

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental**



*Una Institución Adventista*

**Adsorción del sulfuro de hidrógeno aplicando un ecodiseño de  
carbones activos a partir de lodos del reactor  
upflow anaerobic sludge blanket**

**Tesis para optar el grado académico de Ingeniero Ambiental**

**Por**

Soledad Torres Calderón

**Asesor**

PhD. Noé Benjamín Pampa Quispe

**Lima, Noviembre del 2018**

## PRODUCCION CIENTIFICA

**2015**

**Tratamiento de las Aguas de la Laguna “Mansion” Mediante la especie Eichhorniacrassipes, para el riego de Areas Verdes en la Universidad Peruana Union**

Milda A. Cruz H., N. Carbo, Javier L.L. Gonzales, G.M. Tito, K. Depaz, Soledad Torres -Calderón, R. Nuñez, J. Torres, W. Quispe.

*IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science (IOSR-JAVS)*

**2016**

**Water treatment using Eichhornia crassipes and avifauna control in the "La Mansión" pond**

Milda A. Cruz H., Natalí Carbo B., Javier Linkolk López-Gonzales\*, K. Depaz, Gina M. Tito T., Soledad Torres-Calderón

*En proceso de Publicación Revista indexada en SCOPUS*

**2017**

**Adsorción del sulfuro de hidrógeno del biogás producido en el reactor UASB mediante virutas de hierro para su reaprovechamiento energético**

Soledad Torres-Calderón; Michel Paucar-Palomino; Noé Benjamin Pampa-Quispe

*Ganador de la VII Jornada UPeU-2018- En proceso de publicación Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Cuba -Scielo*

**Eficiencia del sistema Doyoo Yookasoo para la depuración de aguas residuales domésticas**

Soledad Torres-Calderón; Jacky Cisneros Gomez ; J. Noe Huaraca Fernandez

*Presentado en el CONACIN-2017-En proceso de publicación revista Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo-UPeU*

**Asociación de cultivos, maíz y leguminosas para la conservación de la fertilidad del suelo**

Soledad Torres-Calderón; Huaraca J.; Laura D. y Crisostomo R.

*Presentado en el CONACIN-2017-En proceso de publicación revista Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo-UPeU*

**2018**

**Adsorción del sulfuro de hidrógeno mediante carbón activo producido por regeneración de lodos provenientes de un Uplow Anaerobic Sludge Blanket**

Soledad Torres-Calderón<sup>1</sup>, Noé Benjamín Pampa-Quispe<sup>2</sup>

*En proceso de Publicación Revista Ingeniería e Investigación-Colombia-ISSN 2248-8723*

**Development of an ecodesign of active carbons from sludge of a PTAR for the adsorption of H<sub>2</sub>S**

Soledad Torres-Calderón<sup>1</sup>, Noé Benjamín Pampa-Quispe<sup>2</sup>; Milda A. Cruz-Huaranga<sup>3</sup>

*Sometido a la Revista Facultad de Ingeniería-Antioquia- ISSN 0120-6230*

**DECLARACIÓN JURADA**  
**DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS**

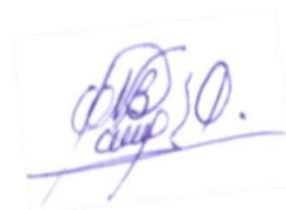
Noé Benjamín Pampa Quispe, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: “**Adsorción del sulfuro de hidrógeno aplicando un ecodiseño de carbones activos a partir de lodos del reactor *upflow anaerobic sludge blanket***” constituye la memoria que presenta la Bachiller Soledad Torres Calderón para aspirar al título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Lima, 07 de noviembre del 2018



Noé Benjamín Pampa Quispe

Adsorción del sulfuro de hidrógeno aplicando un ecodiseño de  
carbones activos a partir de lodos del reactor upflow anaerobic sludge  
blanket

# TESIS

Presentada para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

## JURADO CALIFICADOR

  
Mg. Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez  
Presidenta

  
Mg. Joel Hugo Fernández Rojas  
Secretario

  
Mg. Milda Amparo Cruz Huarenga  
Vocal

  
Mg. Jackson Edgardo Pérez Capiro  
Vocal

  
Dr. Noé Benjamín Pampa Quispe  
Asesor

Lima, 04 de octubre de 2016

## DEDICATORIA

### A DIOS:

(Quien permite conocer a los hombres los enigmas de su creación)

Compañero de todos mis días, quien siempre estuvo a mi lado en los momentos tristes y llenos de alegría, aquel que siempre me dio la fuerza, la sabiduría y seguridad para proseguir, el que hizo posible la culminación de esta investigación de formas diversas.

