requieren de bacterias consumidoras de oxígeno (4) La presencia de estas bacterias en altas concentraciones puede provocar el deceso de toda forma de vida en el medio acuático, a este fenómeno se le llama eutrofización (5). Este proceso, provocado por el exceso de fosfato en el agua, procede mayoritariamente de actividades antrópicas debido a la mala gestión de residuos y/o vertidos.

En el Perú, el carbón activado también conocido como adsorbente solo es obtenido a través de la importación; debido a que el país no produce a escala industrial. En ese sentido, la presente trabajo de investigación buscó producir un adsorbente de fosfato acuoso partiendo de la cáscara de plátano. Por ello se realizó un análisis de adsorción por lotes, identificado como principal metodología. El proceso de la adsorción es mediante en el cual la sustancia a la que se conoce como adsorbato es removida, acumulada en la parte de la superficie de un sólido poroso conocido como, adsorbente. Este método ha demostrado ser eficiente para la remoción de fosfato (6).

En la adsorción el mecanismo es dependiente de los grupos funcionales que están en la superficie del adsorbente. Los parámetros de adsorción que se evaluaron en esta investigación fueron la temperatura y pH, los cuales son dos factores determinantes de la adsorción, además la concentración inicial de la solución de fosfato fue considerado un factor fijo. Cada factor se estudió en tres niveles, por triplicado. En la solución acuosa la concentración inicial de fosfato fue 0,3 mg/L, el adsorbente fue agregado en dosis de 1 g/L. El experimento se realizó en matraces con agitación ocasional durante 168 horas a temperatura ambiente ($T = 23^{\circ}\text{C}$).

La complejidad de las estructuras presentes en el adsorbente, implican que se puedan adsorber los contaminantes de diversas maneras. Los mecanismos de adsorción pueden variar dependiendo de la sustancia a ser capturada y del material adsorbente. Para poder medir en el adsorbente la capacidad de adsorción se hizo el experimento siguiendo la cinética de adsorción. Este estudio, sirvió para determinar el momento en que el adsorbente llegó a adsorber la mayor cantidad del fosfato presente en la solución. La muestra fue sometida al análisis en base a los modelamientos cinéticos: pseudo primer orden, pseudo segundo orden y el modelo de Weber y Morris también

conocido como de difusión intraparticular. En esta investigación, el tratamiento de adsorción se adaptó mejor al modelamiento cinético de pseudo segundo orden. Esto presumió que el adsorbato se adsorbió en dos sitios activos del adsorbente elaborado de la cáscara de plátano. El modelo de difusión intraparticular también fue uno de los modelos cinéticos que tuvo mayor adaptación en la presente investigación, se presume que este modelo tuvo una difusión en la parte interna de los poros del adsorbente que realiza el traslado del soluto a través de la membrana interna, la cual tiene característica principal la dependencia entre la adsorción específica y la raíz cuadrada del tiempo, teniendo la pendiente la velocidad de difusión intraparticular. Esto se pudo evaluar cuando el adsorbente fue sometido durante a periodos de tiempo controlado para alcanzar el equilibrio. Esto nos permitió conocer que el adsorbente a base de cáscara de plátano tuvo características para calificar como un adsorbente potente descontaminador de fosfato acuoso.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Evaluar la remoción de fosfatos por un adsorbente producido a partir de cáscara de plátano de la variedad bellaco a diferentes temperaturas de pirólisis y pH en solución acuosa.

1.1.2 Objetivos específicos

- Obtener un adsorbente a partir de cáscara de plátano variedad bellaco procedente de Satipo.
- Caracterizar el adsorbente obtenido a partir del precursor, cáscara de plátano bellaco.
- Aplicar el modelamiento cinético de adsorción de pseudo primer orden, pseudo segundo orden y Difusión intraparticular.

1.2 Importancia y alcance de la investigación

La cáscara de plátano usada como precursor en la elaboración de adsorbentes tuvo dos propósitos, el primero fue lograr la minimización de un residuo agroindustrial y el segundo fue darle un valor de uso a la cáscara. Entendiendo,

que la acumulación de residuos genera la aparición de malos olores, producción de lixiviados contaminantes, presencia de moscas y roedores, además de un impacto negativo al paisaje.

La industria platanera en el país, genera grandes cantidades de cáscara de plátano, que hoy en día no es aprovechada en su totalidad, debido a esto es necesario investigar nuevas alternativas de usos, para darle valor a este residuo. Las industrias que utilizan como materia prima los plátanos tienen la necesidad de deshacerse de la cáscara, por ello su aprovechamiento, permite minimizar los efectos de la acumulación de residuos. La elaboración de adsorbentes a partir de la misma, es una alternativa viable, debido a su composición, califica como un potente material adsorbente. Generando desarrollo económico mediante una nueva línea de producción.

La obtención de adsorbentes usando como base cáscara de plátano, se sustenta en el D.L. N° 1278 Ley N° 27314 Gestión Integral de Residuos Sólidos, la que se menciona la priorización de la valorización de residuos sólidos, considerando su utilidad en diferentes actividades como transformaciones biológicas. Asimismo, la utilización de residuos, está en línea con el cumplimiento del objetivo 12.5 planteado por la Agenda de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, que alude a reducir considerablemente la generación mediante la implementación de actividades de preventivas: reutilización, reciclado, reducción.

- 1.2.1 Estimación de la cantidad de cáscara generada por la exportación de chifles
Para la estimación de la cantidad de cáscara de plátano, generada como residuo de la fabricación de chifle para exportación, se tomó como referencia las cifras presentadas por Odar (7), respecto a la producción anual de la empresa Vivar SAC. Las cifras señalan que a partir de 3693,69 kg de plátano bellaco se obtienen 1230 kg de chifles y 757,68 kg de cáscara de plátano, lo cual representa el 33,3 % y 20,51% del total de la materia prima respectivamente.

Tabla 1. Estimación de la cantidad de cáscara de plátano (kg) a partir de información de exportación de chifles en los años 2019 y 2020.

| Año | Cantidad de chifle exportado (kg) | Cantidad de cáscara generada (kg) | Adsorbente (kg) | | |
|------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|------|---------|
| | | | P700 | P600 | P500 |
| 2019 | 6 129 833 | | ~550 | ~561 | |
| | | ~3 775 977 | 537 | 110 | ~563753 |
| 2020 | 7 879082 | | ~707 | ~721 | |
| | | ~4 853 515 | 642 | 232 | ~724629 |
| 2020 | 7 879082 | ~4 853 515 | 642 | 232 | ~724629 |

En la estimación de la cantidad de cáscara de plátano generada durante los años 2019 y 2020 por la exportación de chifle, se tomaron como base los datos de cantidad de chifle exportado (2). La cantidad de cáscara se estimó, empleando los porcentajes equivalentes a chifle y cáscara a partir de los datos publicados por Odar(7).

(11). Además, con los datos de rendimiento de obtención del adsorbente (Tabla 6), se aproximó la cantidad de adsorbente (P500, P600 y P700) que podría producirse a partir de la cantidad de cáscara de plátano estimada por exportación de chifles.

1.3 Limitaciones de la investigación

El trabajo de investigación se basó en el análisis de la adsorción en soluciones acuosas, no pudiendo concluir que los resultados alcanzados puedan generalizarse al agua proveniente de fuentes naturales.

II REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Generalidades

El fruto del plátano tiene como origen en el Sudeste Asiático. Su cultivo se desarrolló simultáneamente en Malasia y las Islas de Indonesia, sin embargo, su origen no se encuentra claramente definido (8).

Taxonomía y clasificación

El fruto plátano tiene un único nombre científico que es *Musa paradisiaca*, de la familia *Musaceae*, orden Zingiberales

Tabla 2. Taxonomía del genero Musa

| | | |
|--------------|---|------------------------------|
| Reino | : | Plantae |
| Subreino | : | Franqueahionta |
| División | : | Espermatophyta |
| Subdivisión: | : | Magnoliophyta |
| Clase | : | Liliatae |
| Orden | : | Zingiberales |
| Familia | : | Musaceae |
| Genero | : | <i>Musa sp.</i> |
| Especie | : | <i>(Musa paradisiaca, L)</i> |
| Familia | : | <i>Musáceas</i> |

Nota: Adaptado de Hiutron (9)

Botánica de los plátanos

Morfología: “Se desarrolla un rizoma superficial en la planta de los plátanos, este contiene tejidos parenquimatosos y meristemáticos donde nacen las raíces, superficiales, que es sensible aplicación de productos químicos y a alto contenido de humedad ” (10).

El pseudotallo de la planta es la parte aérea y está formado por vainas que envuelven las hojas, presenta coloración verde por el dorso y más claras por el reverso, cada una tiene habitualmente de 5 y 15 hojas, y debe poseer 10 como base para ser calificada como madura, las hojas tienen una duración de 3 a 5

meses (10). La inflorescencia es semejante a un capullo grande purpura que se inclina hacia el extremo distal, con el raquis glabros y el péndulo (11).

Plátano variedad: Bellaco

Es una especie perteneciente a la sub especie Horn, llamado comúnmente como Harton, es cultivado en la costa norte como en la selva tiene un tallo verde con leños rosados, posee un diámetro de 24 cm y 3 m de altura. Sus flores consideradas como masculinas presentan coloración amarilla y el racimo al finalizar su madurez poseen 33 puntas de un peso promedio de 650 g y unos 30 a 40 cm de largo. (10)

El plátano es un fruto muy consumido en nuestro país por sus propiedades nutricionales, sensoriales y su bajo costo. En 2006 la producción peruana de plátano fue 1,766 mil t. 4,1 % superior al 2005, y supero el doble de los niveles informados en 1994 (845 mil t). La producción continuó avanzando en los primeros ocho meses de 2007, logrando alcanzar 1,21 mil de toneladas 2,3 % más al periodo de 2006. Su consumo a nivel nacional en el año 2013 alcanzó 1 992 mil toneladas que representa el 94 % de total de producción y el porcentaje restante se indicó que fue destinado a la exportación (12).

No se tiene información exacta de la producción agrícola de plátano bellaco. Sin embargo, la producción del plátano en los últimos ocho años dentro del territorio peruano se incrementó, siendo 1, 821,247 t en el 2008, mostrando una ligera desaceleración. La FAO mencionó que la producción mundial de plátano entre los años 2008, 2009 y 2010 fue de 35 987 T, 36 819 t y 36562 t, respectivamente. El Perú fue clasificado por la FAO como uno de los países principales en la producción de plátano en el año 2010 registró 2 007,280.00 t. Se pudo obtener ingresos a corto plazo al productor con la producción del plátano, así mismo se logró el incremento de empleos permanentes en trabajos relacionados con el manejo del cultivo.

2.1.2 Producción de chifles (chips de plátano)

Respecto a la producción de chifles, según PROMPERU, las exportaciones incrementaron a más de 1,3 millones de dólares, debido a que un porcentaje superior al 80 % de ventas fueron destinados a países como, Japón Canadá, Chile, entre otros.

Las empresas exportadoras que se encuentran en Perú, son fundamentalmente, Industrias Agrícolas de Piura, Inka Crops y Sasil Export de Lima, entre otras. Este mercado tiene posibilidad de seguir ampliándose, dada la atracción que ha generado el chifle, por ser un producto nutricional, con carácter étnico (7). Las exportaciones de chifles, hacia Estados Unidos fueron incrementándose en los últimos años; debido a la creciente población de migrantes latinoamericanos que conservan sus gustos y tradiciones. Esto ha provocado un incremento en la producción agrícola de plátano bellaco, para el procesamiento y producción de chifles. Varias empresas exportan este tipo de productos (7). Durante los años 2019 y 2020, Perú exportó 6.129.833 kg y 7.879.082 kg de chifles respectivamente (2).

Además, en nuestro país existen muchas empresas familiares, que se dedican a la elaboración artesanal de chifles, para mercado interno. La producción de chifle es menor a las empresas exportadoras. Por ejemplo, Vivar SAC. Es una empresa que produce “chifles naturales Vivar”, se encuentra situada en el departamento de Lambayeque, Perú. Odar (7), determinó que, por cada 19,5 kg de plátano bellaco para la producción de chifles, se generaron 4 kg de cáscara de plátano.



Figura 1. Chifles elaborados a partir de plátano bellaco

Fuente. Vivar SAC (7)

2.1.3 Generación de residuos de las empresas productoras de chifle

El plátano es un fruto, compuesto por la pulpa y la cáscara en 60 % y 40 % respectivamente, es decir que por cada caja de plátano de 18,14 kg genera un desperdicio de 7,25 kg. Por ello, es necesario crear diversas alternativas para su reutilización y de esta manera poder reducir o eliminar la potencial contaminación ambiental (11).

Respecto a la generación de residuos de parte de las industrias productoras de chifle, no se encuentran reportes estadísticos. Sin embargo, Odar (7) reportó la generación de 757,68 kg de cáscara de plátano, a partir de la producción anual 1230 kg de chifles, empleando 3693,69 kg de plátano de la variedad bellaco.

El plátano posee la cáscara rica en fibra dietética, proteínas, aminoácidos esenciales, ácidos grasos poliinsaturados y potasio (13). Además, contienen un valor muy alto de aceite esencial, pectina, fibra dietética, pigmento y componentes activos biológicos (14). Estos componentes indican la existencia de varios grupos funcionales, que le confieren a la cáscara de plátano características interesantes para cuantificar su capacidad de adsorción.

2.1.4 Material adsorbente

Según Reátegui(15) El adsorbente posee propiedades químicas superficiales y estructurales que son muy importantes para la adsorción. Los diversos grupos funcionales de la superficie del adsorbente tienen gran importancia en la clase de enlace que se genere con el adsorbato, y las características fundamentales como la porosidad, superficie específica, volumen de poro, etc, cobrarán importancia en la cantidad adsorbida y la cinética del proceso de adsorción.

2.1.5 Grupos funcionales que intervienen

Los adsorbentes poseen grupos funcionales específicos que le confieren características esenciales por los cual son divididos en dos grupos sitios activos ácidos y sitios activos básicos (16). Los sitios activos en los adsorbentes pueden distinguirse de acuerdo al pH que presenta la solución, los sitios activos ácidos son potentes donadores de protones y los sitios activos básicos son potentes receptores, de manera usual estos coexisten en el mismo medio, pero con el incremento de sitios ácidos la concentración de sitios básicos se reduce y viceversa (17).

Los sitios que son usados como puntos activos para la adsorción se ubican en los siguientes grupos como son los carboxilo, amino, hidroxilo, que forman parte de la diversidad de los polímeros de procedencia natural (18).

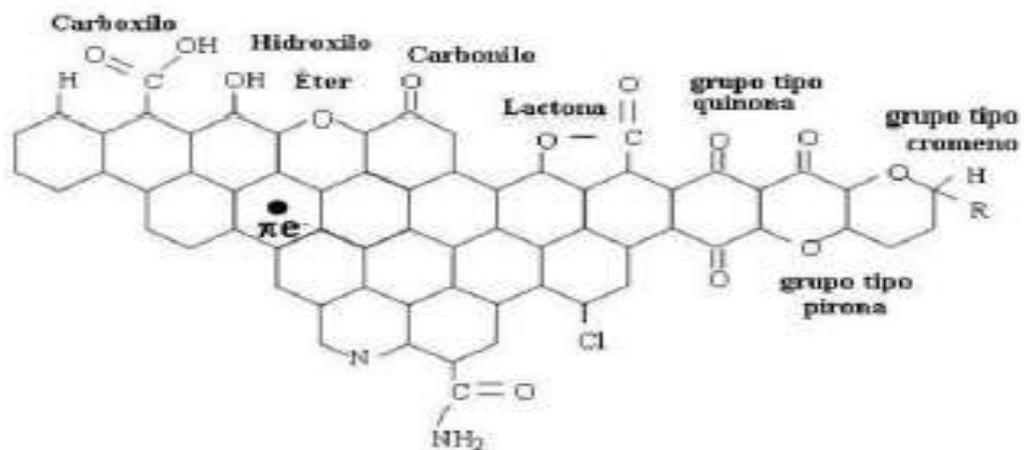


Figura 2. Grupos funcionales presentes en las superficies (15)

2.1.5.1 La adsorción

Proceso de transferencia de masa que tiene como eje principal la acumulación de sustancias entre las dos fases, como gas-líquido, gas-sólido, líquido-líquido. La sustancia que es removida es el adsorbato y se denomina adsorbente al material que adsorbe (19). La interface incorpora la superficie extrínseco e intrínseco de los capilares, las grietas y los intersticios del sólido (20).

Es considerado un método de operación fácil de manejar, diversos estudios han probado su poder descontaminador de sustancias solubles e insolubles con resultados que alcanzan el 99,9% de remoción. La adsorción es un proceso superficial donde las partículas de un compuesto son detenidos en la superficie de un sólido por las diversas fuerzas superficiales las fuerzas de Van Der Waals; de acuerdo a la fuerza usada, será clasificada la adsorción como física o química (21). Esto tiene influencia en la superficie interna, externa de los capilares, las grietas y los intersticios del sólido (22). Este proceso tiene varias partes que toman los siguientes nombres: adsorbente, el sólido que las detiene y adsortivo, la sustancia a adsorber (23).

2.1.5.2 Características del solvente

Las propiedades químicas del solvente tienen importancia en las relaciones que se generan entre el adsorbente y adsorbato, ya que la intensidad con que se produzca la adsorción en el sistema dependerá del disolvente que se encuentra diluido. La tensión superficial posee mayor importancia ya que precisa la superficie eficaz para la adsorción (6).

2.1.5.3 Mecanismo de Adsorción

El proceso de la adsorción depende de la presencia de los grupos funcionales en la superficie del adsorbente, y de la matriz de las especies adsorbentes. La temperatura, el pH, la concentración inicial, y la dosis del adsorbente son factores influyentes en la adsorción (24)

Los adsorbentes poseen distintas características en sus estructuras, esto es debido a que existan diversas formas que sean retenidos los contaminantes. Son diferentes los mecanismos de adsorción por lo que dependen de la sustancia a

ser retenida y del material adsorbente. El proceso que sigue el mecanismo muchas veces es difícil de poder explicar, por lo que es necesario que continúe hasta llegar a alcanzar el equilibrio (19)

2.1.5.4 Descripción del proceso de adsorción.

La adsorción obedece un proceso que requiere fases consecutivas como se muestra en la siguiente figura 3.

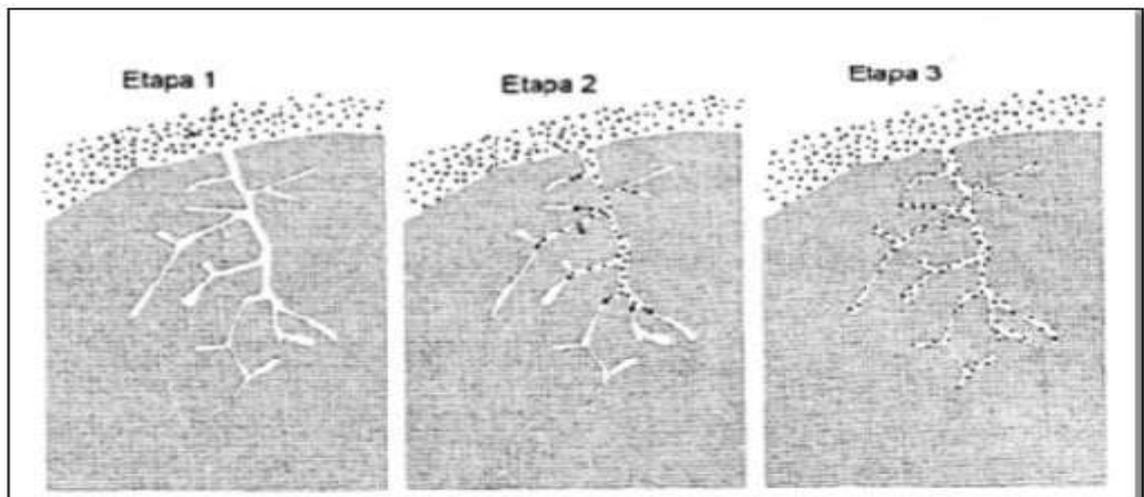


Figura 3. Etapas del proceso de adsorción (22)

2.1.5.4.1 Etapa 1. Difusión externa.

El adsorbato migra a la parte externa de la superficie del sólido donde debe superar la fuerza de una delgada capa acumulada alrededor del adsorbente este es la interface sólido-fluido.

2.1.5.4.2 Etapa 2. Difusión interna.

La parte externa de la superficie expuesta a las partículas es inferior al 1% del total, por lo cual el adsorbato tiene que migrar a través de la porosidad de la red del sólido para poder difundirse.

2.1.5.4.3 Etapa 3. La adsorción del adsorbato.

En este paso, se observa la adherencia del adsorbato a la superficie del adsorbente.

2.1.5.5 Tipos de adsorción

2.1.5.5.1 Adsorción física

En esta adsorción también conocida como fisisorción las relación adsorbato-adsorbente son fáciles de romper por lo que las fuerzas que actúan son del tipo de Van der Waals o fuerzas de dispersión como dipolo-dipolo, ion-dipolo, etc. Estas son similares a las fuerzas de cohesión comprometidas en la condensación de vapores a líquidos (22). Donde el calor de adsorción es bajo, del orden de los 20 [kJ/mol]. Este fenómeno es un tipo de adsorción de bajo grado de especificidad en el cual las moléculas no trasladan ni comparten electrones por lo que tanto las moléculas de adsorbato como de adsorbente preservan sus propiedades físico-químicas (6).

2.1.5.5.2 Adsorción química

Esta adsorción también conocida como quimisorción realiza una compartimiento de electrones entre las partículas del adsorbato y la superficie del adsorbente donde se tiene una reacción química (22) se caracteriza por ser altamente específica y producir enlaces químicos entre adsorbato y adsorbente por lo que hace que sea un proceso irreversible. La energía la de adsorción del orden de una respuesta química es 200 [kJ/mol] (6).

Tabla 3. Diferencias entre fisisorción y quimisorción (22)

| FISISORCIÓN | QUIMISORCIÓN |
|---|---|
| Relaciones de van de Waals, enlaces fáciles de romper. | Enlaces de corto alcance, enlace difíciles de romper (verdaderos enlaces químicos) |
| Entre los 10 y 20 kJ/mol entalpia de adsorción | Entre 40 y 400 kJ/mol entalpia de adsorción |
| Se disminuye la adsorción al aumentar la temperatura, proceso reversible | Favorece la adsorción al aumentar la temperatura. Es un proceso irreversible |
| En cualquier punto de adsorbente se da el proceso de adsorción. | Requiere de puntos primordiales en la superficie para que se dé la adsorción. |
| El proceso puede darse en una sola capa o en varias capas. | Se realiza el proceso en una sola capa |
| Las reacciones de neutralización, descomposición, etc. No se dan en este proceso. | Pueden presentar resultados superficiales como disociación, catálisis, reconstrucción, etc. |
| El adsorbato no muta, mantiene su estructura química. | Se da el cambio de la estructura química del adsorbato respecto al precursor. |

Nota: Adaptado de Paredes (22)

Fósforo

Compuesto muy elemental para el crecimiento de toda forma de vida, ya que actúa como nutrientes para el cultivo de vegetales (25). Es el componente crucial y elemental para las estructuras en el desarrollo de las moléculas grandes como los fosfolípidos y ácidos nucleicos por lo cual está incluida su participación en todos los procesos fisiológicos (26).

Se presenta habitualmente como ortofosfatos, fosfatos condensados y algunas veces como fosfatos orgánicos. Los polifosfatos, tienden a bajar la concentración de calcio y evitan la precipitación de carbonato en las tuberías, pero la forma más común de encontrarla en el medio ambiente es el ortofosfato.

El fósforo tiene distintas fuentes: animales, suelos, fertilizantes (en forma de fosfatos condensados), detergentes y descargas industriales. Su presencia en altas concentraciones en el medio acuático provoca el crecimiento de organismos fotosintéticos en cantidades que perjudican el medio.

2.2 Antecedentes del estudio

En la actualidad hay diferentes estudios sobre uso de residuos agroalimentarios para la elaboración de material adsorbente que resultan ser eficientes en la remoción de diversas poluciones como colorantes, metales pesados, entre otros que se hallan en cuerpos de agua y aguas residuales (14).

Respecto al precursor, se realizaron estudios con productos de la poda, como tallos (26) y cáscaras (13, 27, 28, 29, 30). El tallo de plátano es usado como precursor del material adsorbente fue empleado para la adsorción de pesticidas (2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) y bentazona), con resultados eficientes (27). Otro estudio, empleó la cáscara de plátano en la elaboración de un adsorbente modificado con acrilonitrilo, para el estudio de la adsorción de cromo. El cual, tuvo una eficiencia de 96% de remoción de cromo, en soluciones acuosas (28). Así como la valoración de los desperdicios generados del consumo de la banana, que después de ser sometidos al tratamiento térmico se observó una alta remoción (100%) de metales pesados como Cr, Cu, Pb y Zn. Diversos estudios mencionan que el uso de cáscara de banana fue elegido por sus notables propiedades, tales como el bajo costo, biodegradabilidad, baja huella de carbono y reducido impacto ambiental.(29)

Estudios realizados para la adsorción de fosfatos en aguas residuales sintéticas, demostraron que los adsorbentes elaborados de cáscara de arroz que son capaces de adsorber un 89%, lo cual propuso el uso de estos residuos como una alternativa sostenible para la eliminación de fosfatos del medio acuático (30). El uso de cáscara de calabaza (13) y chirimoya (31), fueron propuestos para la descontaminación de colorantes y metales pesados.

La cáscara de nuez de tierra y echhornia fueron empleados como precursores para la elaboración de adsorbentes para la remoción de colorantes, donde las variables de adsorción fueron pH, concentración inicial, temperatura y tiempo de contacto. Sumajit (32) menciona que mientras más tiempo de contacto tenga el colorante con el adsorbente, es mayor el porcentaje de adsorción, esto puede ser determinado por el modelamiento cinético.

El uso de cuatro biochars o biocarbones, obtenidos de la carbonización de precursores como madera, mazorcas de maíz, cáscaras de arroz y aserrín se evaluaron para la adsorción, desorción y regeneración de fosfato (PO_4^{3-}) a partir de estiércol de cerdo líquido digerido anaeróbicamente. La capacidad de adsorción de PO_4^{3-} incremento y se realizó la evaluación del modelamiento cinético de adsorción que obedeció el modelo de pseudo segundo orden, lo cual podría indicar que la quimisorción a través de la precipitación fue el principal mecanismo de eliminación de PO_4^{3-} (33).

La transformación de desechos agrícolas como las cáscaras de banana en un valioso material absorbente se ha probado eficaz y eficiente en el procedimiento para tratar aguas residuales (34). El carbón activado tuvo como precursor a la cáscara de plátano, para la reducción de contaminantes acuosos. Un estudio, reportó la preparación de carbón activado que tiene como precursor residuos de plátano de dos especies *Musa cultivares* y *Musa acuminata* para verificar la eficiencia de remoción de cobre, las variables de adsorción utilizadas fueron pH, concentración inicial de iones metálicos y dosificación de adsorbente utilizando la metodología de adsorción por lotes donde se encontró como resultados que la máxima eficiencia de eliminación de cobre utilizando los dos tipos de cáscaras fueron del 80 % y del 85 % para *Musa cultivares* y *Musa acuminata* respectivamente (35).

En general, el uso de residuos alimentarios como las cáscaras de frutas, como los precursores de la fabricación de adsorbentes disminuye el impacto ambiental, sin embargo, el uso de soluciones químicas contaminantes, procesos largos y alto consumo de energía, han llevado a los científicos a la búsqueda de materiales eficientes para la adsorción de contaminantes, pero con procesos más simples. Por ello, la elaboración de adsorbentes es una alternativa ecoamigable, sostenible, que se denomina de “bajo costo” porque su procesamiento es simple y por el empleo de materiales de desecho que carecen de valor económico y que presentan un potencial contaminante ambiental (36).

En la actualidad hay una variedad de estudios donde usan como precursores a los residuos agroalimentarios para la elaboración de material absorbente que resultan ser eficiente en la remoción de diversas poluciones como colorantes, metales pesados, entre otros que se ubican en cuerpos de agua y aguas residuales (24).

2.3 Glosario de términos

- a) °C: Grados Celsius
- b) g: Gramos
- c) h: Hora
- d) H_3PO_4 : Ácido fosfórico
- e) L: Litro
- f) m: Metro
- g) M: Molar
- h) máx.: Máximo
- i) mg: Miligramos
- j) min: Minuto
- k) t: Tiempo
- l) C_e : Concentración de soluto en el equilibrio
- m) C_o : Concentración inicial del soluto en la solución
- n) C_s : Concentración de sitios
- o) C_f : Concentración final del soluto en la solución
- p) C_t : Concentración de soluto en la solución a un tiempo dado.
- q) pH: Potencial de hidrógeno
- r) s: Segundo

III HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

El adsorbente elaborado a partir de la cáscara de plátano de la variedad bellaco, tiene una eficiencia de remoción de fosfatos superior al 50% en solución acuosa.

3.2 Variables

Tabla 4. Variables dependientes e independientes

| | |
|--------------------------|--|
| Variable dependiente | % Remoción de fosfatos |
| Variables independientes | Temperatura de pirolisis pH de la solución acuosa |

Tabla 5. Matriz de consistencia

| PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN | OBJETIVOS | HIPÓTESIS | VARIABLE E INDICADORES | METODOLOGÍA | POBLACIÓN Y MUESTRA |
|---|---|--|---|---|--|
| La acumulación de residuos generados de industrias platanera. | <p>OBJETIVO GENERAL Utilizar un adsorbente a partir de cáscara de plátano de la variedad bellaco en la adsorción de fosfato acuoso.</p> <p>OBJETIVOS ESPECIFICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Objetivo específico 1 Obtener un adsorbente a partir de cáscara de plátano variedad bellaco procedente de Satipo. • Objetivo específico 2 Caracterizar el adsorbente producido. • Objetivo específico 3 Evaluar la capacidad de adsorción de fosfatos mediante una prueba de lotes. | El adsorbente elaborado a partir de la cáscara de plátano de la variedad bellaco, tiene una eficiencia de remoción de fosfatos superior al 50% en solución acuosa. | <p>VARIABLE % Remoción de fosfato</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tº de pirólisis - pH <p>INDICADORES</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nivel de remoción de fosfato a la concentración usada en los tratamientos - Nivel de temperatura usada en distintos tratamientos - Nivel de pH usado en los tratamientos | <p>Diseño de investigación: Según el objetivo de estudio: es analítico porque pretende establecer relación causa efecto entre el adsorbente de cáscara de plátano con la porcentaje de remoción de fosfato en solución acuosa.</p> <p>Según el control de la variable independiente: el estudio es experimental porque se realizarán y procesarán los resultados.</p> | MUESTRA Cáscara de plátano bellaco. |

Fuente: Elaborado, enero, 2020.

3.3 Operacionalización de variables

Tabla 6. Operación de variables

| VARIABLE | TIPO DE VARIABLE | DEFINICIÓN CONCEPTUAL | DEFINICIÓN OPERACIONAL | INDICADOR | UNIDAD DE MEDIDA | OBSERVACIONES |
|-----------------------|------------------|---|--|---|------------------|---|
| % REMOCIÓN DE FOSFATO | Dependiente | Es la eliminación de fosfato de la solución acuosa | Se puede determinar la cantidad removida del contaminante | Nivel de remoción de fosfato a la concentración usada en los tratamientos | Porcentaje (%) | Fue necesario realizar mínimo la lectura tres veces para obtener un promedio de la remoción |
| T ° DE PIROLISIS | Independiente | Temperatura a la que los precursores se transformaron en materiales adsorbentes | Se determinó la temperatura de pirolisis 500 ° C, 600 ° C y 700 ° C. | Nivel de temperatura usada en distintos tratamientos | ° C | Se realizó en mufla, en recipientes tapados sin el uso de ninguna sustancia protectora |
| pH | Independiente | Concentración de iones hidrógeno en una solución | El experimento de adsorción el pH (4, 7 y 10) de la solución acuosa que contiene fosfato | Nivel de pH usado en los tratamientos | - | El pH de la solución se reguló con NaOH y/o HCl |

Fuente. Elaboración propia, julio, 2018

IV MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio

La presente estudio se desarrolló en el laboratorio de Bromatología en la Facultad de Farmacia y Bioquímica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

4.2 Diseño de investigación

El diseño experimental de la presente investigación se muestra en la figura 4. La cáscara de plátano de la variedad bellaco (precursor), se sometió a carbonización en mufla, a tres temperaturas distintas ($T_1=500\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_2=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_3=700\text{ }^{\circ}\text{C}$) correspondientes a los tratamientos P500, P600 y P700 respectivamente. Luego cada uno de los tres tratamientos fue caracterizado (humedad (%), cenizas (%), pH, densidad aparente, sitios activos, punto de carga cero y rendimiento de obtención). Una vez caracterizados los tres tratamientos, se sometieron a pruebas de adsorción por lotes en soluciones acuosas conteniendo fosfato a diferentes pH (4,0; 7,0 y 10,0).

Con los datos de adsorción se realizó el modelamiento cinético, empleando los modelos pseudo primer orden, pseudo segundo orden y el modelo de difusión intraparticular o también llamado modelo de Weber y Morris.

La capacidad de adsorción de fosfatos fue evaluada en el material elaborado a partir de cáscaras de plátano como es presentada en la tabla 20.

| Adsorbente | | | Adsorción | |
|--------------------|--------------------------|---|----------------------|--|
| Precursor | Temperatura de pirólisis | Caracterización | pH | |
| Cáscara de plátano | T ₁ = 500 °C | Humedad (%) Cenizas (%) pH | pH ₁ = 4 | Adsorción por lotes Capacidad de adsorción de fosfato Porcentaje de remoción de fosfato Modelos cinéticos Pseudo primero Orden Pseudo segundo orden Weber y Morris |
| | | | pH ₂ = 7 | |
| | | | pH ₃ = 10 | |
| | T ₂ = 600°C | Densidad aparente Sitios activos Punto de carga cero Rendimiento | pH ₁ = 4 | |
| | | | pH ₂ = 7 | |
| | | | pH ₃ = 10 | |
| | T ₃ = 700°C | | pH ₁ = 4 | |
| | | | pH ₂ = 7 | |
| | | | pH ₃ = 10 | |

Figura 4. Diseño experimental, elaboración propia, enero, 2019.

4.3 Muestra

Los frutos verdes de plátano, variedad bellaco fueron provenientes del distrito de Pangoa, provincia de Satipo, región Junín. El distrito de Pangoa forma parte de la cuenca del río Ene (margen izquierda) en la micro cuenca del río Sonomoro. Se encuentra situado en la zona de Bosque Húmedo Tropical, entre los 73°52'30" y 74°29'30" de longitud oeste, y 11°27'30" y 12°15'30" de latitud Sur. La precipitación pluvial total es 2000 mm anuales y 24 °C de temperatura promedio anual. La topografía presenta relieves muy marcados que varían desde los 400 m hasta 3800 m de altitud. La base de la economía del distrito de Pangoa, es la agricultura, con condiciones favorables para desarrollar una diversidad de cultivos tropicales. Los plátanos fueron seleccionados al azar, entre los meses de enero y marzo del año 2019.

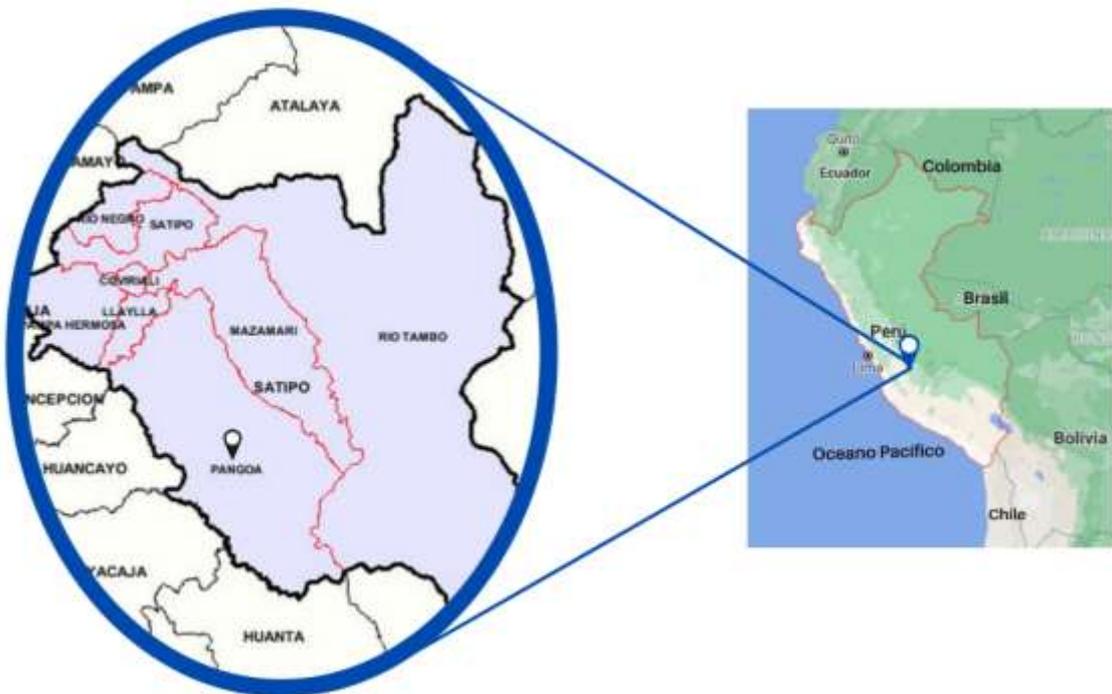


Figura 5. Mapa de ubicación distrito Pangoa, provincia de Satipo, región Junín, Perú.
Fuente. Google maps y http://www.perutoptours.com/index11sa_mapa_satipo.html

4.4 Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de Información

4.5 Métodos

Recolección y transporte:

Los plátanos fueron transportados a temperatura ambiente con índice de madurez verde al laboratorio de bromatología en la facultad de Farmacia y Bioquímica de la Universidad San Marcos.

4.5.1 Preparación del adsorbente

4.5.1.1 Selección y limpieza

Las frutas con cáscara completamente verde fueron seleccionadas, se lavaron con solución de hipoclorito a 100 ppm durante 3 minutos, luego se enjuagaron y se descascararon. Posteriormente, las cáscaras fueron cortadas de forma manual en pequeños trozos de igual tamaño, para realizar una fácil manipulación en las siguientes operaciones.

Las cáscaras se lavaron con agua destilada.

4.5.1.2 Secado y Reducción de tamaño (19)

Las cáscaras se colocaron en bandejas metálicas para secarse a 105 °C por 12 horas. Una vez enfriadas, se empacaron en bolsas de polipropileno para usar en los demás procedimientos.

La cáscara deshidratada se redujo de tamaño en una licuadora (Oster®, Modelo 4655, México) a temperatura ambiente; a máxima velocidad por 8 minutos se realizó siguiendo la metodología de Romero (19).

4.5.1.3 Empaque

El material obtenido luego de la molienda, se empacó en bolsas de polipropileno para su posterior uso en el experimento. Romero (19)

4.5.2 Preparación de adsorbente por pirólisis

La muestra seca fue colocada en crisoles y sometidas a distintos tratamientos térmicos a temperatura a 500 °C, 600°C y 700°C por el lapso de una hora, en

mufla (RELES 18x18, Perú). Cada uno de los tratamientos (elaborados a diferentes temperaturas de pirólisis) fue codificado como P500; P600 y P700 respectivamente.

4.5.2.1 Tamizado:

Se realizó el tamizado del adsorbente de plátano con la malla marca TEST SIEVE SER. N°: 909301 a 0,600 mm.

4.5.2.2 Empaque en bolsa:

Cada tratamiento se empacó por separado en bolsas de polipropileno para su posterior uso en el experimento.

4.5.3 Preparación de la solución de fosfato (37)

Se elaboró una solución estándar de fosfato de 50 mg/L, empleando agua desionizada no estéril (Quimpat Representaciones SAC, Perú) y 219,4 mg de dihidrogenofosfato de potasio (KH_2PO_4 Merck KGaA, Alemania), previamente secado a 110 °C durante una hora. Se realizó siguiendo la metodología de Vélez FJO (38).

4.6 Caracterización del adsorbente

4.6.1 Humedad:

Se realizó la determinación del porcentaje humedad siguiendo la metodología de la ASTM D2867 – 17.

4.6.2 Cenizas:

Se realizó la determinación el contenido de cenizas se determinó según la norma ASTM D 1762 (Norma ASTM International, 2011).

4.6.3 pH

Se realizó la determinación del pH de adsorbente siguiendo la metodología ASTM D3838 – 05 (2017)

4.6.4 Determinación de sitios activos - método Boehm

Según Boehm (38) El método consistió en que los adsorbentes son retro-valorados usando cuatro bases de diferente fuerza como son el hidróxido de sodio (NaOH), bicarbonato de sodio (NaHCO₃), carbonato de sodio (NaCO₃) y etóxido de sodio (NaOC₂H₅) que permitieron realizar la evaluación de los tipos de grupos oxigenados superficiales presentes.

Según Romero (39) Se realizó la mezcla de 50 mL de cada base 0,1 M con 0,2 g de cada tratamiento de adsorbente por triplicado. La mezcla se mantuvo hermetizada por 5 días con agitación ocasional a temperatura ambiente. Posteriormente, el líquido filtrado fue valorado la cual se hizo por triplicado para la mezcla se tomó una alícuota de 10 mL y se valoró con HCl 0,1 M. La neutralización de los grupos funcionales por el NaOH se identifica como fenólicos. Los grupos carboxílicos y anhídridos neutralizan juntamente al NaHCO₃. Los grupos que no son neutralizados por el NaHCO₃ pero si por el Na₂CO₃ se identificaron como lactónicos y los grupos que se identificaron como carbonilos son neutralizados por el NaOC₂H₅. Este método fue usado para la elección de sitios activos en el adsorbente.

El número de sitios activos fue calculado utilizando la fórmula:

$$C_s = \frac{(C_o - C_f)}{m} \times V \quad (1)$$

Donde C_s , es la concentración de sitios (número de moles. g⁻¹); C_o , es la concentración al principio de la solución; C_f , es la concentración resultante después del contacto con el adsorbente; V , es el volumen de la solución que tuvo contacto con el adsorbente y m , es la masa del adsorbente Boehm (38)

Los adsorbentes poseen la carga superficial que se hallan en función del tipo de iones presentes, la naturaleza del sólido, las características de su superficie y el pH en solución. La carga superficial es distribuida con respecto al pH de la solución que ayuda a explicar los mecanismos de adsorción y su adsorción Boehm (38)

4.6.5 Punto de carga cero (pzc)

Según Romero (40) Se realizó la determinación de punto de carga cero, realizando la preparación de una mezcla de NaCl a una concentración de 0,01 M. Se colocó en un matraz 50 mL de la solución formulada y se procedió a ajustar el pH usando HCl (0,1 M) o NaOH (0,1 M) según se necesitó. Además, se añadió a la solución 0,15 g del adsorbente y se dejó en agitación ocasional por 48 horas a temperatura ambiente.

Las soluciones se ajustaron a pH 2, 4, 6, 8, 10 y 12.

El pH pzc (punto de carga cero) se precisó en el punto donde la curva pH final vs pH inicial pasa por la línea pH inicial = pH final.

4.6.6 Rendimiento:

Reátegui(15) Determinó el rendimiento siguiendo la metodología recomendada donde se pesaron 9 crisoles debido a que son 3 tratamientos y se realizó por triplicado. Se les agregó 20 g. de adsorbente a cada uno donde se consideró el peso del crisol. Se pesaron los crisoles después de proceso de pirolisis.