### A MI FAMILIA

A mis queridos padres,

**Melquiades Torres** y **Rebeca Calderón** por su apoyo moral, entusiasmo y entrega total para conmigo y hermanos: **Renso Torres** (mi amado crítico), consejero y amigo, **Helmon** y **Rómulo Torres** por su apoyo continuo, enseñanzas y ánimo constante, en el periodo del desarrollo de esta investigación y mi preciada hermanita **Shaumi Torres** por ser la razón para lograr objetivos trazados.

Para ustedes entrego todo lo que tengo:

MI CARIÑO, AMISTAD Y CONSIDERACIÓN

## AGRADECIMIENTOS

A Dios porque fue la providencia continúa para dar por culminado la presente tesis, por darme la sabiduría, paciencia y fortaleza durante el desarrollo de la investigación.

Asimismo, agradecer a la inestimable cooperación de personas valiosas para esta investigación: En primera instancia a mi asesor Dr. Noé Benjamín Pampa Quispe por su apoyo, asesoramiento, disponibilidad de tiempo para las observaciones, enseñanzas y la voluntad de ver terminado la presente investigación.

A mis padres Melquiades y Rebeca, hermanos en especial Renso Torres por el apoyo económico para la ejecución de la investigación y ánimo constante para la finiquitación de la tesis.

Al Ing. Guillermo Briseño por su apoyo en los valiosos criterios para la ejecución de las pruebas de laboratorio.

Al director general Rolando Carmen de la Empresa G.D.S del Perú por la disponibilidad de cooperación en el análisis de muestras.

Al encargado directo de laboratorio Especializado de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería Ing. Clemente Luyo por apostar por la investigación y el análisis respectivo de muestras.

Al Dr. Juan Jesús Soria Quinjaite por su cooperación en el manejo de software y aplicación matemática de datos.

A las Ingeniero Ginnie Díaz Ruiz, Marita de la Cruz Vega por incrementar criterios valiosos para la investigación a partir de sus experiencias de campo, de igual forma al Ing. Victor Cerrón Serpa.

A la Lic. Gina Tito Tolentino, Mg. Milda A. Cruz Huaranga, Mg. Natalí Carbo Bustinza y MSc. Linkolk López Gonzales, por contribuir en iniciarme en la investigación e incentivo de la pronta ejecución de la tesis.

Finalmente, a mis amigos(as) y colaboradores de Investigación Aaraon Jhonatan Huamán Santa Cruz, Jhumeyne Estefanía de la Cruz y Suymi Pilar Soto Yarasca por su apoyo desinteresado de tiempo y dedicación en las pruebas de laboratorio.

*“Si pudiera enumerar cuanto debo a mis grandes antecesores y contemporáneos no me quedaría mucho en propiedad”, para todos ellos(as) mis más sinceros agradecimientos*

*(Goethe)*



## RESUMEN GENERAL

El problema de gases tóxicos para la atmósfera en especial del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) es una de las problemáticas medioambientales críticas por su alta toxicidad. La búsqueda de tecnologías limpias que aporten a la preservación del medio ambiente, conlleva a realizar esta investigación, por ello la presente investigación tiene por finalidad eliminar el  $H_2S$ , mediante la adsorción empleando carbones activos obtenidos a partir de lodos de un reactor UASB. El sistema de adsorción  $H_2S$  se realizó a escala piloto en el laboratorio de Química de la Universidad Peruana Unión, constituida por la zona de generación de  $H_2S$ , almacén y dilución del  $H_2S$  y torres de lecho fijo. Para esta última se elaboró 6 carbones activos a condiciones diferentes de temperaturas de pirolización (TP) y [M] de KOH teniendo como material precursor lodos secos provenientes de un UASB de CITRAR-FIA-UNI. La adsorción del  $H_2S$  se determinó mediante % de eficiencia de adsorción de los carbones activos (C.A) a TP 700 °C/1M, TP 700 °C/4M, C.A TP 500 °C/4M, C.A TP 500 °C/1M y CA TP 600 °C/2.5 M elaborados en laboratorio, asimismo se empleó C.A comercial y Blanco (lodo seco residual). Para determinar la adsorción del  $H_2S$  se realizaron 11 ensayos para cada medio adsorbente. Los resultados obtenidos fueron analizados mediante anova factorial, diseño factorial  $2^2$  y  $3^2$  y test-dependientes a un 99 % de nivel de confianza; de ello se obtuvo que todos los datos fueron significativos y el parámetro de mayor influencia para la adsorción del  $H_2S$  fue la TP. Para demostrar la eficiencia de adsorción, además se calculó la capacidad de adsorción de los C.A mediante la integración aplicando el software Matlab, asimismo la caracterización de la porosidad mediante Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido, de ello se afirma que la adsorción del  $H_2S$  mediante carbones activos del material precursor lodos residuales es eficiente teniendo un 94 % de remoción. Por tanto, la adsorción del  $H_2S$  mediante carbones