La siguiente fórmula se usó para establecer el rendimiento:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{C}{B} \times 100 \quad (2)$$

El peso de la materia prima con el crisol antes de ingresar a la mufla (g) es B; el peso del adsorbente con el crisol después de terminar el proceso de carbonización (g) es C. Reátegui (18)

4.7 Adsorción de fosfato

4.7.1 Determinación de fosfato en solución

En la determinación de fosfato en solución acuosa se utilizó el método del cloruro estañoso. Se determinó la curva patrón para la formulación de los estándares de concentración, siguiendo la metodología de Osorio V. y Sandino V. (41)

4.7.2 Técnicas de adsorción por lotes.

La adsorción por lotes se realizó con los tres tratamientos de absorbentes (P500, P600, P700) y solución de fosfato con adición de azida de sodio como conservante y cloruro de calcio, como material semilla para la recuperación de fosfato, según la recomendación de Marshall (42).

Se realizaron tres pruebas de adsorción por lotes con los tres tratamientos distintos.

Los ensayos que se realizaron por triplicado. En matraces Erlen–Meyer de 250 mL se colocó la solución acuosa preparada con una concentración de 0,3 mg/L de una concentración inicial de 10 mg/L de fosfato, calibrados a pH de 4,0; 7,0 y 10,0. Se agregó el material adsorbente en una dosis de fue 1 g/L. y se dejó reposando con agitación ocasional durante 168 horas a temperatura ambiente (23 °C en promedio). Una vez transcurrido el tiempo se procedió a filtrar y determinar el contenido de fosfato en la solución, por el método de cloruro estañoso, a UV-VIS a 690 nm.

4.7.3 Modelos cinéticos utilizados para adsorción de fosfato.

Las diversas investigaciones hacen mención de modelos que describen el proceso de adsorción, algunos de ellos presentan restricciones a la hora de su utilización debido a los diferentes factores y condiciones experimentales. Se cita tres modelos matemáticos para el ajuste de los resultados experimentales y a los parámetros cinéticos que califican cada modelo.

4.7.4 Modelo de Pseudo Primer Orden Reversible (18)

El modelo propio de la cinética de primer orden reversible que se basa en la hipótesis de que a cada ión metálico se le proporciona un sitio de adsorción del adsorbente, lo cual es determinado en la velocidad de reacción (18)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (3)$$

La cantidad adsorbida en un tiempo t es q_t (mmol/g).

La porción adsorbida en el equilibrio es q_e (mmol/g) y la constante cinética de primer orden es k_1 (min⁻¹). (43)

Integrando la ecuación anterior y teniendo condiciones de contorno a $t=0$, $q_t=0$ y a $t=t$ $q_t=q_t$:

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (4)$$

4.7.5 Modelo de Pseudo Segundo Orden (18)

Romero B. (43) Metodología seguida de Ho y McKay realizaron este modelo y lo dieron a conocer en 1999. En él se tiene como hipótesis que el adsorbato se adsorbe en dos sitios activos de la materia. A partir de este planteamiento diversos estudios han informado un mejor alineamiento de sus datos experimentales a este modelo, con coeficientes de correlación mayores en comparación de otros modelos. Donde, el modelamiento matemático de velocidad de la cinética de adsorción se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (5)$$

La ecuación anterior fue integrada y se mantuvo constantes las condiciones señaladas para el modelo anterior.

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (6)$$

k_2 y $h=k_2 \cdot q_e^2$ es la constante cinética de Pseudo-segundo orden (g/mmol.min) teniendo a h (mmol/g.min) como la velocidad inicial de adsorción (43)

4.7.5.1 Modelo de Difusión Intraparticular (18)

Esta metodología describe el mecanismo basado en el movimiento del soluto a través de los poros del adsorbente, lo conocido como la propagación en el sólido, lo que precisa que el adsorbente posee una estructura porosa homogénea (43)

Weber y Morris (1963) resolvieron que, la concentración del soluto es directamente proporcional a la velocidad inicial, en este proceso controlado. Este se califica por la dependencia entre la adsorción específica y la raíz cuadrada del tiempo, teniendo la velocidad de difusión intraparticular como la pendiente.

Donde se determina la difusión intraparticular en la ecuación por:

$$q_t = k_{WYM} \cdot t^{0.5} + C \quad (7)$$

Donde la constante de velocidad de difusión intraparticular es k_{WYM} (mmol.g-1.min-1/2). Esta fórmula ha sido utilizada por diversos investigadores de varios campos, para concluir si el proceso de la difusión intraparticular es la fase controlante de la dinámica de adsorción de iones metálicos (43).

Validación del modelo matemático

Las predicciones, para un determinado grupo de condiciones se comparan con los datos experimentales. Se determinó el coeficiente de determinación (R^2).

$$R^2 = \frac{\sum(q_{prom} - q_{cal})^2}{\sum(q_{calc} - q_{prom})^2 + \sum(q_{cal} - q_{exp})^2} \quad (8)$$

4.8 Análisis estadístico

La prueba de adsorción de fosfatos por lotes en solución acuosa, adapto un diseño totalmente al azar (DCA) con tres repeticiones, los factores evaluados fueron pH con tres niveles (4,0; 7,0 y 10,0) y temperatura de pirólisis (500°C, 600°C y 700°C).

El modelo estadístico fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde μ es efecto de la media general,

τ_i representa el impacto de la temperatura de pirólisis, $i=1,\dots,l$.

β_j representa el impacto del pH de la solución 2 j , $j=1,\dots,J$.

γ_{ij} es la interacción de niveles ij de los factores temperatura de pirólisis y pH de la solución en la adsorción de fosfato por lotes.

ε_{ijk} es el error experimental obtenido al aplicar el nivel i del factor temperatura de pirólisis y el nivel j del factor pH de la solución en k -ésima unidad experimental.

Análisis de los datos

Los datos fueron analizados estadísticamente a través de un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para comparar las medias de los tratamientos. Se empleó el software Minitab versión 18 (Pennsylvania State University, EE. UU), donde se consideraron significativos los tratamientos con $p < 0,05$.

V RESULTADOS

5.1 Elaboración del adsorbente

5.1.1 Rendimiento de obtención del adsorbente a tres temperaturas de pirólisis

En la tabla 7 se muestra el % de rendimiento en los distintos tratamientos de material adsorbente. (Tres repeticiones \pm error estándar o desviación estándar)

Tabla 7. Rendimiento de las muestras de adsorbentes.

| Tratamiento | Rendimiento |
|-------------|-------------------------------|
| P700 | 14,58 \pm 0,82 ^a |
| P600 | 14,86 \pm 0,16 ^a |
| P500 | 14,93 \pm 0,12 ^a |

El nivel de significancia de 0,05, la letra “a” significa que no hay diferencia significativa en los 3 tratamientos.

Elaboración propia, marzo, 2019

El rendimiento de obtención de adsorbente está entre 14,58 % (P700) y 14,93 % (P500) en los tres tratamientos estudiados. Para obtener el adsorbente, el precursor (cáscara de plátano), se sometió a una reducción de tamaño y altas temperaturas, lo cual produjo materiales con mayor superficie de contacto con el adsorbato, lo cual fue favorable para la adsorción. No existió diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos.

5.1.2 Características fisicoquímicas

En la Tabla 8 se presenta los resultados de las características de calidad de los adsorbentes, asimismo se muestran los valores estándar según la ASTM como referencia.

Tabla 8. Caracterización del material adsorbente

| Tratamientos | Parámetro | | | |
|-------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| | Humedad (%) | Cenizas (%) | pH | Densidad aparente (g/cm ³) |
| Criterios de ASTM | 2,0 - 15,0 | 3,0 – 15 | 2,0 – 11 | 0,26 - 0,65 |
| P500 | 11,92±0,01 ^a | 9,35±0,08 ^c | 7,06 ± 0,05 ^a | 0,45±0,00 ^a |
| P600 | 12,49±0,01 ^a | 8,79±0,07 ^a | 8,16 ± 0,06 ^b | 0,49±0,00 ^b |
| P700 | 11,43±0,06 ^a | 9,19±0,00 ^b | 9,23 ± 0,03 ^c | 0,53±0,00 ^c |

Los valores medios en la misma columna con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$) (Medias de tres repeticiones ± error estándar)

Fuente: Elaboración propia, enero, 2019

5.1.3 Sitios activos

Tabla 9. Determinación de sitios activos mediante el Método Boehm (tres repeticiones estándar ± error estándar o desviación estándar).

| Tratamiento | Sitios activos básicos (mmol . g ⁻¹) | Sitios activos ácidos (mmol g ⁻¹) |
|-------------|--|---|
| P700 | 8,74 ± 0,01 ^c | 36,5 ± 0,01 ^b |
| P600 | 6,34 ± 0,16 ^a | 32,19 ± 0,02 ^a |
| P500 | 7,25 ± 0,25 ^b | 42,79 ± 0,01 ^c |

Los valores medios en la misma columna con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$) (Medias de tres repeticiones ± error estándar)

Fuente: Elaboración propia, marzo, 2019

5.1.4 Punto de carga cero

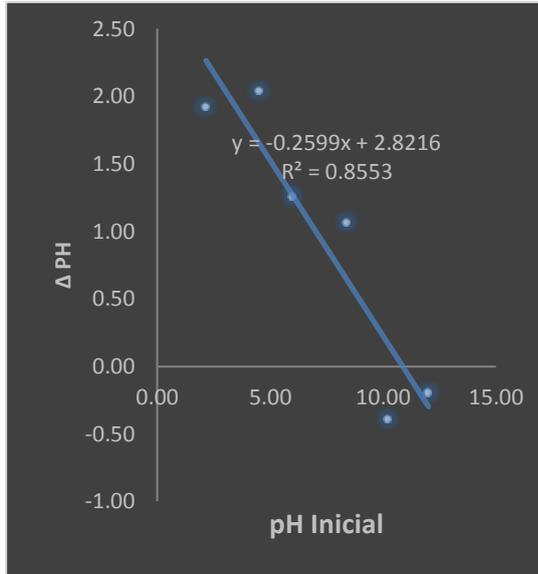


Figura 6. Punto de carga cero de P700

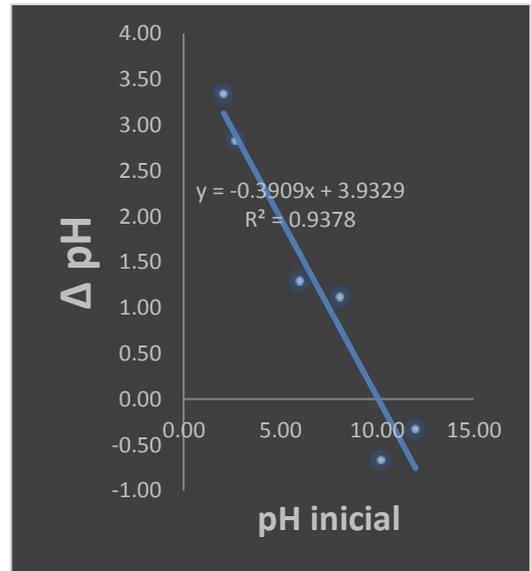


Figura 7. Punto de carga cero de P600

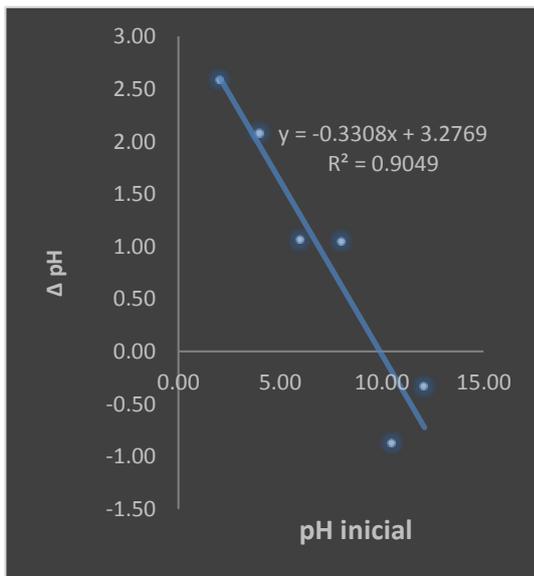


Figura 8. Punto de carga cero de P500

Tabla 10. Cuadro resumen de Punto de Carga a tres T°

| Tratamiento | pH pzc |
|-------------|------------------|
| P700 | 10.86 ± 0.02 |
| P600 | 10.06 ± 0.03 |
| P500 | 9.91 ± 0.02 |

Fuente. Elaboración propia, agosto, 2019

5.2 ADSORCIÓN

5.2.1 Curva de calibración de fosfatos

En la figura 9. Se presenta la curva de calibración de fosfato que se usó para precisar la concentración de fosfato en la solución acuosa.

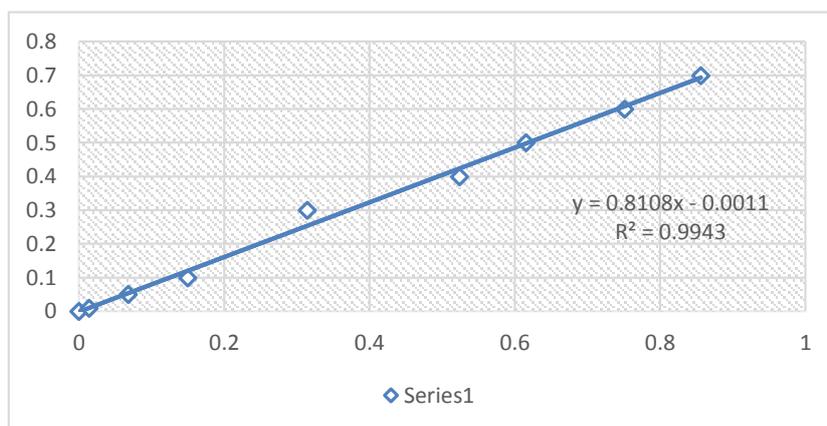


Figura 9. Curva de calibración para fosfatos

5.2.1.1 Modelos cinéticos de adsorción

Tabla 11. Parámetros de modelos cinéticos aplicados a pH 10

| TRATAMIENTO | | pH 10 - T° 700 | | pH 10 - T° 600 | | pH 10 - T° 500 | |
|-------------------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Modelo cinético | Parámetros | Valor | R ² | Valor | R ² | Valor | R ² |
| Pseudo primer orden | k _f (min ⁻¹) | 0,053 | 0,7974 | 0,076 | 0,548643 | 0,0556 | 0,7299 |
| | q _e (mg g ⁻¹) | 21 | | 11 | | 15 | |
| Pseudo-segundo orden | k _s (g mg ⁻¹ min ⁻¹) | 0,002 | 0,6418 | 0,0015 | 0,824 | 0,0015 | 0,6996 |
| | q _e (mg g ⁻¹) | 0,13 | | 0,11 | | 0,11 | |
| Difusión intrapartícula | h _o (mg g ⁻¹ min ⁻¹) | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | |
| | k _{id} (mg g ⁻¹ min ^{-0.5}) | 0 | 0,9436 | 0 | 0,85416 | 0 | 0,8568 |

Fuente: Elaboración propia, enero, 2020

La Tabla 11, presenta los valores de los parámetros de cada uno de los modelos cinéticos empleados para explicar la adsorción de fosfato a pH 10. Los valores de R², más cercanos a 1, indican un mejor ajuste de los datos.

El modelo difusión intraparticular que tiene R² más cercano al uno es uno de los modelos que obedeció el proceso de adsorción de la solución de fosfato, otro modelo que puede ser considerado es el modelo de pseudo segundo orden la cual también muestra la cercanía del R² en sus resultados

En los siguientes gráficos se puede observar el comportamiento que obedeció mediante las curvas mostradas en los distintos tratamientos de temperatura y pH.

5.2.1.1.1 Curvas del modelamiento cinético

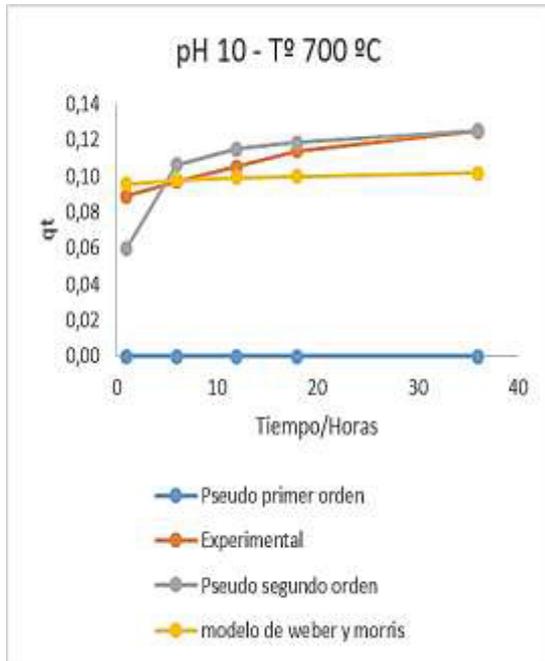


Figura 10. Modelo cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos

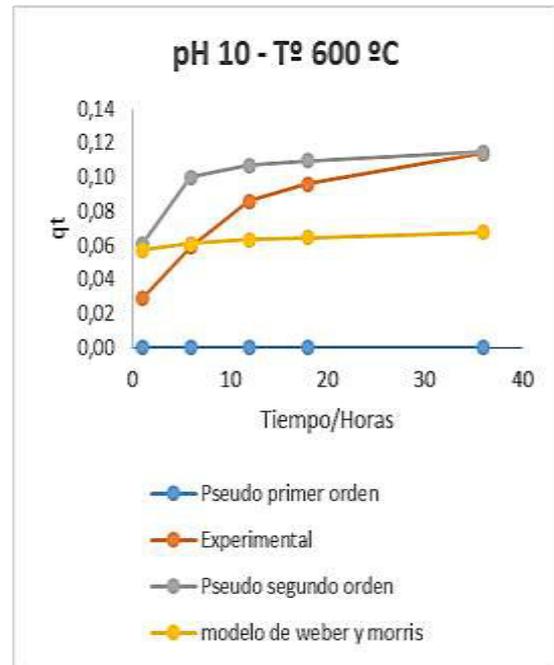


Figura 11. Modelo cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos

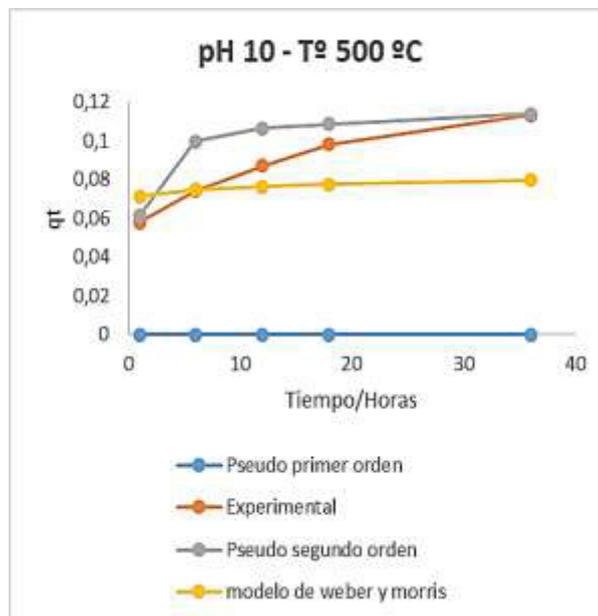


Figura 12. Modelo cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos.

Tabla 12. Parámetros de modelos cinéticos aplicados a pH 7

| TRATAMIENTO | | pH 7 - T° 700 | | pH 7 - T° 600 | | pH 7 - T° 500 | |
|-------------------------|---|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Modelo cinético | Parámetros | Valor | R ² | Valor | R ² | Valor | R ² |
| Pseudo primer orden | k _f (min ⁻¹) | 0,083 | 0,60355 | 0,062 | 0,6592 | 0,0748 | 0,5440582 |
| | q _e (mg g ⁻¹) | 11 | | 10 | | 16 | |
| Pseudo-segundo orden | k _s (g mg ⁻¹ min ⁻¹) | 0,00 | 0,878 | 3,00E-06 | 0,939099 | 6,00E-06 | 0,798287 |
| | q _e (mg g ⁻¹) | 0,09 | | 0,09 | | 0,07 | |
| Difusión intrapartícula | h _o (mg g ⁻¹ min ⁻¹) | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | |
| | k _{id} (mg g ⁻¹ min ^{-0,5}) | 0 | 0,87658 | 0 | 0,90036 | 0 | 0,8568 |

Fuente: Elaboración propia, enero, 2020

La Tabla 12. Muestra los adsorbentes evaluados a temperaturas de 500, 600 y 700 °C y sometido a tratamiento de pH 7 el valor de R², la cual indica que cuando se encuentra más cercano al 1, es el modelo que obedeció el proceso de adsorción en la solución del fosfato.

El modelo difusión intraparticular que tiene R² más cercano al uno es uno de los modelos que obedeció el proceso de adsorción de la solución de fosfato, otro modelo que puede ser considerado es el modelo de pseudo segundo orden la cual también muestra la cercanía del R² en sus resultados

En los siguientes gráficos se puede observar el comportamiento que obedeció mediante las curvas mostradas en los distintos tratamientos de temperatura y pH.

Curvas del modelamiento cinético

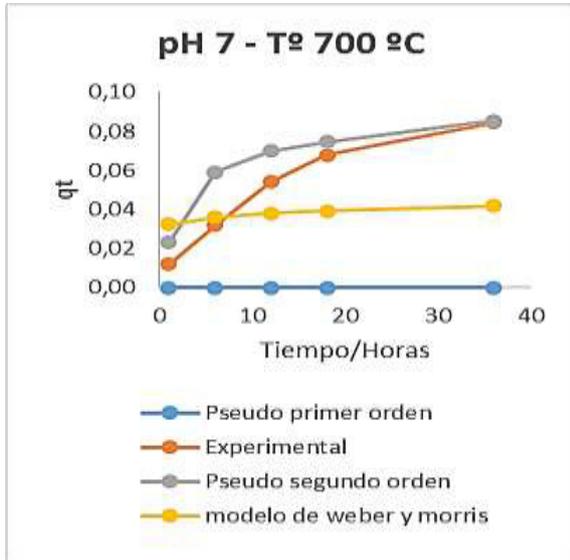


Figura 13. Modelo cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos

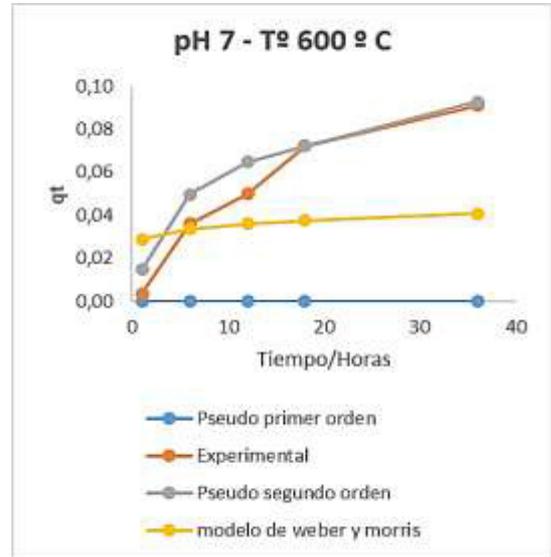


Figura 14. Modelo cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos

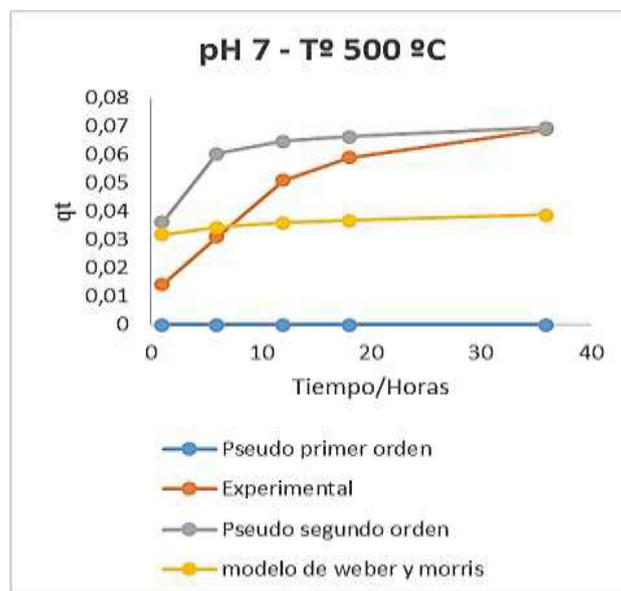


Figura 15. Modelo cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos

Tabla 13. Parámetros de modelos cinéticos aplicados a pH 4

| TRATAMIENTO | | pH 4 - T° 700 | | pH 4 - T° 600 | | pH 4 - T° 500 | |
|-------------------------|---|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Modelo cinético | Parámetros | Valor | R ² | Valor | R ² | Valor | R ² |
| Pseudo primer orden | k _f (min ⁻¹) | 0,044 | 0,7144 | 0,079 | 0,06259 | 0,0656 | 0,6965 |
| | q _e (mg g ⁻¹) | 1 | | 1 | | 1 | |
| Pseudo-segundo orden | ks (g mg ⁻¹ min ⁻¹) | 0,0065 | 0,6905 | 1,37088 | 0,707677 | 1,7633 | 0,6424 |
| | q _e (mg g ⁻¹) | 4 | | 3 | | 3 | |
| Difusión intrapartícula | h _o (mg g ⁻¹ min ⁻¹) | 0,09 | | 11 | | 20 | |
| | k _{id} (mg g ⁻¹ min ^{-0.5}) | 0,0693 | 0,9373 | 0,0768 | 0,86139 | 0 | 0,9052 |

Fuente: Elaboración propia, enero, 2020

La Tabla 13. Muestra los adsorbentes evaluados a temperaturas de 500, 600 y 700 °C y sometido a tratamiento de pH 4 el valor de R², la cual indica que cuando se encuentra más cercano al 1, es el modelo que obedeció el proceso de adsorción en la solución del fosfato.

El modelo difusión intraparticular que tiene R² más cercano al uno es uno de los modelos que obedeció el proceso de adsorción de la solución de fosfato, otro modelo que puede ser considerado es el modelo de pseudo segundo orden la cual también muestra la cercanía del R² en sus resultados, así mismo se observa un mejor ajuste de este modelo según las curvas mostradas.

En los siguientes gráficos se puede observar el comportamiento que obedeció mediante las curvas mostradas en los distintos tratamientos de temperatura y pH.

Curvas del modelamiento cinético

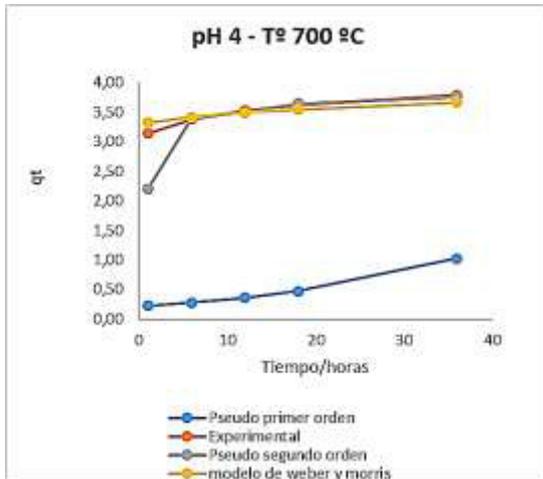


Figura 16. Modelo cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos

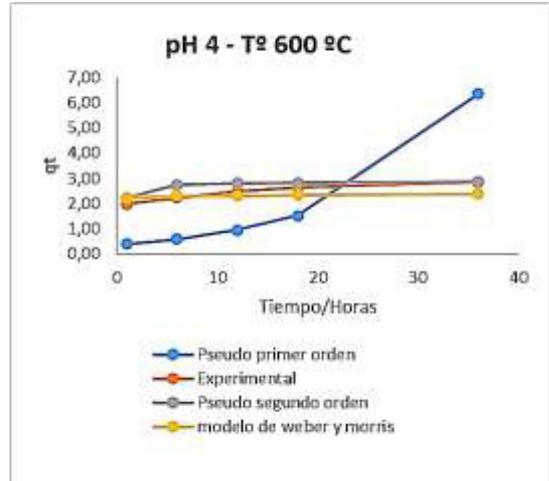


Figura 17. Modelo cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos

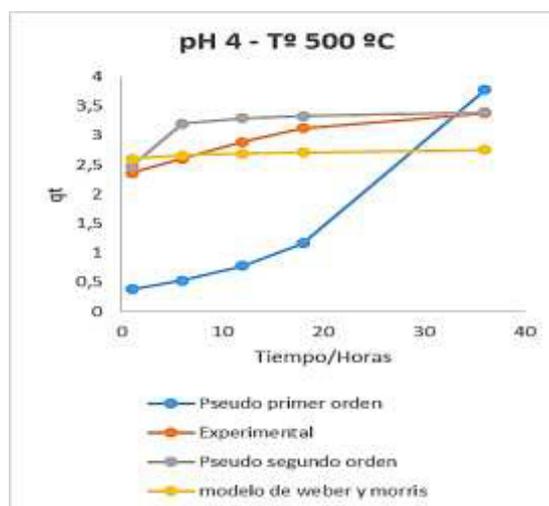


Figura 18. Modelo cinético de adsorción de fosfato en los tres tratamientos.

5.2.2 Remoción

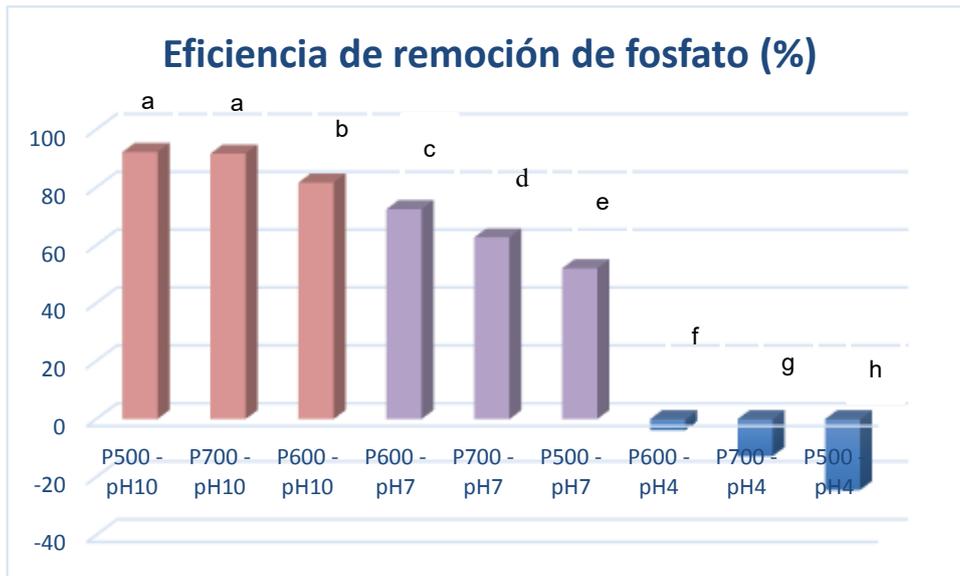


Figura 19. Porcentaje de remoción de fosfato en solución acuosa de los tres tratamientos a diferentes pH.

La Figura 19. Muestra el porcentaje de remoción de los tres adsorbentes a diferentes condiciones de pH. La mayor remoción de fosfato ($p < 0,05$) ocurre en las siguientes condiciones: P500 a pH10 y P700 a pH10.

Las letras que se encuentran en las barras indican la diferencia significativa que existe entre ellas. Los tratamientos P500 y P700 a pH10 tienen la misma letra "a" lo que indica que no son significativamente diferente según los análisis estadísticos.

5.2.3 Capacidad de adsorción

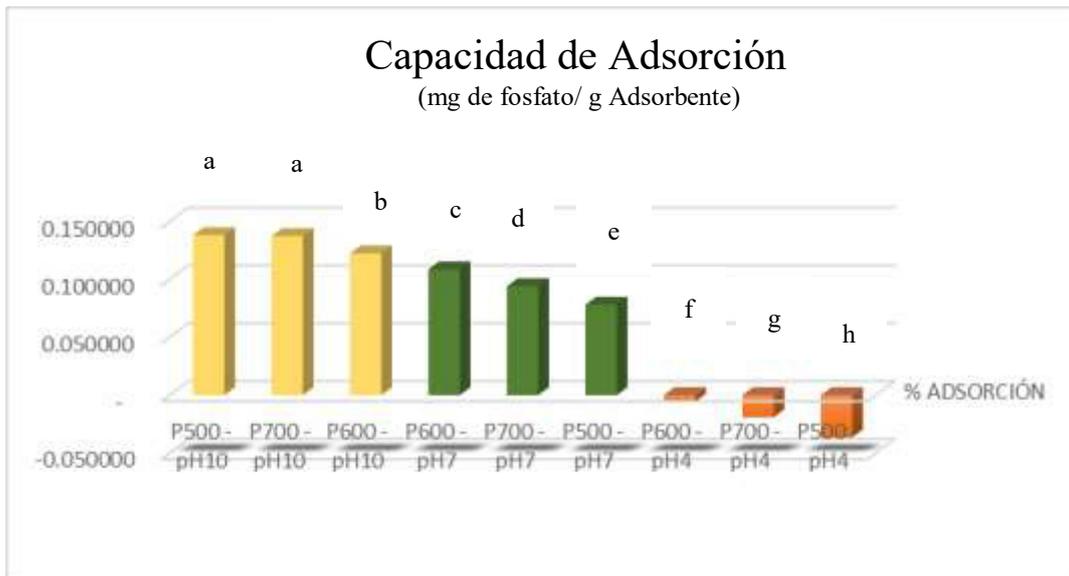


Figura 20. Capacidad de adsorción fosfato en solución acuosa de los tres tratamientos a diferentes pH.

En la figura 20. Presenta la capacidad de adsorción de los tres adsorbentes a diferentes condiciones de pH. La capacidad de adsorción es significativamente mayor ($p < 0,05$) en las siguientes condiciones: P500 a pH10 y P700 a pH10. Se observa liberación de fosfato a pH 4 en los adsorbentes elaborados a tres temperaturas distintas.

Las letras que se encuentran en las barras indican la diferencia significativa que existe entre ellas mientras en las muestras P500, P700 del pH10 tienen la misma letra "a" lo que indica que no son significativamente diferente según los análisis estadísticos.

VI DISCUSIÓN

Rendimiento del adsorbente

Los rendimientos de los adsorbentes P500, P600, P700 fueron 14,92 %, 14,86 %, 14,57 % respectivamente (Tabla 11). Al tratarse de residuos, es deseable la minimización de los mismos. Por lo tanto, también son deseable menores rendimientos de obtención, para minimizar la cantidad de residuos agroindustriales. Navarrete y Vélez (46%), obtuvieron mayor rendimiento al carbonizar el precursor (cáscara de plátano) activado a 500 °C (44). En el presente trabajo, no se realizó la activación química. El precursor del adsorbente es un material compuesto de oxígeno, hidrógeno y su principal componente el carbono. Al ser expuesto a temperaturas altas, libera las componentes volátiles presentes en el interior, incrementado la superficie interna. Siendo su estructura porosa su principal característica (45). El análisis de varianza, reveló que los tres tratamientos no son significativamente diferentes en cuanto al rendimiento de obtención ($p > 0,05$).

Metodología de obtención de los adsorbentes

Ruiz (46), obtuvo adsorbentes, sometiendo el precursor a una fase de carbonización considerando temperatura máxima a 600°C, haciendo uso de crisoles con tapa por un lapso de 2 horas. Las condiciones de temperatura usadas durante la pirólisis fueron: 400 °C (30 min), 500 °C (30 min) y 600 °C (60 min). En el presente estudio, los experimentos de pirólisis, se realizaron de manera similar a la mencionada por Ruiz (39) y Bai et al. (47), introduciendo aproximadamente 10 g de muestra seca en crisoles de porcelana que se cubrieron con tapas, se llevó a un horno de mufla eléctrico, sin protección de nitrógeno, y se sometió al proceso de pirólisis. La ventaja de este método es su fácil operación, no usar solventes contaminantes, que pudieran impactar al ambiente. Esto nos permitió obtener un producto respetuoso con el ambiente, sostenible e implementando la economía circular.

Caracterización del adsorbente

La densidad aparente de los adsorbentes P700, P600, P500, fueron 0,53 g/mL; 0,49 g/mL y 0,53 g/mL, respectivamente, mostrado en la Tabla 8. Estos valores son hallados dentro los parámetros considerados por la AWWA (48) para carbón activado granular. Asimismo, los adsorbentes elaborados presentan valores de densidad aparente similares al adsorbente de concha de coco comercial marca MICRO (0,55 – 0,58 g/mL), también se encuentran dentro de los valores sugeridos por la ASTM D2854 (15). La importancia de la densidad aparente, es por su relación con la porosidad del adsorbente que a su vez tiene relación con la capacidad de adsorción del adsorbente. El análisis de varianza, reveló que los tres tratamientos no presentaron diferencias significativas entre los valores de densidad aparente ($p > 0,05$).

La humedad de los adsorbentes P500, P600, P700, fue de 11,92 %; 12,49 % y 11,43 % respectivamente (Tabla 8). Estos valores son hallados dentro de lo sugerido por la ASTM D – 2867 (2 a 15 % de humedad), para calificar como un carbón activado de calidad. Es decir, los adsorbentes que tengan valores de humedad fuera de este rango, es indicativo de la mala calidad del adsorbente. Navarrete et al. (42), mencionan que, mientras más contenido de humedad el adsorbente adquiere mayor peso. Navarrete et al. (44), obtuvieron adsorbente a partir de cáscara de plátano, cuyo resultado de humedad (12,63 %), es muy similar a los valores obtenidos en este estudio para los adsorbentes obtenidos a partir de plátano de la variedad bellaco. Los porcentajes de humedad y ceniza de elevados, suelen disminuir la capacidad de adsorción del adsorbente; por lo que, se recomienda la selección de los precursores considerando que el contenido de humedad y ceniza sean bajos (49). El análisis de varianza, reveló que los tres niveles no presentaron diferencias significativas respecto al contenido de humedad ($p > 0,05$).

El contenido de cenizas de los adsorbentes P500, P600, P700, fue 9,35 %; 8,79 % y 9,19 % respectivamente (Tabla 8). Estos valores son hallados dentro del rango recomendado por ASTM D – 2866, para carbones activados (3 al 15 %). Navarrete et al. (44), reportaron un mayor valor de cenizas en el carbón activado que obtuvieron partiendo de la cáscara de plátano (16,18 %); esto puede explicarse, por un mayor contenido de ceniza en el precursor, que pudo ser más alto que el que se utilizó en el

presente estudio. Cabe mencionar ellos obtuvieron carbón activado, cuya calidad fue disminuida por el alto contenido de cenizas. En el presente estudio, los tres adsorbentes obtenidos, tuvieron contenido de cenizas dentro del rango reportado por la ASTM D – 2866, lo cual los califica como adsorbentes de buena calidad. El análisis de varianza, reveló que los tres tratamientos presentaron diferencias significativas en el contenido de cenizas ($p < 0,05$).

El método de prueba estándar para pH del carbón activado establece el rango del extracto acuoso entre 2 a 11 (ASTM D 3838). En la Tabla 8, se presenta los valores de pH de los adsorbentes elaborados, teniendo valores de pH adecuados, a los parámetros de calidad de carbón activado. El pH de un adsorbente es de acuerdo a los grupos funcionales que se encuentran en la superficie del mismo que son constituidos por la reacción que se da entre el agente activante y el precursor (materia prima).

Navarrete et al (44) obtuvieron a partir de cáscara de plátano el carbón activado con valor de pH de 3,5. Ellos sometieron al precursor a una activación química, con ácido fosfórico, por ello, el producto que obtuvieron tenía fosfatos que al entrar en contacto con el agua se convirtieron en ácidos y redujo el pH.

Según Yuan (50), el pH aumenta con la temperatura de pirólisis. Ellos obtuvieron incrementos de pH de 6,8 a 10,2 cuando evaluaron los adsorbentes obtenidos a carbonización a temperaturas de pirólisis de 400 °C a 700 °C respectivamente. La creciente formación de minerales en forma de carbonatos alcalinos son los principales contribuyentes al aumento de pH en el adsorbente, cuando se someten a mayores temperaturas de carbonización. Esto explica los resultados alcanzados en el presente trabajo de investigación, en el que valor del pH de P500 fue 7,06 y P700 fue 9,23, los cuales fueron sometidos a temperaturas de carbonización en mufla a 500 °C y 700 °C respectivamente (Tabla 8). El análisis de varianza, reveló que los tres tratamientos presentaron diferencias significativas en el pH ($p < 0,05$) en la presente investigación.

El conocimiento del valor de pH de un adsorbente es importante, pues, el pH permite determinar con que elemento será más eficiente su adsorción. En diversos estudios se ha demostrado que el pH de un adsorbente facilita la adsorción de la sustancia de

acuerdo a la polaridad, por lo que un pH ácido facilita la adsorción de metales pesados y la adsorción de moléculas orgánicas y aniones en un pH básico es facilitada. Fernández (51). El mecanismo de adsorción tiene una influencia muy importante que es el pH. La superficie del adsorbente a un pH bajo se convierte en grupos protonados cuando está cargado positivamente con grupos amino y carboxilo (52). Debido a esto, en concordancia a los resultados obtenidos se pudo especular que la cáscara de plátano como precursor del adsorbente será adecuada para la adsorción de fosfatos.

Punto de carga cero

Según los resultados obtenidos por Delgadillo en carbones de pepas de níspero (53), el punto de carga cero alcanzó el valor de 7,2. Este valor fue menor, en comparación con los resultados alcanzados en el presente trabajo de investigación del adsorbente a partir de cáscara de plátano (Tabla 10).

Según los resultados obtenidos por Valdés (54) del punto de carga cero del adsorbente Filtrasorb® 400 (carbón activado comercial) usado para descontaminación de aguas, tuvo como resultado de pzc > 8. Este valor fue similar a los resultados obtenidos con los adsorbentes a partir de cáscara de plátano mostrado en la tabla 9.

Sitios activos

Valdés(54), obtuvo valores de los sitios activos básicos (570 Meq/g) y sitios activos ácidos (234 Meq/g) en el adsorbente comercial Filtrasorb® 400. En los resultados alcanzados en el presente trabajo de investigación en los adsorbentes P500, P600 y P700 mostrados en la tabla 8, se observa que los sitios activos básicos se encuentran en menor proporción que los sitios activos ácidos, lo cual indicó que el adsorbente sería más eficaz para la adsorción de cationes, y no sería eficaz para la adsorción de fosfatos. En pruebas preliminares, los adsorbentes no fueron efectivos para adsorber fosfatos. Por ello, se siguió la recomendación de Zhan et al.(55), y se procedió agregar cloruro de calcio, a la solución que contenía fosfatos, para inducir la adsorción de fosfatos.

Presencia de iones calcio

La mayor adsorción de fosfato inducida por el CaCl_2 podría atribuirse al aumento de la cantidad de Ca_2^+ liberada por el adsorbente. Los autores (Zhan et al), (55) (5) sugieren que el Ca_2^+ intercambiable en el adsorbente tiene un papel vital en la adsorción de fosfato, y su liberación mejora la adsorción de fosfato.

El mecanismo de adsorción de fosfato en el adsorbente puede darse por el intercambio de grupos hidroxilos superficiales con iones de fosfato y la formación de grupos de coordinación de esfera interna de fosfato, y la mejora de la adsorción de fosfato en el material adsorbente por la coexistencia de Ca_2^+ podría atribuirse a la formación de compuestos ternarios con puente de fosfato en la superficie del adsorbente (Zhan et al.)(55).