activos de lodos es una nueva alternativa viable y sostenible para el ambiente ya que involucra la minimización, recuperación y reutilización de residuos.

**Palabras Clave:** Adsorción, sulfuro de hidrógeno, material precursor y carbones activos

## ABSTRACT

The problem of odors, especially hydrogen sulphide, is one of the critical environmental problems due to its high toxicity. The search for clean technologies that contribute to the preservation of the environment, led to this research, so the present investigation its purpose is eliminate hydrogen sulfide by adsorption using active carbons obtained from sludge from a UASB reactor. The H<sub>2</sub>S adsorption system was carried out on a pilot scale in the Chemistry laboratory of the Universidad Peruana Unión, constituted by the zone of H<sub>2</sub>S generation, storage and dilution of the H<sub>2</sub>S, fixed bed towers. For the latter, 6 active carbons were prepared at different conditions of pyrolyzation temperatures (TP) and [M] of KOH, with dry sludge from a UASB from CITRAR-FIA-UNI as the precursor material. The adsorption of H<sub>2</sub>S was determined by % of adsorption efficiency of active carbons (CA) at TP 700 ° C / 1M, TP 700 ° C / 4M, CA TP 500 ° C / 4M, CA TP 500 ° C / 1M and CA TP 600 ° C / 2.5 M. Made in the laboratory, also commercial and white (residual dry sludge) was used to determine the adsorption of the H<sub>2</sub>S re performed 11 tests for each adsorbent medium. The results obtained were analyzed by factorial anova, factorial design 2<sup>2</sup> and 3<sup>2</sup> and test-dependent at a 99% level of confidence; from this it was obtained that all the data were significant and the parameter of greatest influence for the adsorption of H<sub>2</sub>S was the TP. To demonstrate the adsorption efficiency, the adsorption capacity of the CA was also calculated through the integration applying Matlab, as well as the characterization of the porosity by Scanning Electron Microscopy Analysis, it is affirmed that the adsorption of the H<sub>2</sub>S by means of activated carbons of material precursor residual sludge is efficient having 94% removal. Therefore, the adsorption of H<sub>2</sub>S by activated carbons of sludge is a new viable and sustainable alternative for the environment since it involves the minimization, recovery and reuse of waste.

**Keywords:** Adsorption, hydrogen sulfide, precursor material and active coals

## ÍNDICE GENERAL

TITULO GENERAL	
PRODUCCION CIENTIFICA.....	I
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
RESUMEN GENERAL.....	VII
ABSTRACT GENERAL.....	X
INDICE.....	XI
INDICE DE TABLAS.....	XV
INDICE DE FIGURAS.....	XVIII
NOMENCLATURA.....	XXII
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo general.....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	4
CAPITULO II.....	5
REVISION BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Antecedentes.....	5
2.2. Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S).....	6
2.2.1. Fuentes de Generación de sulfuro de Hidrógeno.....	7
2.2.2. Propiedades del sulfuro de Hidrógeno.....	12
2.2.3. Carácter tóxico del H <sub>2</sub> S.....	12
2.2.4. Efectos del H <sub>2</sub> S.....	13
2.3. Tecnologías de Tratamiento.....	17

2.3.1. Técnicas de tratamiento de malos olores .....	17
2.4. Carbón Activado .....	22
2.4.1. Propiedades químicas.....	24
2.4.2. Estructura Física.....	24
2.4.3. Adsorción vía Carbón Activado.....	25
2.5. Regeneración de Adsorbentes.....	25
2.5.1. Factores a considerar en la producción de carbón activo .....	26
2.5.2. Técnicas de regeneración de Carbón Activo .....	26
2.5.3. Material Precursor.....	31
CAPITULO III.....	38
ADSORCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO MEDIANTE CARBÓN ACTIVO PRODUCIDO POR REGENERACIÓN DE LODOS PROVENIENTES DE UN <i>UPFLOW</i> <i>ANAEROBIC SLUDE BLANKET</i> .....	38
3.1. Introducción .....	39
3.2. Material y métodos .....	41
3.2.1. Lugar de ejecución.....	41
3.2.2 Muestra .....	41
3.2.3. Área de Estudio del material precursor.....	41
3.2.4. Materiales y Equipos.....	42
3.2.5. Metodología .....	42
3.2.6. Procedimientos.....	45
3.2.7. Monitoreo.....	48
3.2.8. Diseño, variables de estudio y análisis estadístico.....	50
3.3. Resultados y Discusión .....	53