La metodología de adsorción fue eficiente, y al tratarse de un residuo de las industrias alimentarias, es factible que este proceso sea sostenible en el tiempo, dado la gran cantidad del precursor el cual no tiene valor económico. La industria de productora de chifles, ha crecido a lo largo de los años, los volúmenes de venta se han incrementado. La mayor cantidad de exportación de chifles, conlleva a una mayor cantidad de generación residuos, los cuales, si no son tratados o usados como materia prima para otros productos, impactarán a los diferentes entornos ambientales (agua, suelo, aire). A partir de los datos de exportación de chifles, se estimó la gran cantidad de cáscara disponible, lo cual podría ser útil para la generación de una nueva línea de producción, como es el adsorbente a partir de cáscara de plátano. En la Tabla 1 se muestra un estimado de cantidades de las proyecciones de generación de residuos y la cantidad de adsorbentes que podría generarse a partir de esos residuos. Si tenemos en cuenta, que el mercado de chifles, provee este producto al mercado nacional e internacional, es posible que los valores de generación de estos residuos sean mayores.

Prueba de adsorción por lotes

Moreno M. elaboró adsorbentes a partir de borra de café y de exosqueleto de camarón (56), reportando que la adsorción de fosfatos por el adsorbente elaborado a partir de la borra de café, se vio favorecida a pH 2,0, removiendo el 69,09 % de fosfatos en solución. Asimismo, la remoción de fosfato fue inversamente proporcional al pH. En el

caso del adsorbente elaborado a partir del exoesqueleto de camarón, mencionó que el porcentaje de adsorción de fosfato, aumentó inicialmente a la solución valores de pH 2,0-6,0, removiendo el 79,46 % de fosfato, pero a mayores valores de pH, disminuyó la remoción de fosfato hasta un 61,97 %.

Según Marshall (42) El adsorbente tiene una capacidad de adsorción que disminuye con el incremento de la temperatura de pirólisis. Las capacidades de adsorción de fosfato fueron de 37,5, 32,0, 25,9 y 16,9 mg. g⁻¹ de biochar preparado a 700, 600, 500, y 400 ° C respectivamente. El modelado cinético sugiere que el fosfato es adsorbido por un lento proceso múltiple. Los distintos estudios de desorción indicaron que el fosfato fue recuperable cuando el medio fue modulado a niveles de pH ácidos. El 30 % del fosfato adsorbido del biocarbón fue liberado a pH = 5 y hasta el 97 % se liberó a pH = 4. La precipitación de calcio hace recuperable el fosfato en condiciones casi neutrales, esto es una mejora sobre los distintos métodos convencionales de precipitación de fosfato, por lo que tiene una potencial aplicación en el reciclaje de fosfato en soluciones acuosas.

En los resultados alcanzados en el presente trabajo de investigación, las temperaturas de carbonización para obtener los adsorbentes fueron 500 °C, 600 °C, 700 °C, los cuales se sometieron a experimentos de adsorción por lotes a diversos valores de pH de la solución acuosa (4,0; 7,0 y 10,0), que contenía iones fosfato y iones calcio. Los resultados revelaron que se obtuvieron mayor eficacia para la remoción de fosfato, con los adsorbentes P500 y P700, cuando la adsorción estaba ajustada a pH 10 (figura 20). También, los resultados revelaron que los experimentos a pH 4, con los tres tratamientos P500, P600 y P700, liberaron fosfatos. Zheg et al. (57) refieren que la liberación de fosfatos en el medio acuoso, se debe al efecto del pH sobre el fosfato soluble. El estudio de la cinética de liberación de fosfato, a partir del adsorbente, puede explicar el mecanismo por el cual, el adsorbente pudiera ser usado como abono, dado para el desarrollo de las plantas el fosfato es un nutriente muy importante.

Alvares Gutiérrez (58), evaluó la calidad del agua de los pantanos de Villa, donde el agua está enriquecida con fosfato, producto de las malas prácticas de los pobladores circundantes a los pantanos. Por ello, estas fuentes de agua, se han declarado en riesgo de eutrofización. El pH, del agua de los pantanos se encuentra entre 7,06 a 8,90 debido a la presencia de mayor contenido de algas que gracias al consumo de CO₂ alcalinizan el medio. Por ello, en la presente investigación se sometió a

experimentos de adsorción a diferentes pH, para evaluar el potencial de los adsorbentes para descontaminar aguas enriquecidas con fosfato a distinto pH. Los resultados muestran que, el adsorbente es más eficiente en la remoción de fosfato a pH alcalino (figura 20). Según Tchobanoglous (59) menciona que el pH debe ser elevado a 9,5 – 10 en el medio para que se produzca una mayor adsorción de fosfato. Esto puede ser corroborado con los resultados alcanzados en la presente investigación donde se obtuvo el mayor porcentaje de adsorción se dio en los tratamientos sometidos a pH 7 y 10. Figura 20

Modelamiento cinético

Es necesario poder definir qué fase domina el proceso de la cinética de adsorción, para poder explicar el mecanismo de adsorción (60). Liao et al. (61) elaboró adsorbentes a partir de la cáscara de piña, modificada con OH_3 para adsorción de fosfato. El estudio cinético reveló que la adsorción se ajustó mejor al modelo de pseudo segundo orden. Esto se evidenció por tener un mejor coeficiente de determinación. De modo similar, evaluamos la investigación de la cinética de adsorción de fosfato, en los experimentos realizados con los adsorbentes obtenidos a partir de la cáscara de plátano de la variedad bellaco, los cuales mostraron un mejor ajuste al modelo de pseudo segundo orden, seguido de difusión intraparticular o también denominado modelo de Weber y Morris. Esto se puede apreciar en las tablas 11, 12 y 13. El modelo se ajusta mejor cuando los valores de R^2 se muestran cercanos al 1. Según Moreno (56), el mayor ajuste en los modelos cinéticos se validan al evaluar la cercanía a la unidad del coeficiente de determinación (R^2).

Pinto (6), evaluó la cinética de adsorción de colorantes en adsorbentes a base de banano, mostrando un mayor ajuste al modelo de pseudo segundo orden. Un mejor ajuste al modelo de pseudo segundo orden indica que el proceso de quimisorción podría ser uno de los procesos más importantes en la adsorción de fosfato (51).

Vitela, evaluó haciendo uso del carbón activado agregado con nanopartículas de hidro (óxidos) de hierro la remoción de arsénico. (60)

Comparación de la eficiencia de remoción de fosfato con otros adsorbentes citados en la literatura

En la tabla 14. Se observa la comparación entre el porcentaje de remoción de fosfatos de las muestras de cáscara de plátano, borra de café y exoesqueleto de camarón, bagazo de caña sometido a los distintos parámetros de temperatura y pH.

Tabla 14. Porcentaje de adsorción entre adsorbentes.

| ADSORBENTE | PARÁMETROS | | % DE REMOCIÓN | REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA |
|-------------------------|------------|-----------------|---------------|--------------------------|
| | pH | TEMPERATURA(Cº) | | |
| CÁSCARA DE PLATANO | 10 | 500 | 92.12 | Presente investigación |
| | 10 | 700 | 91.69 | |
| | 10 | 600 | 81.68 | |
| | 7 | 700 | 72.49 | |
| EXOESQUELETO DE CAMARON | 6 | >1000 | 98.10 | (56) |
| BORRA DE CAFÉ | 2 | >1000 | 95.06 | |
| BAGAZO DE CAÑA | - | 350 | 94,6 | (62) |

Fuente: Elaboración propia, diciembre, 2019

La temperatura de carbonización tiene efectos sobre la capacidad de adsorción de un adsorbente (49). Moreno, obtuvo los adsorbentes del exoesqueleto de camarón y borra de café, al someter el precursor a temperaturas $> 1000^{\circ} \text{C}$, obteniendo más altos porcentajes de remoción de fosfato. De modo similar, en el estudio se observó que, a mayor temperatura de carbonización en el proceso de elaboración del adsorbente, es mayor el porcentaje de remoción de fosfato en los experimentos de adsorción. A diferencia de los adsorbentes elaborados por Moreno (49) y Chuquimboques et al. (53) (tabla 13), los tratamientos P500, P600 y P700 fueron obtenidos por metodologías más eco amigables, al emplear menores temperaturas de carbonización, se demandó menos energía calorífica, no se empleó gas nitrógeno protector de los adsorbentes previo a la carbonización en mufla, ni se emplearon solventes tóxicos para la activación química. Además, la obtención de estos adsorbentes solo empleó una mufla eléctrica y crisoles de porcelana con tapa, lo cual

facilitó el mecanismo de obtención, y facilitará la transferencia de tecnología y replicación del experimento de obtención.

En el adsorbente a partir de bagazo de caña se observa que es sometido a temperatura de 350 °C por un tiempo de 3 horas y obtiene una mayor adsorción sobre el adsorbente a partir de cáscara de plátano lo cual tiene 2.48 % de diferencia, este adsorbente en comparación con adsorbente realizado en la presente investigación es sometido a menos temperatura de pirólisis, pero el triple de tiempo empleado en la elaboración del adsorbente en la presente investigación, lo cual representa un gasto de más de energía.

Según Atar, Olgun, & Wang, 2012, la descontaminación del agua por adsorción es el método generalmente preferido, debido a tenemos acceso a una gran cantidad de residuos agroindustriales y materiales naturales a partir de los cuales se puede elaborar adsorbentes apoyando la implementación de la economía circular (63).

VII CONCLUSIONES

- 1) El adsorbente derivado de la cáscara de plátano variedad Bellaco procedente de Satipo, Junín - Perú, fue eficaz para eliminar iones fosfato presentes en solución acuosa. Los resultados mostraron la adsorción fue un proceso dependiente del pH, requirió contener iones calcio en solución y la máxima adsorción se produjo con el adsorbente P500 y P700 a pH 10. Logró remover hasta 92% de fosfato. Esto se ajusta a la normativa peruana vigente en el marco de una economía circular.
- 2) Se caracterizó el adsorbente a partir de la cáscara de plátano, el cual cumplió con los parámetros de calidad para calificar como carbón activado granular. Además, que se realizó la comparación con otros adsorbentes procedentes de distintos residuos agroindustriales los cuales tuvieron resultados similares.
- 3) Los experimentos demostraron que el adsorbente a partir de cáscara de plátano requirió 168 h. para que la adsorción de fosfatos alcanzará el equilibrio donde el modelamiento cinético que más se ajusto fue el modelo de pseudo segundo orden, seguido por el modelo de Weber y Morris.

VIII. RECOMENDACIONES

- 1) Dar uso a diversas variedades de plátano para la fabricación de adsorbente a fin de contrastar si la variedad puede mejorar el rendimiento del producto y de esta manera dar un uso más integral al fruto plátano que es muy consumido por la población.
- 2) Se recomienda realizar la caracterización del adsorbente por medio de la espectroscopia FTIR, microscopia electrónica de rastreo SEM-EDX (Scannig Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray spectroscopy) entre otros que puedan contribuir al desarrollo de la investigación.
- 3) Experimentar con el adsorbente de plátano a mayores concentraciones de fosfatos en cuerpos de agua donde el fenómeno de eutrofización abunde, para comprobar el rendimiento de adsorción de fosfatos que tanto perjudican la fauna del medio acuático.

IX REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Consumo de frutas en Perú alcanza los 55 kilos por persona al año [Internet]. [cited 2021 Jun 20]. Disponible en: <https://agraria.pe/noticias/consumo-de-frutas-en-peru-alcanza-los-55-kilos-por-persona-a-24248>
2. Agraria. Perú exportó más de US\$ 11.8 millones en chifles [Internet]. <https://agraria.pe/noticias/peru-exporto-mas-de-us-118-millones-en-chifles-15103>. [cited 2021 Jun 20]. Disponible en: <https://agraria.pe/noticias/peru-exporto-mas-de-us-118-millones-en-chifles-15103>
3. Access O. We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %.
4. Kumar V, Ki-Hyun K, Yong S. O DC. Designed / designer biochar for the removal of phosphate in water and wastewater. Science of The Total Environment No Title. 2018.
5. Yuanyao Y, Huo Hao N, Wenshan G, Yiwen L, Jixiang L, Yi Liub, Xinbo Zhang HJ. Insight into chemical phosphate recovery from municipal wastewater. 2017.
6. Fuentes P, Gladys. Estudio del potencial uso de cáscara de banana como agente adsorbente. 2017;(ANALIA <http://hdl.handle.net/11673/40999>).
7. Odar JA. Mejora De La Productividad En La Empresa Vivar Sac. 2014;110. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12423/660>
8. A. SR. El cultivo de Plátano (genero musa) en México. Universidad Autónoma Agraria Antonio Navarro; 2007. Revisado 2020
9. Gregori MI. Estudio de la adsorción de fosfatos en aguas de depuradora mediante intercambiadores iónicos. 2009; Revisado 2020
10. Torres IF. Selección de clones y cultivares de plátano y banano (musa sp.) resistentes a plagas de importancia en condiciones de Satipo. Univ Nac Del Cent Del Cent Posgrado. 2004;10–1. Revisado 2020
11. K., Carrión M. Reutilización de residuos de la cáscara de bananos (musa paradisiaca) y plátanos (musa sapientum) para la producción de alimentos destinados al consumo humano. Universidad de Guayaquil;

12. Exportación PE De. El Banano Peruano.
13. López GB, Javier F, Montañó G. Propiedades funcionales del plátano (*Musa sp*). 2014;
14. Bhatnagar A, Sillanpää M W-KA. Agricultural “waste peels” as versatile biomass for water purification. *A Rev Chem Eng J*. 2015;
15. Reátegui K. Obtención de carbón activado a partir de la cáscara del fruto de la calabaza (*Cucurbita ficifolia* Bouché). *Univ Nac Agrar La Molina* [Internet]. 2017;91. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2882>
16. Degadillo G. Obtención de carbones activados a partir de pepas de níspero de palo (*mespilus communi*) y su aplicación para la adsorción de fenol. Pontificia Universidad católica de Perú; 2011. Revisado 2020
17. Leyva-Ramos. Preparación, Caracterización y Aplicaciones. 2007; Revisado 2020
18. Romero Bonilla H, Rios Elizalde P. Cinética de bioadsorción de arsénico utilizando cáscara de banano maduro en polvo. 2014;1–84. Disponible en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/1579/7/CD00006- TESIS.pdf>
19. Ramos Rincón JM. Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre borra (cuncho) de café. Director. 2010;128. Revisado 2020
20. Gisi S De, Lofrano G, Grassi M, Notarnicola M. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment : A review. *SUSMAT* [Internet]. 2016;9:10–40.Revisado 2020 Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.002>
21. Shuan C. Xian JAZ. Adsorción of methyl violet from aqueous solutions by the biochars derived from crop residues. 2011; Revisado 2020
22. Doig ALP. Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cáscara de castaña. *Test*. 2011;1–118. Revisado 2020
23. Qinghua Wang Chaojin L. Advances in comprehensive utilization of fruit peel in

China.

24. Bhatnagar A, Sillanpää M, Witek-Krowiak A. Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification - A review. *Chem Eng J* [Internet]. 2015;270:244–71. Revisado 2020. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.135>
25. Jalali M, Jalali M. Science of the Total Environment Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in calcareous soils with different texture. *Sci Total Environ* [Internet]. 2016;(2015). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.133>. Revisado 2020
26. Fernández MT. Fósforo: amigo o enemigo. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. 2007; Revisado 2020
27. JM Salman un, VO Njoku BH. The adsorption of pesticides from aqueous solution on activated carbon banana stem. . *Chem Eng J* 2011;17441-48. 2011; Revisado 2020
28. Ali A, Saeed K, Mabood F. Removal of chromium (VI) from aqueous medium using chemically modified banana peels as efficient low-cost adsorbent. *Alexandria Eng J* [Internet]. 2016;55(3):2933–42. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2016.05.011>
29. Negroiu M, Țurcanu AA, Matei E, Râpă M, Covaliu CI, Predescu AM, et al. Novel Adsorbent Based on Banana Peel Waste for Removal of Heavy Metal Ions from Synthetic Solutions. *Materials (Basel)*. 2021;14(14):3946.
30. Suman M, Kalzang Ch RK. Application of Agro-waste Rice Husk Ash for the Removal of Phosphate from the Wastewater. *J Clean Prod*. 2016; Revisado 2020
31. Khan EA, Shahjahan, Khan TA. Adsorption of methyl red on activated carbon derived from custard apple (*Annona squamosa*) fruit shell: Equilibrium isotherm and kinetic studies. *J Mol Liq* [Internet]. 2018;249:1195–211. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.125>

32. Sumanjit, Rani S, Mahajan RK. Equilibrium, kinetics and thermodynamic parameters for adsorptive removal of dye Basic Blue 9 by ground nut shells and Eichhornia. Arab J Chem [Internet]. 2016;9:S1464–77. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.03.013>. Revisado 2020
33. Kizito S, Luo H, Wu S, Ajmal Z, Lv T, Dong R. Phosphate recovery from liquid fraction of anaerobic digestate using four slow pyrolyzed biochars: Dynamics of adsorption, desorption and regeneration. J Environ Manage [Internet]. 2017;201:260–7. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.057>
34. Oyewo OA, Onyango MS, Wolkersdorfer C. Application of banana peels nanosorbent for the removal of radioactive minerals from real mine water. J Environ Radioact [Internet]. 2016;164:369–76. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.08.014>
35. Of USE, Peels B, An AS, In A, Kakama NL. College of Natural Sciences Department of Chemistry of Copper From Waste Water . 2018;1–36.
36. Bonilla-Petriciolet, A, Mendoza-Castillo D. Adsorption Processes for Water Treatment and Purification. 2017;
37. Velez FJO, Vargas DS. Validación de una metodología analítica para la determinación de fenoles y fosfatos en agua cruda, tratada y residual por el método de espectrofotometría de absorción. Univ Tecnológica Pereira Fac Tecnol química Pereira. 2012; Revisado 2020
38. P.Boehm H. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons.
39. De MAAP, Ambientales AP. Luis Alberto Romero Cano. 2018.
40. Cano R. Preparación y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cascara de frutas para su uso en la remoción de materiales y aplicación a procesos ambiental. Universidad de Granada; 2018.
41. Velez Francia Julieth. Validación de una metodología analítica para la determinación de fenoles y fosfatos en agua cruda, tratada y residual por el

- método de espectrofotometría de absorción para el laboratorio de aguas y alimentos de la universidad tecnológica de Pereira. *Экономика Региона*. 2012;(July):32. Revisado 2020
42. Marshall JA, Morton BJ, Muhlack R, Chittleborough D, Kwong CW. Recovery of phosphate from calcium-containing aqueous solution resulting from biochar-induced calcium phosphate precipitation. *J Clean Prod*. 2017;165:27–35.
 43. Pinzón-bedoya ML. Modelamiento de la cinética de bioadsorción de cr (iii) usando cáscara de naranja. 2009; Revisado 2020
 44. Sancán D. Elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales, para ser usado como medio filtrante. 2014; Revisado 2020
 45. Montesinos CS. Caracterización de carbón activado a partir de bambú “*guadua angustifolia kunth*” utilizando el método químico. 2019;10–2.
 46. Menendez A patricia R. Obtención de carbón activado a partir de cáscara de naranja (*citrus sinensis* L. obseck) y su aplicación como adsorbente de plomo (ii) en disolución acuosa. 2018;(li).
 47. Bai S, Wang T, Tian Z, Cao K, Li J. Facile preparation of porous biomass charcoal from peanut shell as adsorbent. *Sci Rep [Internet]*. 2020;10(1):1–9. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72721-0>. Revisado 2020
 48. AWWA. Awwa Standard for Granular Activated Carbon. *J / Am Water Work Assoc*. 1974;66(11):672–81. Revisado 2020
 49. Mohd Iqbalidin MN, Khudzir I, Mohd Azlan MI, Zaidi AG, Surani B, Zubri Z. Properties of coconut shell activated carbon. *J Trop For Sci*. 2013;25(4):497–503. Revisado 2020
 50. Yuan, Z., Pratt, S., Batstone DJ. . Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes. *Curr. Opin. Biotechnol*. *Biotechnol* 23. 2012; Revisado 2020
 51. Fernandez, M. E., Nunell, G. V., Bonelli, P. R., & Cukierman al. Activated carbon developed from orange peels: batch and dynamic competitive adsorption of basic dyes. *Ind Crops Prod*. 2014; Revisado 2020

52. Tejada L, Benítez, Ortiz C. Estudio de modificación química y física de biomasa (*Citrus sinensis* y *Musa paradisiaca*) para la adsorción de metales pesados en solución. 2014;(39):124–42. Revisado 2020
53. Dra A, Rosario, Kou SUN. Activados de pepas de nispero de palo (*Mespilus communi*) y su aplicación de material. 2011; Revisado 2020
54. Valdés H, Zaror CA. Influencia de la composición química superficial del carbón activado en la adsorción de benzotiazoles. *Ingeniare*. 2010;18(1):38–43. Revisado 2020
55. Zhan Y, Zhang H, Lin J, Zhang Z, Gao J. Role of zeolite's exchangeable cations in phosphate adsorption onto zirconium-modified zeolite. *J Mol Liq* [Internet]. 2017;243:624–37. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2017.08.091>
56. Roxanna A, Marengo M, Roxanna A, Marengo M. Bioadsorbentes Como Posibles Retenedores De Fosfatos En Aguas Retenedores De Fosfatos En Aguas. 2013; Revisado 2020
57. Zheng H, Wang Z, Deng X, Zhao J, Luo Y, Novak J, et al. Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures. *Bioresour Technol* [Internet]. 2013;130:463–71. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.044> Revisado 2020
58. Gutierrez CCA. Determinación analítica de detergentes en las aguas de los pantanos de Villa. 2016; Revisado 2020
59. Tchobanoglous, G., Stensel, H., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G., Pfang W. *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. McGraw Hill Educ. 2013;ISBN 9780.
60. Vitela Rodríguez AV. Remoción de arsénico por medio de carbón activado modificado con nanopartículas de hidro(óxidos) de hierro. 2011;80. Disponible en: <http://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/11627/97/1/VitelaRodriguez.pdf> Revisado 2020
61. Liao T, Li T, Su X, Yu X, Song H, Zhu Y, et al. La(OH)₃-modified magnetic

pineapple biochar as novel adsorbents for efficient phosphate removal. *Bioresour Technol.* 2018;263(April):207–13.

62. Chuquimboques JM, Vergara JR, Mendoza JB. Optimization Simultaneous Removal of Nitrate , Nitrite , Ammonium and Phosphate in Sewage. *Soc Quím Perú.* 2019;85(1):85–96.
63. Necip Atar AO et al. Adsorption of cadmium (II) and zinc (II) on boron enrichment process waste in aqueous solutions: Batch and fixed-bed system studies *Chemical Engineering Journal*, 192, 3 2015. 2015; Revisado 2020

X. ANEXOS

ANEXO 1. Materiales y metodología

MATERIALES, equipos, reactivos y soluciones

Materiales

- Matraces Erlenmeyer (25, 100, 250 ml)
- Micropipetas BOECO (10 mL- 100 mL y 100 mL – 1000 mL)
- Probetas de vidrio (10, 50, 100 mL)
- Vasos de precipitados de vidrio (25, 50, 100, 250 mL)
- Frascos de vidrio (400 mL)
- Fiolas de vidrio (25, 50 mL)
- Picnómetro de vidrio

REACTIVOS

- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Bicarbonato de sodio (NaCO₃)
- Etóxido de Sodio (NaOC₂H₃)
- Carbonato de Sodio (NaCo₃)
- Dihidrogenato de Fosfato (KH₂PO₄)
- Molibdato de Amonio
- Cloruro Estañoso (SnCl₂ 2H₂O)
- Cloruro de Sodio (NaCl)
- Ácido clorhídrico (HCl)
- Azida de sodio (NaN₃)
- Cloruro de Calcio (CaCl)

- Agua desionizada
- Agua destilada
- Fenolftaleína
- Glicerol

EQUIPOS:

- Estufa Incubadora Digital:
 - Marca Beltec Scientific
 - Modelo: PH- 070 (A)
- Mufla:
- Potenciómetro:

Biolab PH5-3BW Microprocesador PH-MV-TEMPERATURE
- Espectrofotómetro
 - Marca: Genesis 10S UV – Visible
- Balanza Analítica
 - Marca: OHAUS
 - Modelo: PA 224
 - Rango: 0.0001 g – 220 g
- Baño María de agua circundante:
 - Marca: Digisystem Laboratory Instruments Inc
 - Modelo: DSB – 500
 - Rango: 25 a 100 °C
- Malla
 - Marca: Test Sieve
 - Modelo: Retsch 5657 HAAN W. GERMANY SER: 909301 ASTM
 - Rango: 0.600 m

Métodos

Curva de calibración para fosfatos

Reactivos

1. Reactivo de molibdato de amonio: Disuelva 25 gr. de heptamolibdato de amonio $(\text{NH}_4)_6\text{M}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ en 175 ml de agua destilada. Adicione 280 ml de H_2SO_4 concentrado a 400 ml de agua destilada enfríe, mezcle con la solución de molibdato y diluya a un litro.
2. Reactivo de cloruro Estanoso: Disuelva 2,5 gr. de cloruro Estanoso $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en 100 ml de glicerol. Este reactivo es estable.
3. Solución patrón de fosfato: Pese 219,4 mg de KH_2P_04 anhidro que ha sido secado previamente en la estufa durante una hora a 110°C , disuelva en agua destilada, afore a un litro.

Determinación de fósforo

Se realizó siguiendo el método del cloruro estañoso

4. Concentración de la solución: 50 mg de P-P04 '3 /L.

Preparación de los estándares de la curva patrón de fósforo

| ml de la solución de 10mg/L | Volumen Final (ml) | mg de P | mg/l de P |
|-----------------------------|--------------------|---------|-----------|
| | | | 0 |
| 0,1 | 100 | 0,001 | 0,01 |
| 0,5 | 100 | 0,005 | 0,05 |
| 1 | 100 | 0,01 | 0,1 |
| 3 | 100 | 0,03 | 0,3 |
| 4 | 100 | 0,04 | 0,4 |
| 5 | 100 | 0,05 | 0,5 |
| 6 | 100 | 0,06 | 0,6 |
| 7 | 100 | 0,07 | 0,7 |

Fuente: Elaboración propia, enero, 2019.

Curva de calibración

1. Tome 100 ml de cada uno de los patrones
2. Adicione 4 ml del reactivo de molibdato de amonio
3. Adicione 0.5 ml de cloruro estañoso
4. Deje en reposo 10 min
5. Mida la absorbancia en el espectrofotómetro a 690 nm
6. Trace una curva de absorbancia vs. Concentración

Tratamiento previo a la muestra

1. Adicione 4 ml del reactivo de molibdato
2. Adiciones 0.5 ml de reactivo de cloruro estañoso

La velocidad con que aparece el color y la intensidad del mismo dependen de la temperatura de la solución final; por esto la muestra, los reactivos y los patrones deben mantenerse entre los 20 °C y los 30 °C, sin diferencia superiores a 2 °C.

1. Al cabo de 10 min, pero antes de 12, mida la absorbancia en el espectrofotómetro a 690 nm
2. Determine la concentración de P en la curva.
- 3.

Preparación de las mezclas de reacción para la curva patrón de fósforo

| mg/l de P | Volumen Final | UI molibdato de amonio | UI Cloruro estanosos |
|-----------|---------------|------------------------|----------------------|
| 0,01 | 100 | 4000 | 500 |
| 0,05 | 100 | 4000 | 500 |
| 0,1 | 100 | 4000 | 500 |
| 0,3 | 100 | 4000 | 500 |
| 0,4 | 100 | 4000 | 500 |
| 0,5 | 100 | 4000 | 500 |
| 0,6 | 100 | 4000 | 500 |
| 0,7 | 100 | 4000 | 500 |

Fuente: Elaboración propia, enero, 2019

4. Trazar una curva de absorbancia vs concentración.
5. Curva de calibración para fosfatos

$$\text{Ecuación: } y=0,8108x - 0,0011$$

$$R^2= 0,994$$

ANEXO 2. ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

Caracterización de los adsorbentes

Modelo lineal general: Rendimiento vs. Tratamientos
Método

| | |
|--------------------------|-------------|
| Codificación de factores | (-1; 0; +1) |
|--------------------------|-------------|

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|--------------|------|---------|------------------|
| Tratamientos | Fijo | 3 | P500; P600; P700 |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 0.003333 | 0.001667 | 0.02 | 0.982 |
| Error | 3 | 0.279200 | 0.093067 | | |
| Total | 5 | 0.282533 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|----------|---------|-----------------------|-------------------|
| 0.305068 | 1.18% | 0.00% | 0.00% |

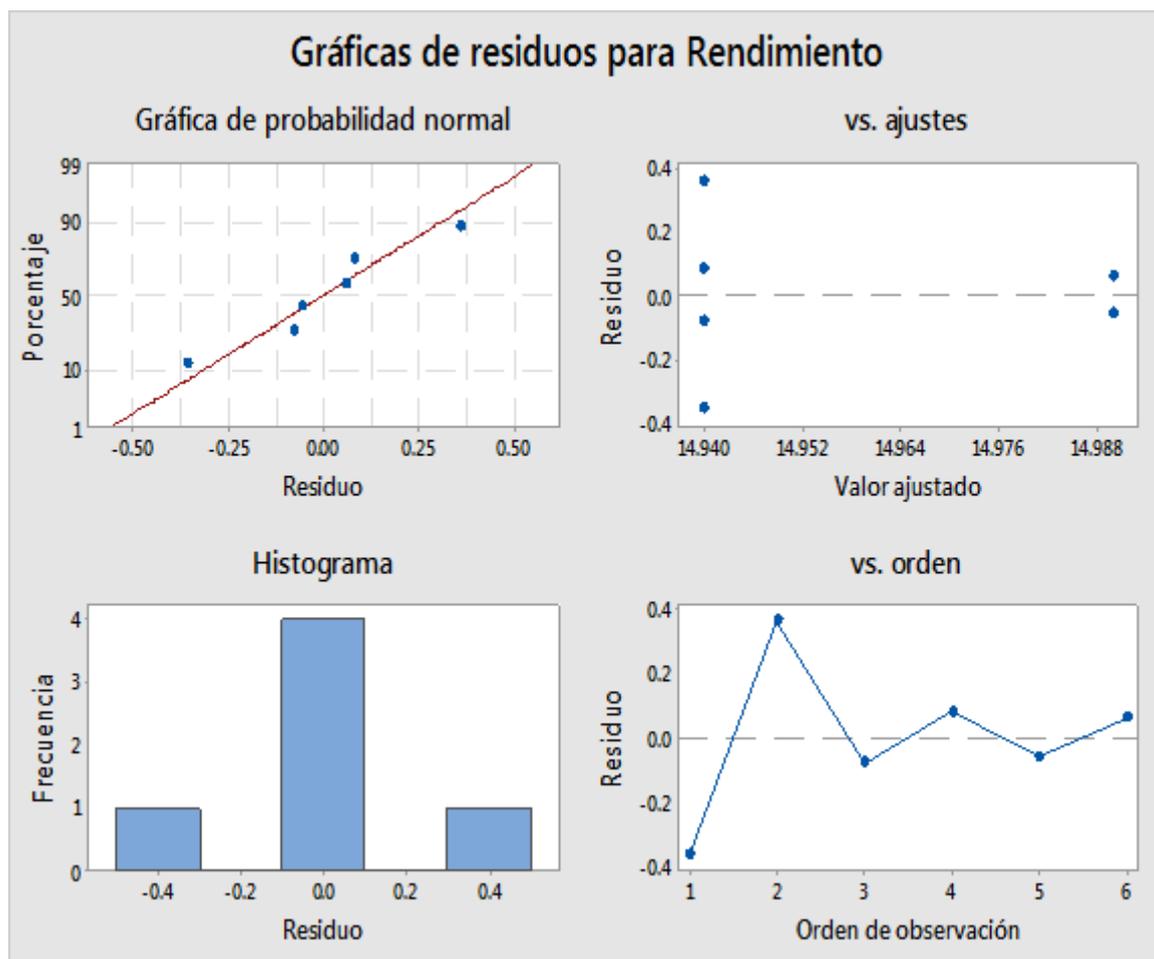
Coeficientes

| Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | FIV |
|--------------|--------|--------------|---------|---------|------|
| Constante | 14.957 | 0.125 | 120.09 | 0.000 | |
| Tratamientos | | | | | |
| P500 | -0.017 | 0.176 | -0.09 | 0.931 | 1.33 |
| P600 | -0.017 | 0.176 | -0.09 | 0.931 | 1.33 |

Ecuación de regresión

| | | |
|-------------|---|--|
| Rendimiento | = | 14.957 - 0.017 Tratamientos_P500 - 0.017 Tratamientos_P600 + 0.033 Tratamientos_P700 |
|-------------|---|--|

Gráficas de residuos para Rendimiento



Comparaciones para Rendimiento

Comparaciones por parejas de Tukey: Tratamientos

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| P700 | 2 | 14.58 | A |
| P500 | 2 | 14.86 | A |
| P600 | 2 | 14.93 | A |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Modelo lineal general: Humedad vs. Tratamientos

Método

Codificación de factores (-1; 0; +1)

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|--------------|------|---------|------------------|
| Tratamientos | Fijo | 3 | P500; P600; P700 |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 1.4137 | 0.7068 | 5.23 | 0.105 |
| Error | 3 | 0.4056 | 0.1352 | | |
| Total | 5 | 1.8193 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|----------|---------|-----------------------|-------------------|
| 0.367691 | 77.71% | 62.84% | 10.82% |

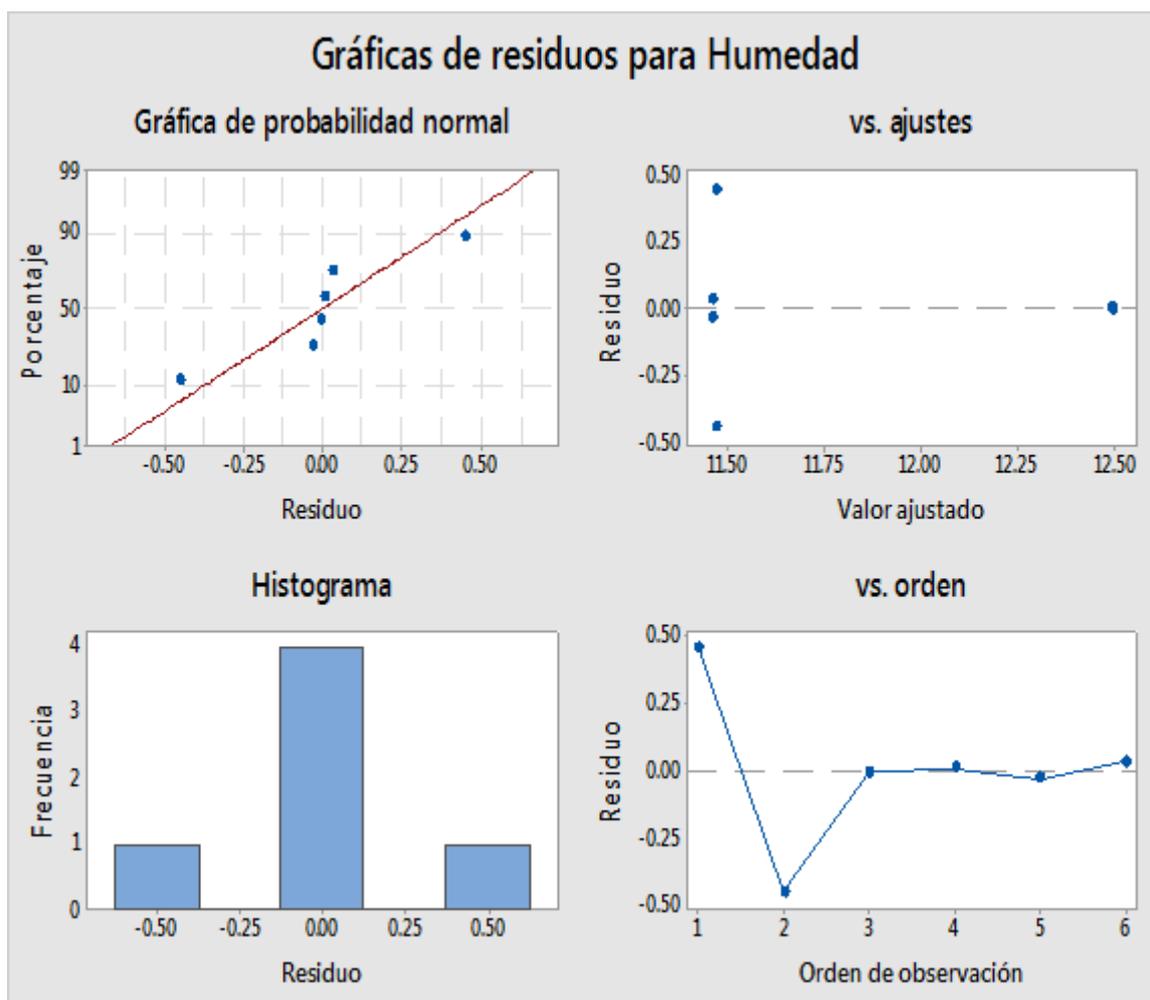
Coeficientes

| Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | FIV |
|--------------|--------|--------------|---------|---------|------|
| Constante | 11.809 | 0.150 | 78.67 | 0.000 | |
| Tratamientos | | | | | |
| P500 | -0.338 | 0.212 | -1.59 | 0.210 | 1.33 |
| P600 | 0.686 | 0.212 | 3.23 | 0.048 | 1.33 |

Ecuación de regresión

| | | |
|---------|---|--|
| Humedad | = | 11.809 - 0.338 Tratamientos_P500 + 0.686 Tratamientos_P600 - 0.349 Tratamientos_P700 |
|---------|---|--|

Gráficas de residuos para Humedad



Comparaciones para Humedad

Comparaciones por parejas de Tukey: Tratamientos

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| P600 | 2 | 12.49 | A |
| P500 | 2 | 11.92 | A |
| P700 | 2 | 11.43 | A |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Modelo lineal general: Cenizas vs. Tratamientos

Método

Codificación de factores (-1; 0; +1)

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|--------------|------|---------|------------------|
| Tratamientos | Fijo | 3 | P500; P600; P700 |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 0.327652 | 0.163826 | 85.50 | 0.002 |
| Error | 3 | 0.005748 | 0.001916 | | |
| Total | 5 | 0.333400 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|-----------|---------|-----------------------|-------------------|
| 0.0437721 | 98.28% | 97.13% | 93.10% |

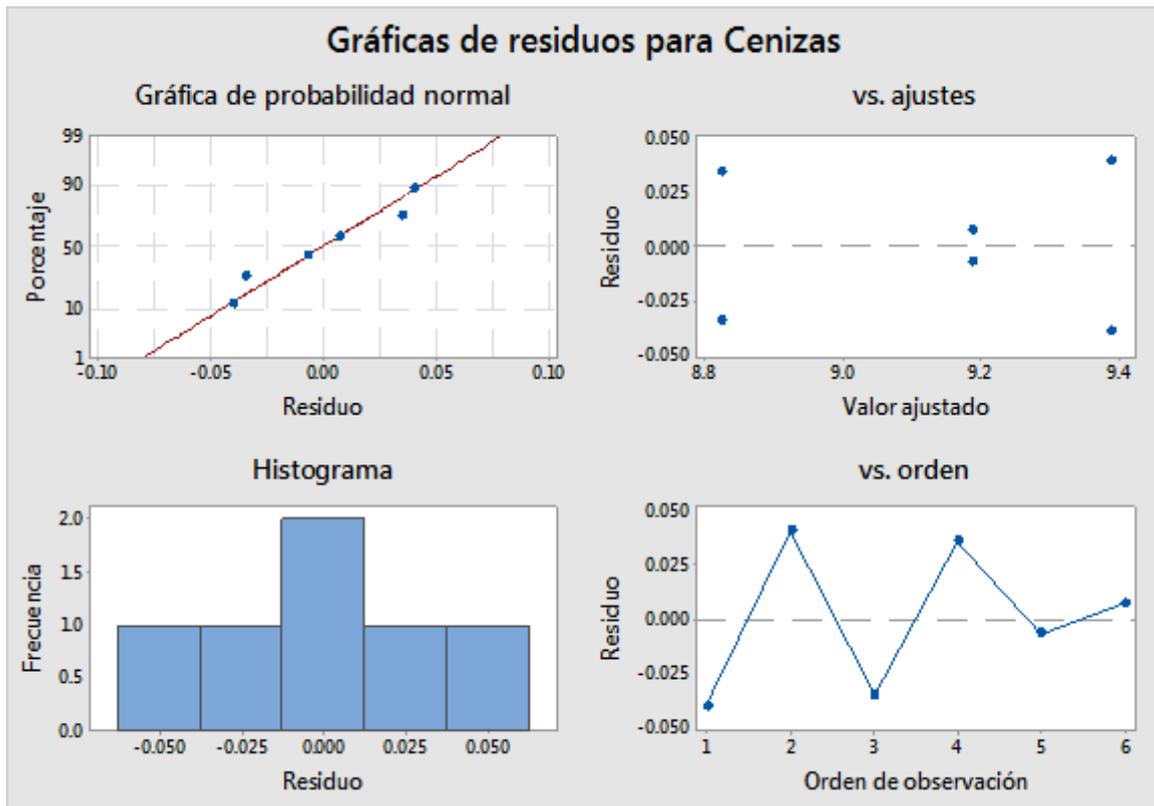
Coefficientes

| Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | FIV |
|--------------|---------|--------------|---------|---------|------|
| Constante | 9.1340 | 0.0179 | 511.14 | 0.000 | |
| Tratamientos | | | | | |
| P500 | 0.2560 | 0.0253 | 10.13 | 0.002 | 1.33 |
| P600 | -0.3090 | 0.0253 | -12.23 | 0.001 | 1.33 |

Ecuación de regresión

| | | |
|---------|---|--|
| Cenizas | = | $9.1340 + 0.2560 \text{ Tratamientos_P500} - 0.3090 \text{ Tratamientos_P600} + 0.0530 \text{ Tratamientos_P700}$ |
|---------|---|--|

Gráficas de residuos para Cenizas



Comparaciones para Cenizas

Comparaciones por parejas de Tukey: Tratamientos

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Tratamientos | N | Media | Agrupación | | |
|--------------|---|-------|------------|---|---|
| P500 | 2 | 9.350 | A | | |
| P700 | 2 | 9.187 | | B | |
| P600 | 2 | 8.793 | | | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Modelo lineal general: pH vs. Tratamientos

Método

| | |
|--------------------------|-------------|
| Codificación de factores | (-1; 0; +1) |
| Filas no utilizadas | 1 |

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|--------------|------|---------|------------------|
| Tratamientos | Fijo | 3 | P500; P600; P700 |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 3.32703 | 1.66352 | 1090.83 | 0.001 |
| Error | 2 | 0.00305 | 0.00153 | | |
| Total | 4 | 3.33008 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|-----------|---------|-----------------------|-------------------|
| 0.0390512 | 99.91% | 99.82% | * |

Coefficientes

| Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | FIV |
|--------------|---------|--------------|---------|---------|------|
| Constante | 8.1783 | 0.0184 | 444.26 | 0.000 | |
| Tratamientos | | | | | |
| P500 | -1.0933 | 0.0244 | -44.90 | 0.000 | 1.09 |
| P600 | 0.0117 | 0.0244 | 0.48 | 0.679 | 1.09 |