3.3.1. Características del Material Precursor. ....	54
3.3.2. Características de los medios adsorbentes obtenidos.....	54
3.3.3. Determinación de las eficiencias de adsorción .....	56
3.3.4. Análisis Estadístico descriptivo de las pruebas preliminares.....	60
3.3.5. Análisis del diseño estadístico DOE Factorial 2 <sup>2</sup> .....	67
3.3.6. Análisis estadístico DOE Factorial 3 <sup>2</sup> Simulación y predicción de H <sub>2</sub> S.....	71
3.4. Conclusión .....	74
Referencias Bibliográficas .....	75
 CAPITULO IV.....	 82
 DESARROLLO DE UN ECODISEÑO DE CARBONES ACTIVOS A PARTIR DE LODOS DE UNA PTAR PARA LA ADSORCIÓN DEL H <sub>2</sub> S .....	  82
4.1. Introducción .....	83
4.2. MATERIAL Y MÉTODOS.....	84
4.2.1. Área de Estudio del material precursor.....	84
4.2.2. Material Precursor.....	84
4.2.3. Procedimientos.....	85
4.2.4. Caracterización .....	86
4.2.5. Diseño estadístico descriptiva y test de normalidad .....	90
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	90
4.3.1. Aplicación de los carbones activos como medio de adsorción para el H <sub>2</sub> S.....	90
4.3.2. Determinación de la capacidad de Adsorción mediante la Integración.....	92
4.3.3. Determinación de la porosidad mediante Análisis SEM de los C.A .....	98
4.3.4. Análisis Estadístico Descriptivo .....	108
4.4. Conclusión .....	110

Referencias Bibliográficas .....	111
CAPITULO V .....	114
5.1. CONCLUSIONES GENERALES .....	114
5.2. RECOMENDACIONES GENERALES .....	115
6. ANEXOS .....	116
6.1. ANEXO I- Implementación del proyecto de Investigación.....	116
6.2. ANEXO II- Cálculos.....	126
6.3. ANEXO III-Resultados del Monitoreo .....	130
6.4. ANEXO IV-Análisis Estadístico .....	138
6.5. ANEXO V-Aplicación del Software “Matlab” .....	149
6.6. ANEXO VI-Operación y Mantenimiento, Documentaciones y Planos.....	169

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentraciones típicas de H <sub>2</sub> S en biogás .....	12
Tabla 2. Efectos sobre la salud por la exposición del H <sub>2</sub> S .....	14
Tabla 3. Efectos a la salud por exposición a sulfuro de hidrógeno .....	15
Tabla 4. Efectos a distintas concentraciones de sulfuro de hidrógeno H <sub>2</sub> S .....	16
Tabla 5. Tecnologías de tratamiento biológico de la fase gaseosa .....	1
Tabla 6. Tecnologías de eliminación de H <sub>2</sub> S de biogás .....	18
Tabla 7. Principales parámetros y sus efectos en la etapa de carbonización .....	27
Tabla 8. Principales reacciones del hidróxido y los átomos de carbono .....	30
Tabla 9. Composición química de lodos producidos y tratados .....	35
Tabla 10. Cantidad de insumos a utilizar para la generación del <b>H<sub>2</sub>S</b> .....	43
Tabla 11. Datos para el diseño de las torres de lecho fijo.....	44
Tabla 12. Características del material de las torres de lecho fijo.....	44
Tabla 13. Proceso de la regeneración del lodo de una PTAR.....	47
Tabla 14. Factorial variable codificados y no codificados .....	51
Tabla 15. Características del Material Precursor .....	54
Tabla 16. Características de las condiciones de obtención de los medios adsorbentes .....	54
Tabla 17. Variación de pesos en gr en el proceso de obtención de los carbones Activos .....	55
Tabla 18. Carbón Activo obtenido a una TP 500 °C y A.A de 1M KOH.....	57
Tabla 19. Carbón Activo obtenido a una TP 500 °C y A.A de 4 M KOH.....	57
Tabla 20. Carbón Activo obtenido a una TP 700 °C y A.A de 1M KOH.....	58
Tabla 21. Carbón Activo obtenido a una TP 700 °C y A.A de 4 M KOH.....	59
Tabla 22. Niveles de las variables independientes y valores experimentales de la variable ...	63
Tabla 23. Carbón Activo obtenido a una TP 600 °C y A.A de 2.5 M KOH.....	64