Ecuación de regresión

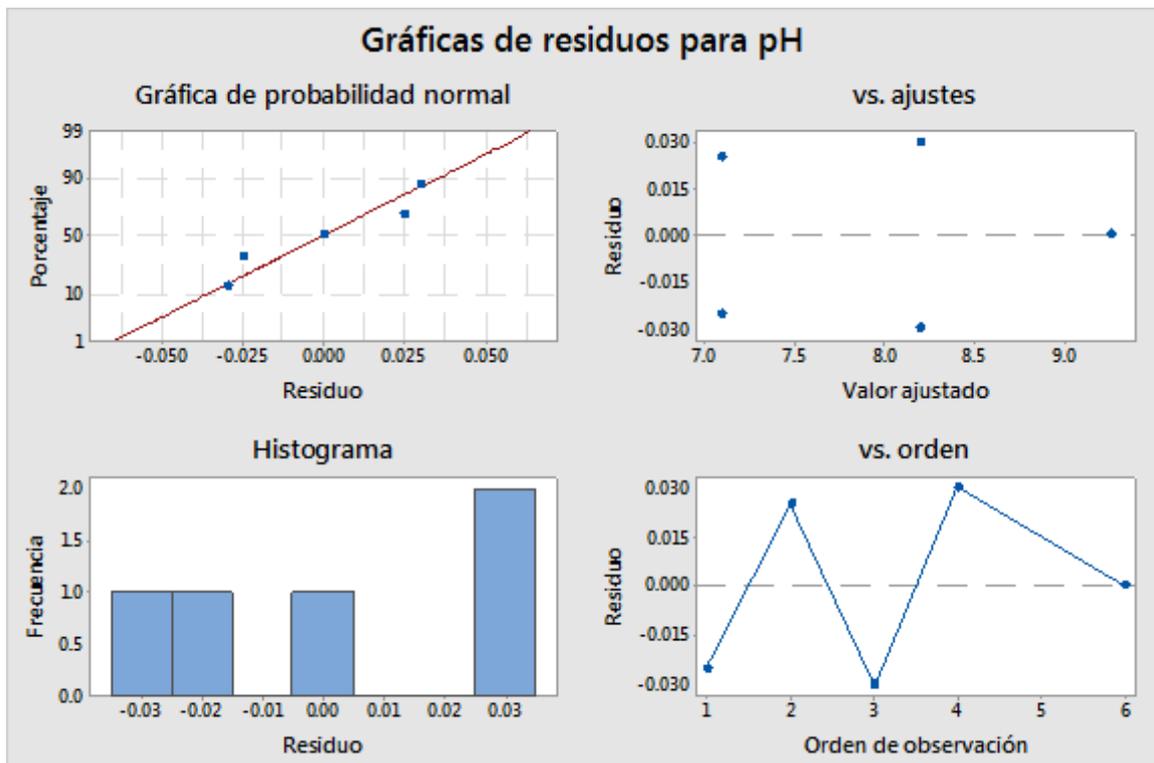
$$\begin{aligned} p &= 8.1783 - 1.0933 \text{ Tratamientos_P500} + 0.0117 \text{ Tratamientos_P600} \\ H &\quad + 1.0817 \text{ Tratamientos_P700} \end{aligned}$$

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco común

| Obs | pH | Ajuste | Resid | Resid est. | X |
|-----|--------|--------|--------|------------|---|
| 6 | 9.2600 | 9.2600 | 0.0000 | * | X |

X poco común X

Gráficas de residuos para pH



Comparaciones para pH

Comparaciones por parejas de Tukey: Tratamientos

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Tratamientos | N | Media | Agrupación | | |
|--------------|---|-------|------------|---|---|
| P700 | 1 | 9.230 | A | | |
| P600 | 2 | 8.160 | | B | |
| P500 | 2 | 7.058 | | | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Modelo lineal general: Densidad aparente vs. Tratamientos Método

Codificación de factores (-1; 0; +1)

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|--------------|------|---------|------------------|
| Tratamientos | Fijo | 3 | P500; P600; P700 |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------------|----|-----------|-----------|----------|---------|
| Tratamientos | 2 | 0.006329 | 0.003164 | 23263.96 | 0.000 |
| Error | 3 | 0.000000 | 0.000000 | | |
| Total | 5 | 0.006329 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|-----------|---------|-----------------------|-------------------|
| 0.0003688 | 99.99% | 99.99% | 99.97% |

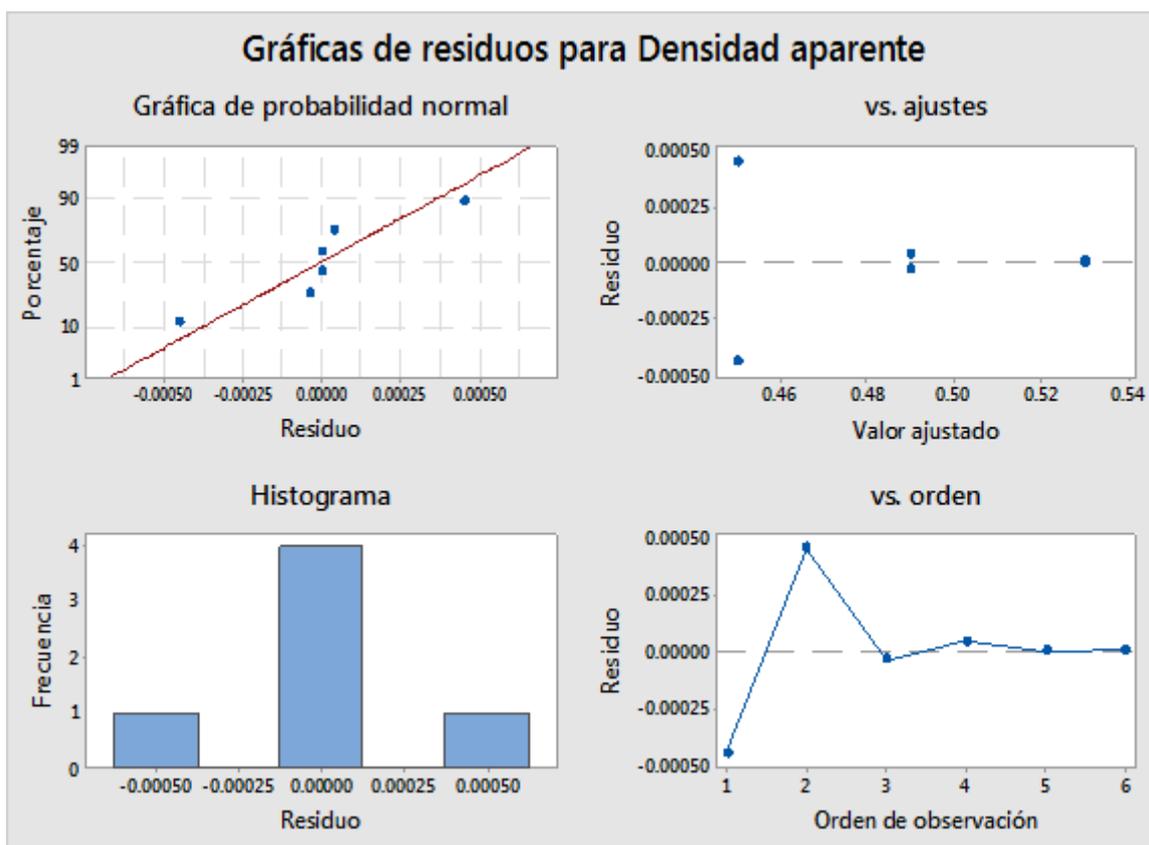
Coefficientes

| Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | FIV |
|--------------|-----------|--------------|---------|---------|------|
| Constante | 0.490164 | 0.000151 | 3255.52 | 0.000 | |
| Tratamientos | | | | | |
| P500 | -0.039714 | 0.000213 | -186.51 | 0.000 | 1.33 |
| P600 | -0.000125 | 0.000213 | -0.59 | 0.599 | 1.33 |

Ecuación de regresión

Densidad aparente = 0.490164 - 0.039714 Tratamientos_P500 - 0.000125 Tratamientos_P600
+ 0.039838 Tratamientos_P700

Gráficas de residuos para Densidad aparente



Comparaciones para Densidad aparente

Comparaciones por parejas de Tukey: Tratamientos

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|----------|------------|
| P700 | 2 | 0.530002 | A |
| P600 | 2 | 0.490039 | B |
| P500 | 2 | 0.450450 | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Modelo lineal general: sitios activos básicos vs. Tratamientos

Método

Codificación de factores (-1; 0; +1)

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|--------------|------|---------|------------------|
| Tratamientos | Fijo | 3 | P500; P600; P700 |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 5.68503 | 2.84252 | 257.63 | 0.000 |
| Error | 3 | 0.03310 | 0.01103 | | |
| Total | 5 | 5.71813 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|----------|---------|-----------------------|-------------------|
| 0.105040 | 99.42% | 99.04% | 97.68% |

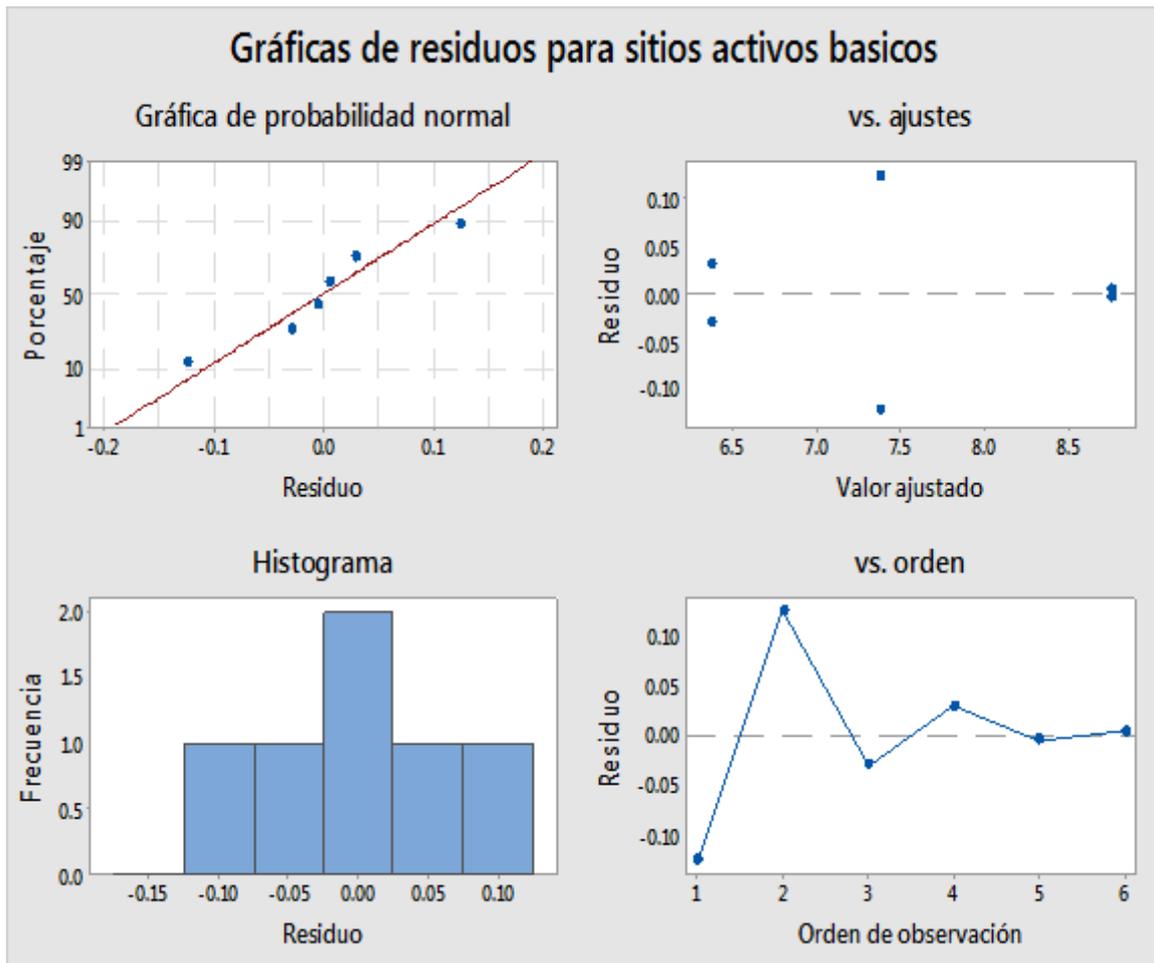
Coefficientes

| Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | FIV |
|--------------|---------|--------------|---------|---------|------|
| Constante | 7.4967 | 0.0429 | 174.82 | 0.000 | |
| Tratamientos | | | | | |
| P500 | -0.1217 | 0.0606 | -2.01 | 0.138 | 1.33 |
| P600 | -1.1267 | 0.0606 | -18.58 | 0.000 | 1.33 |

Ecuación de regresión

sitios activos básicos = 7.4967 - 0.1217 Tratamientos_P500 - 1.1267 Tratamientos_P600 + 1.2483 Tratamientos_P700

Gráficas de residuos para sitios activos básicos



Comparaciones para sitios activos básicos

Comparaciones por parejas de Tukey: Tratamientos

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Tratamientos | N | Media | Agrupación | | |
|--------------|---|-------|------------|---|---|
| P700 | 2 | 8.745 | A | | |
| P500 | 2 | 7.375 | | B | |
| P600 | 2 | 6.370 | | | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Modelo lineal general: sitios activos ácidos vs. Tratamientos

Método

Codificación de factores (-1; 0; +1)

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|--------------|------|---------|------------------|
| Tratamientos | Fijo | 3 | P500; P600; P700 |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------------|----|-----------|-----------|-----------|---------|
| Tratamientos | 2 | 113.667 | 56.8334 | 310000.36 | 0.000 |
| Error | 3 | 0.001 | 0.0002 | | |
| Total | 5 | 113.667 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|-----------|---------|-----------------------|-------------------|
| 0.0135401 | 100.00% | 100.00% | 100.00% |

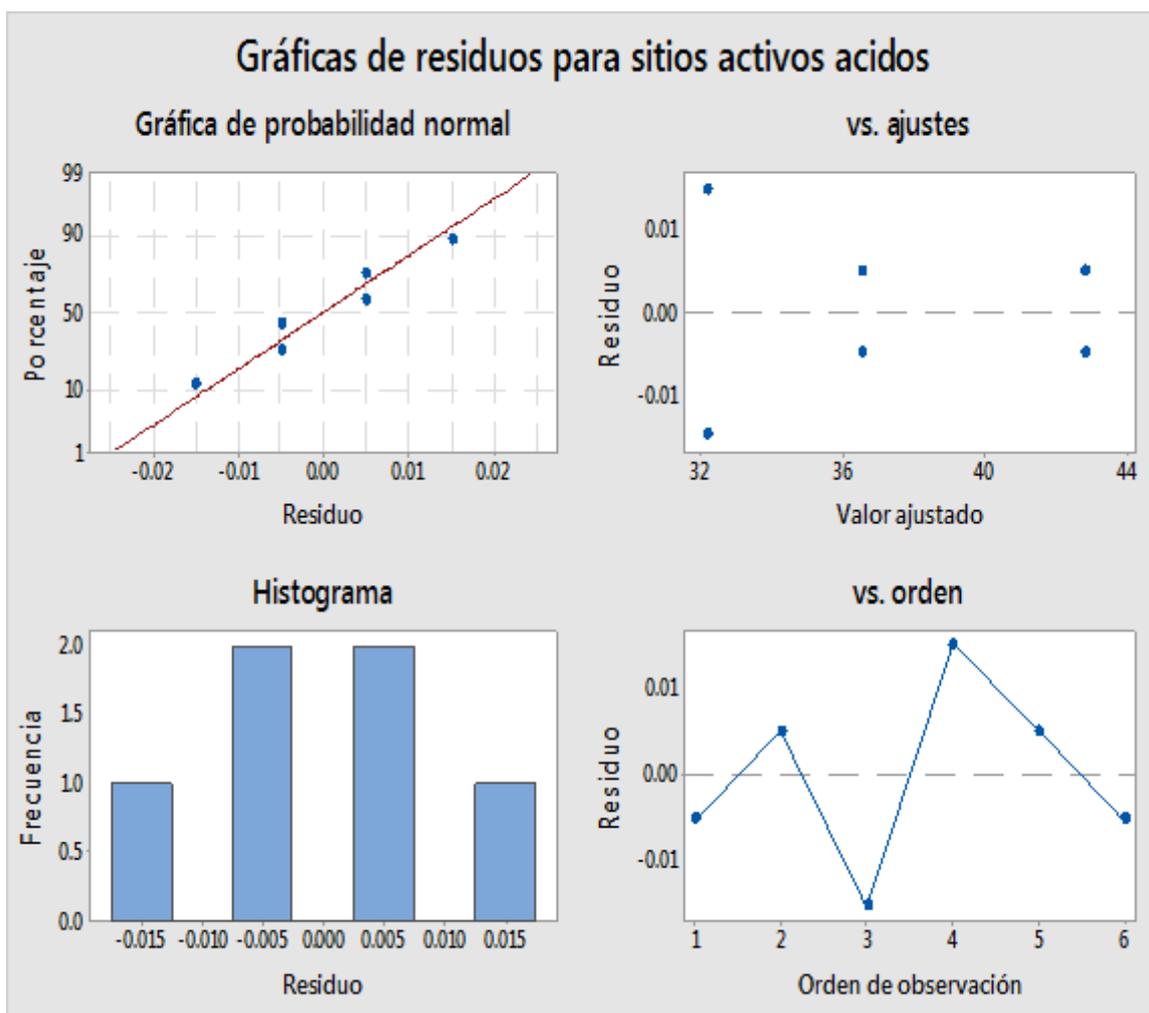
Coefficientes

| Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | FIV |
|--------------|----------|--------------|---------|---------|------|
| Constante | 37.1650 | 0.0055 | 6723.40 | 0.000 | |
| Tratamientos | | | | | |
| P500 | 5.63000 | 0.00782 | 720.19 | 0.000 | 1.33 |
| P600 | -4.97000 | 0.00782 | -635.76 | 0.000 | 1.33 |

Ecuación de regresión

sitios activos ácidos = $37.1650 + 5.63000 \text{ Tratamientos_P500} - 4.97000 \text{ Tratamientos_P600} - 0.66000 \text{ Tratamientos_P700}$

Gráficas de residuos para sitios activos ácidos



Comparaciones para sitios activos ácidos

Comparaciones por parejas de Tukey: Tratamientos

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|--------|------------|
| P500 | 2 | 42.795 | A |
| P700 | 2 | 36.505 | B |
| P600 | 2 | 32.195 | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ADSORCIÓN

Modelo lineal general: % Remoción vs. T de pirólisis; pH

Método

Codificación de factores (-1; 0; +1)

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|----------------|------|---------|---------------|
| T de pirólisis | Fijo | 3 | 500; 600; 700 |
| pH | Fijo | 3 | 4; 7; 10 |

Fuente: Elaboración propia

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-------------------|----|-----------|-----------|----------|---------|
| T de pirolisis | 2 | 491.7 | 245.9 | 203.33 | 0.000 |
| pH | 2 | 50744.7 | 25372.3 | 20982.37 | 0.000 |
| T de pirólisis*pH | 4 | 983.7 | 245.9 | 203.37 | 0.000 |
| Error | 18 | 21.8 | 1.2 | | |
| Total | 26 | 52241.8 | | | |

Fuente: Elaboración propia

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|---------|---------|-----------------------|-------------------|
| 1.09965 | 99.96% | 99.94% | 99.91% |

Fuente: Elaboración propia

Coeficientes

| Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | FIV |
|-------------------|---------|--------------|---------|---------|------|
| Constante | 45.779 | 0.212 | 216.32 | 0.000 | |
| T de pirólisis | | | | | |
| 500 | -5.803 | 0.299 | -19.39 | 0.000 | 1.33 |
| 600 | 4.338 | 0.299 | 14.49 | 0.000 | 1.33 |
| pH | | | | | |
| 4 | -59.431 | 0.299 | -198.58 | 0.000 | 1.33 |
| 7 | 16.672 | 0.299 | 55.70 | 0.000 | 1.33 |
| T de pirólisis*pH | | | | | |
| 500 4 | -4.932 | 0.423 | -11.65 | 0.000 | 1.78 |
| 500 7 | -4.566 | 0.423 | -10.79 | 0.000 | 1.78 |
| 600 4 | 5.483 | 0.423 | 12.95 | 0.000 | 1.78 |
| 600 7 | 5.711 | 0.423 | 13.49 | 0.000 | 1.78 |

Comparaciones para % Remoción

Comparaciones por parejas de Tukey: T de pirólisis

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| T de pirolisis | N | Media | Agrupación | | |
|----------------|---|---------|------------|---|---|
| 600 | 9 | 50.1166 | A | | |
| 700 | 9 | 47.2434 | | B | |
| 500 | 9 | 39.9757 | | | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones por parejas de Tukey: pH

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| pH | N | Media | Agrupación | | |
|----|---|----------|------------|---|---|
| 10 | 9 | 88.5378 | A | | |
| 7 | 9 | 62.4501 | | B | |
| 4 | 9 | -13.6521 | | | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Fuente: Elaboración propia

Comparaciones por parejas de Tukey: T de pirólisis*pH

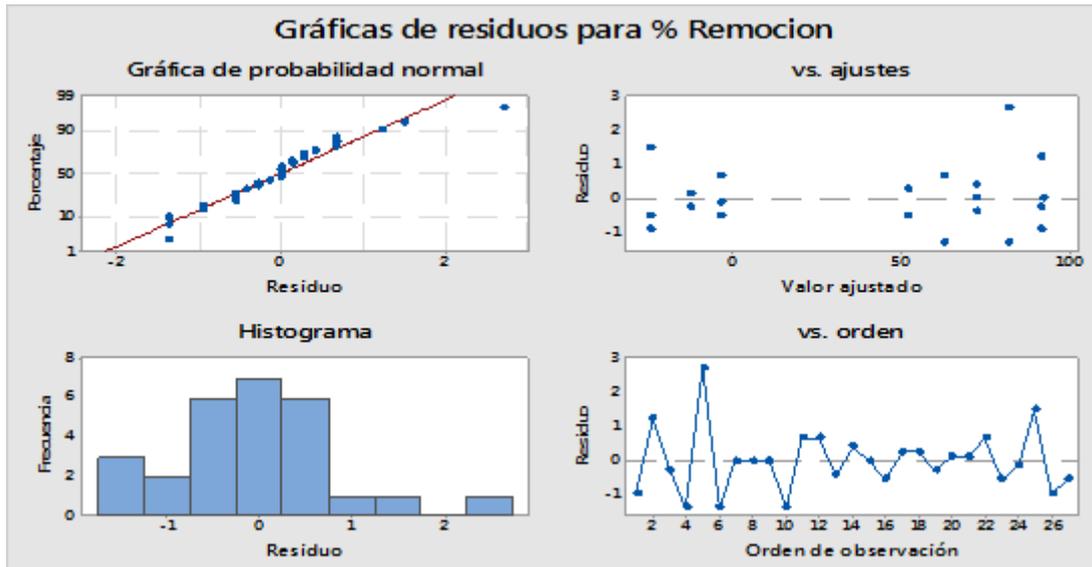
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| T de pirólisis*pH | N | Media | Agrupación | | | | | | | |
|-------------------|---|----------|------------|---|---|---|---|---|---|---|
| 500 10 | 3 | 92.2332 | A | | | | | | | |
| 700 10 | 3 | 91.6988 | A | | | | | | | |
| 600 10 | 3 | 81.6812 | | B | | | | | | |
| 600 7 | 3 | 72.4996 | | | C | | | | | |
| 700 7 | 3 | 62.7699 | | | | D | | | | |
| 500 7 | 3 | 52.0808 | | | | | E | | | |
| 600 4 | 3 | -3.8310 | | | | | | F | | |
| 700 4 | 3 | -12.7385 | | | | | | | G | |
| 500 4 | 3 | -24.3868 | | | | | | | | H |

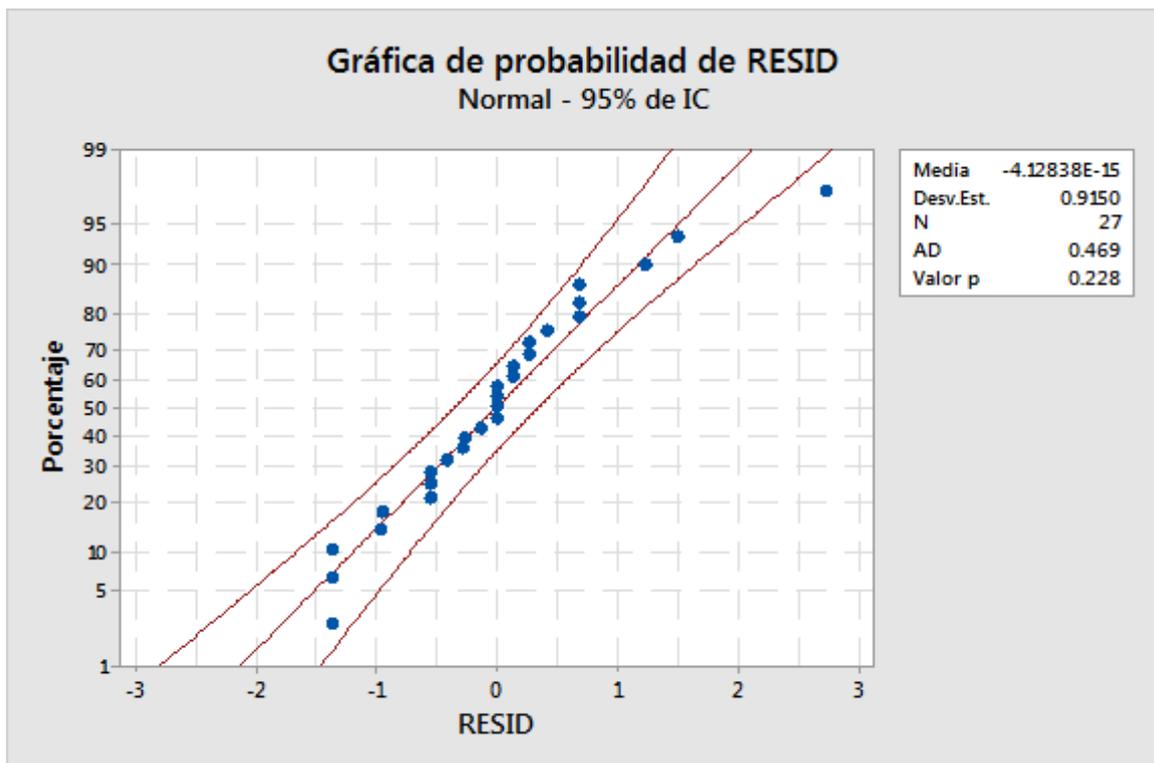
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Fuente: Elaboración propia

Gráficas de residuos para % Remoción



Gráfica de distribución de los residuales para la variable respuesta % de Remoción (normal)



Prueba de igualdad de varianzas: % Remoción vs. T de pirólisis; pH

Método

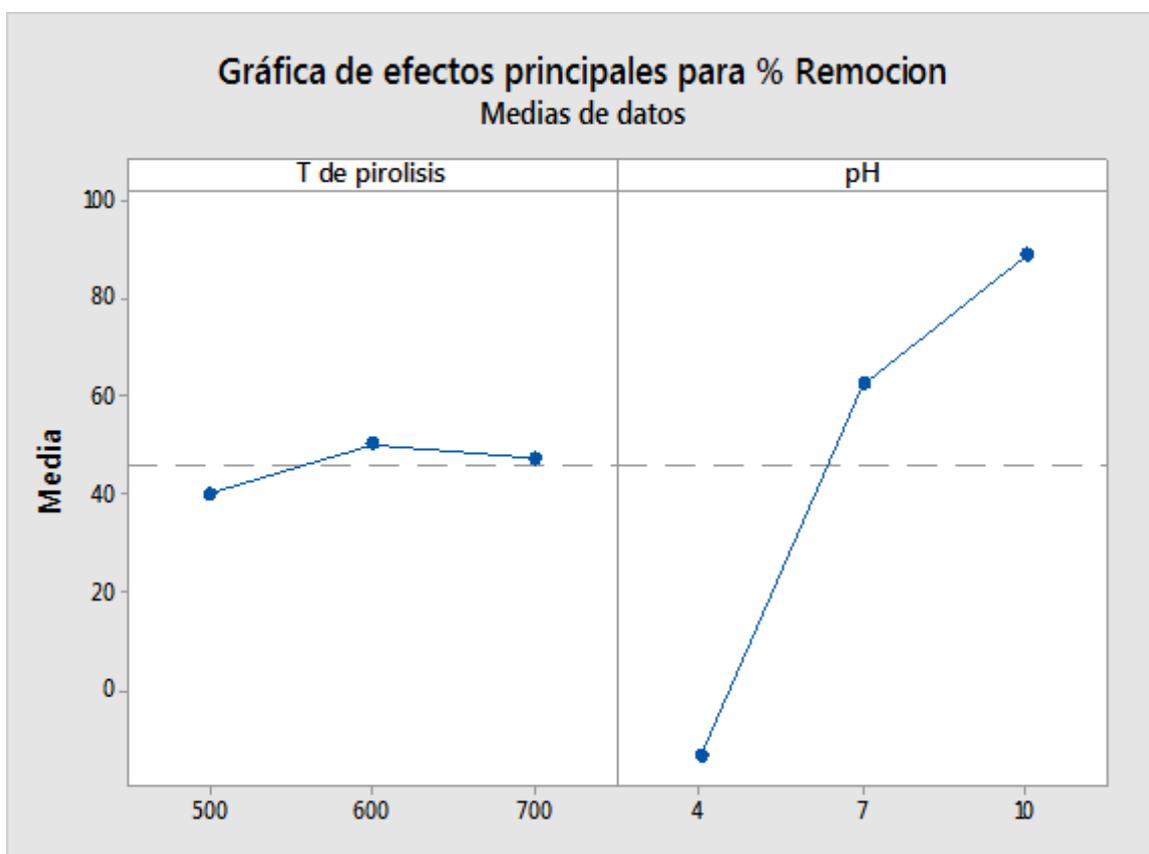
| | |
|------------------------|--|
| Hipótesis nula | Todas las varianzas son iguales |
| Hipótesis alterna | Por lo menos una varianza es diferente |
| Nivel de significancia | $\alpha = 0.05$ |

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

Pruebas

| Método | Estadística de prueba | Valor p |
|----------|-----------------------|---------|
| Bartlett | 11.26 | 0.128 |

Fuente: Elaboración propia



Modelo lineal general: Adsorción vs. T de pirólisis; pH

Método

Codificación de factores (-1; 0; +1)

Información del factor

| Factor | Tipo | Niveles | Valores |
|----------------|------|---------|---------------|
| T de pirólisis | Fijo | 3 | 500; 600; 700 |
| pH | Fijo | 3 | 4; 7; 10 |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-------------------|----|-----------|-----------|----------|---------|
| T de pirólisis | 2 | 0.001106 | 0.000553 | 203.33 | 0.000 |
| pH | 2 | 0.114175 | 0.057088 | 20982.37 | 0.000 |
| T de pirolisis*pH | 4 | 0.002213 | 0.000553 | 203.37 | 0.000 |
| Error | 18 | 0.000049 | 0.000003 | | |
| Total | 26 | 0.117544 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|-----------|---------|-----------------------|-------------------|
| 0.0016495 | 99.96% | 99.94% | 99.91% |

Coeficientes

| Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | FIV |
|-------------------|-----------|--------------|---------|---------|------|
| Constante | 0.068668 | 0.000317 | 216.32 | 0.000 | |
| T de pirólisis | | | | | |
| 500 | -0.008704 | 0.000449 | -19.39 | 0.000 | 1.33 |
| 600 | 0.006507 | 0.000449 | 14.49 | 0.000 | 1.33 |
| pH | | | | | |
| 4 | -0.089146 | 0.000449 | -198.58 | 0.000 | 1.33 |
| 7 | 0.025007 | 0.000449 | 55.70 | 0.000 | 1.33 |
| T de pirólisis*pH | | | | | |
| 500 4 | -0.007398 | 0.000635 | -11.65 | 0.000 | 1.78 |
| 500 7 | -0.006850 | 0.000635 | -10.79 | 0.000 | 1.78 |
| 600 4 | 0.008225 | 0.000635 | 12.95 | 0.000 | 1.78 |
| 600 7 | 0.008567 | 0.000635 | 13.49 | 0.000 | 1.78 |

COMPARACIONES PARA LA ADSORCIÓN

Comparaciones por parejas de Tukey: T de pirólisis

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| T de pirólisis | N | Media | Agrupación | | |
|----------------|---|-----------|------------|---|---|
| 600 | 9 | 0.0751749 | A | | |
| 700 | 9 | 0.0708651 | | B | |
| 500 | 9 | 0.0599636 | | | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

Fuente: Elaboración propia

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Comparaciones por parejas de Tukey: pH

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| pH | N | Media | Agrupación | | |
|----|---|-----------|------------|---|---|
| 10 | 9 | 0.132807 | A | | |
| 7 | 9 | 0.093675 | | B | |
| 4 | 9 | -0.020478 | | | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

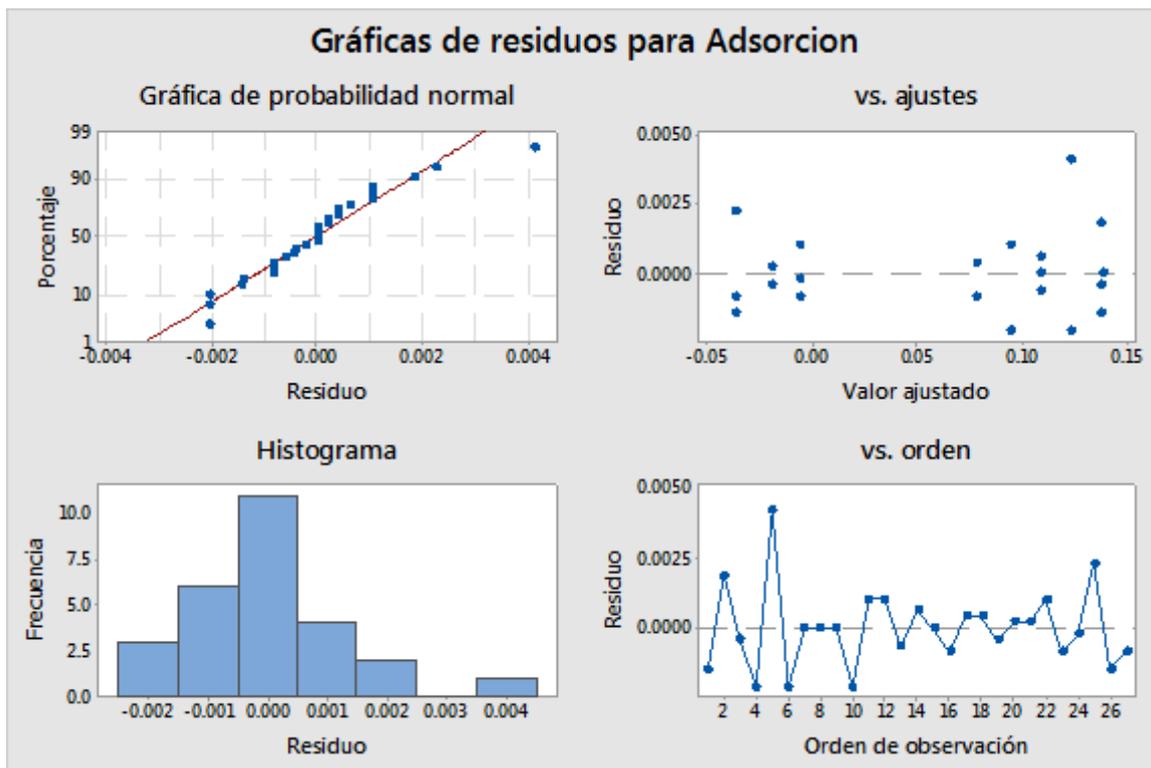
Comparaciones por parejas de Tukey: T de pirólisis*pH

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

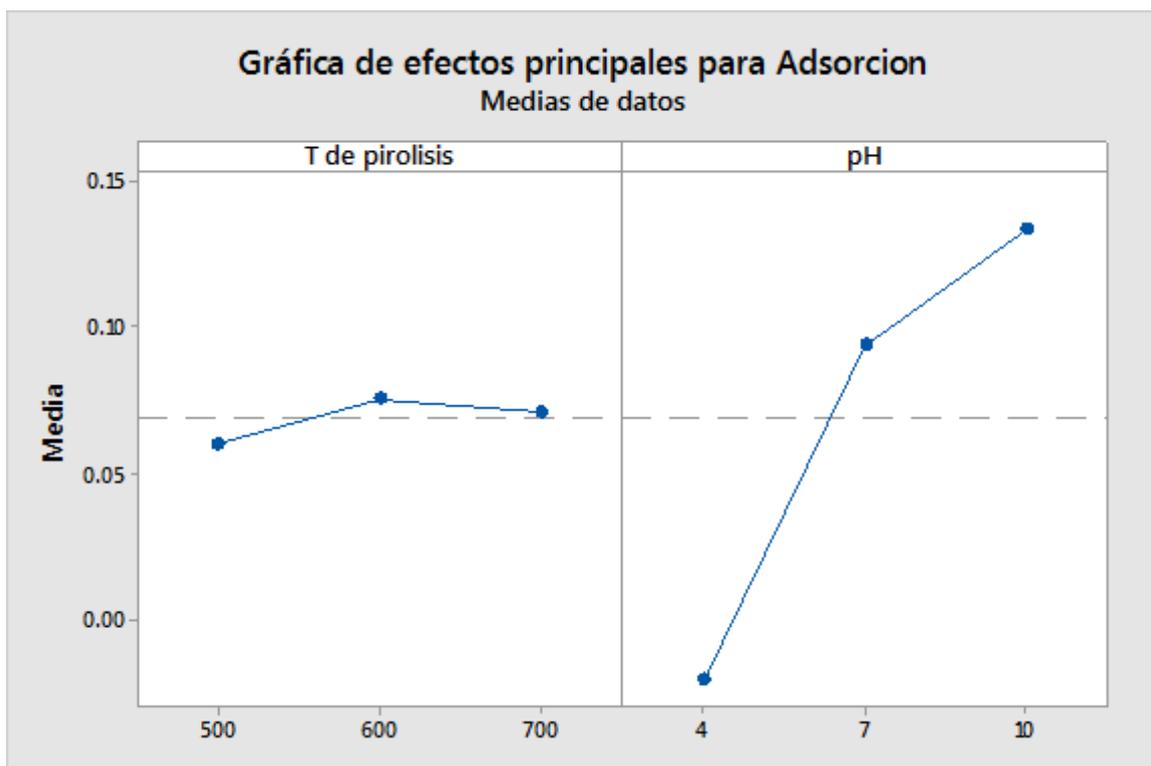
| T de pirólisis*pH | N | Media | Agrupación | | | | | | | |
|-------------------|---|-----------|------------|---|---|---|---|---|---|---|
| 500 10 | 3 | 0.138350 | A | | | | | | | |
| 700 10 | 3 | 0.137548 | A | | | | | | | |
| 600 10 | 3 | 0.122522 | | B | | | | | | |
| 600 7 | 3 | 0.108749 | | | C | | | | | |
| 700 7 | 3 | 0.094155 | | | | D | | | | |
| 500 7 | 3 | 0.078121 | | | | | E | | | |
| 600 4 | 3 | -0.005747 | | | | | | F | | |
| 700 4 | 3 | -0.019108 | | | | | | | G | |
| 500 4 | 3 | -0.036580 | | | | | | | | H |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Gráficas de residuos para Adsorción

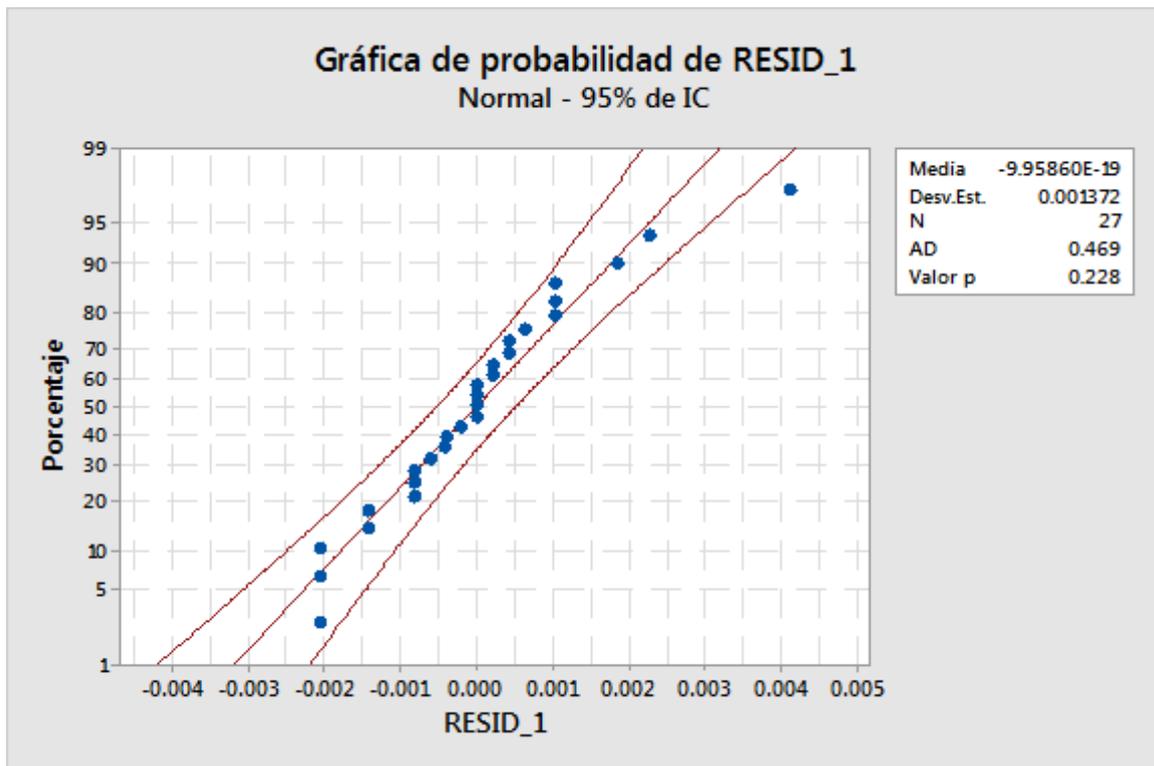


Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Gráfica de distribución de los residuales para la variable respuesta Capacidad de Adsorción (normal)



Prueba de igualdad de varianzas: Adsorción vs. T de pirólisis; pH

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

Pruebas

| Método | Estadística de prueba | Valor p |
|----------|-----------------------|---------|
| Bartlett | 11.26 | 0.128 |

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3. GALERÍA FOTOGRÁFICA



Secado de la cáscara de plátano



Determinación de puntos de carga



Prueba de adsorción por lotes



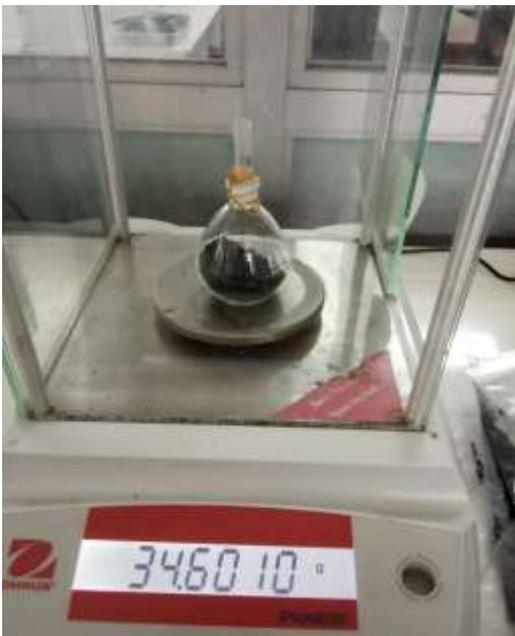
Pirolizado del adsorbente en mufla



Determinación de cenizas



Procedimiento de leído a 690 nm



Determinación de densidad



Pesado de adsorbente