Tabla 24. Carbón Activo obtenido a una TP 600 °C y A.A de 2.5 [M] KOH.....	64
Tabla 25. DOE Superficie de respuesta Factorial 3 <sup>2</sup> +pc.....	71
Tabla 26. Proceso de la regeneración del lodo de una PTAR.....	85
Tabla 27. Análisis del precursor de los carbones activos .....	89
Tabla 28. Eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S mediante carbón activo comercial .....	90
Tabla 29. Eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S mediante lodo seco .....	91
Tabla 30. Capacidad de Adsorción de los carbones activos .....	92
Tabla 31. Resultados C.A a TP: 500 °C y [] A.A de KOH 1 M en la adsorción del H <sub>2</sub> S ....	130
Tabla 32. Resultados C.A a TP: 500 °C y [] A.A de KOH 4 M en la adsorción del H <sub>2</sub> S .....	131
Tabla 33. Resultados C.A a TP: 700 °C y [] A.A de KOH 4M en la adsorción del H <sub>2</sub> S .....	132
Tabla 34. Resultados C.A a TP: 700 °C y [] A.A de KOH 1M en la adsorción del H <sub>2</sub> S .....	133
Tabla 35. Resultados C.A a TP: 600 °C y [] A.A de KOH 2.5 M en la adsorción del H <sub>2</sub> S ..	134
Tabla 36. Resultados C.A a TP: 600 °C y [] A.A de KOH 2.5 M en la adsorción del H <sub>2</sub> S ..	135
Tabla 37. Monitoreo realizado del carbón activo comercial en la adsorción del H <sub>2</sub> S.....	136
Tabla 38. Resultados del lodo seco de una PTAR en la adsorción del H <sub>2</sub> S .....	137
Tabla 39. Anova Factorial.....	138
Tabla 40. Anova Factorial del diseño Factorial 2 <sup>2</sup> .....	139
Tabla 41. Análisis de Varianza para la adsorción del H <sub>2</sub> S .....	140
Tabla 42. Coeficiente de regresión para el modelo polinomial .....	140
Tabla 43. Prueba de Test de la adsorción del H <sub>2</sub> S del lodo residual seco .....	141
Tabla 44. Adsorción del H <sub>2</sub> S del carbón activo obtenido a TP 500°C Y A.A de 1 M.....	141
Tabla 45. Adsorción del H <sub>2</sub> S del carbón activo obtenido a TP 500°C Y A.A de 4 M .....	141
Tabla 46. Adsorción del H <sub>2</sub> S del carbón activo obtenido a TP 700°C Y A.A de 1 M .....	142
Tabla 47. Adsorción del H <sub>2</sub> S del carbón activo obtenido a TP 700°C Y A.A de 4 M .....	142
Tabla 48. Adsorción del H <sub>2</sub> S del carbón activo obtenido a TP 600°C Y A.A de 2.5 M.....	142

Tabla 49. Adsorción del H <sub>2</sub> S del carbón activo Comercial.....	142
Tabla 50. Capacidad de Adsorción del CA TP 500 °C/ 1M KOH .....	161
Tabla 51. Capacidad de Adsorción del CA TP 500 °C/ 4 M KOH .....	162
Tabla 52. Capacidad de Adsorción del CA TP 700 °C/ 1 M KOH .....	163
Tabla 53. Capacidad de Adsorción del CA TP 700 °C/ [4M] KOH.....	164
Tabla 54. Capacidad de Adsorción del CA TP 600 °C/ 2.5 M KOH .....	165
Tabla 55. Capacidad de Adsorción del CA TP 600 °C/ 2.5 M KOH .....	166
Tabla 56. Capacidad de Adsorción del Carbón Activo Comercial .....	167
Tabla 57. Capacidad de Adsorción del Blanco .....	168
Tabla 58. Materiales y equipos para la generación y almacén del H <sub>2</sub> S .....	169
Tabla 59. Materiales y/o equipos y reactivos para la determinación del H <sub>2</sub> S.....	169
Tabla 60. Implementación de las Torres de lecho fijo.....	170
Tabla 61. Materiales para la obtención del medio adsorbente.....	171
Tabla 62. Operación del Sistema de Adsorción del sulfuro de hidrógeno.....	172
Tabla 63. Frecuencia de Monitoreo .....	172

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Generación del H <sub>2</sub> S en un reactor anaerobio.....	9
<b>Figura 2.</b> Proceso de generación del H <sub>2</sub> S en un reactor anaerobio .....	10
<b>Figura 3.</b> Reacciones químicas para la generación del H <sub>2</sub> S en un reactor anaerobio .....	11
<b>Figura 4.</b> Mecanismo de adsorción de los carbones activos .. .....	21
<b>Figura 5.</b> Generación de lodos en una PTAR .....	32
<b>Figura 6.</b> Reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodo .. .....	33
<b>Figura 7.</b> Flujograma de la Planta de Tratamiento de Aguas residuales CITRAR-UNI .....	42
<b>Figura 8.</b> Diseño de las torres de lecho fijo .....	45
<b>Figura 9.</b> Proceso de la Obtención del Carbón Activado a partir de lodos de una PTAR.....	47
<b>Figura 10.</b> Proceso de diseño de investigación.....	52
<b>Figura 11.</b> Proceso del diseño de investigación.....	53
<b>Figura 12.</b> Influencia de la Temperatura de Pirolización en la adsorción del H <sub>2</sub> S .....	61
<b>Figura 13.</b> Influencia de la [] del KOH en la adsorción del H <sub>2</sub> S .....	62
<b>Figura 14.</b> Variación del Porcentaje de adsorción del H <sub>2</sub> S.....	66
<b>Figura 15.</b> Representación Gráfica de la adsorción del H <sub>2</sub> S promedio. ....	67
<b>Figura 16.</b> Significancia de los parámetros en la capacidad de adsorción del H <sub>2</sub> S .....	68
<b>Figura 17.</b> Diagrama de Superficie de respuesta del Carbón Activo óptimo .....	69
<b>Figura 18.</b> Variables significativas que influyen en la capacidad de adsorción del H <sub>2</sub> S .....	70
<b>Figura 19.</b> Diagrama de Pareto/ Significancia de parámetros para la adsorción del H <sub>2</sub> S.....	72
<b>Figura 20.</b> Predicción de H <sub>2</sub> S por superficie de respuesta.....	73
<b>Figura 21.</b> Equipo del Análisis SEM de los carbones Activos .....	89
<b>Figura 22.</b> Diagrama de la regeneración del lodo residual a carbón activado.....	89
<b>Figura 23.</b> Concentración del H <sub>2</sub> S (ppm) en el efluente .....	93

<b>Figura 24.</b> Representación Gráfica de la eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S promedio .....	94
<b>Figura 25.</b> Variación del Porcentaje de la eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S.....	95
<b>Figura 26.</b> Capacidades de Adsorción de los C.A preparados, Blanco y C.A.C .....	96
<b>Figura 27.</b> Capacidades de Adsorción de los C.A obtenidos a partir de lodos.....	96
<b>Figura 28.</b> Capacidades de Adsorción del C.A.C y Lodo Residual Seco .....	97
<b>Figura 29.</b> Superficie del C.A TP 500 °C y A.A 1M KOH a 500 x, 10 000 x y 20 000 x ....	99
<b>Figura 30.</b> Superficie del C.A TP 500 °C y A.A 4 M KOH a 5000 x, 10 000 x y 20 000 x.	100
<b>Figura 31.</b> Superficie del C.A TP 700 °C y A.A 1 M KOH a 400 x, 5 000 x y 10 000 x ...	101
<b>Figura 32.</b> Superficie del C.A TP 700 °C y A.A 4 M KOH a 5000 x, 10 000 x y 20 000 x	102
<b>Figura 33.</b> Superficie del C.A TP 600 °C y A.A 2.5 M KOH a 1000 x, 5000 x y 10 000 x	103
<b>Figura 34.</b> Superficie del C.A TP 600 °C y A.A 2.5 M KOH a 1000 x, 5000 x y 10 000 x	104
<b>Figura 35.</b> Superficie del Carbón Activo Comercial a 400 x, 5000 x y 10 000 x.....	105
<b>Figura 36.</b> Superficie del lodo residual seco proveniente de un Reactor UASB .....	106
<b>Figura 37.</b> Comparativa de la eficiencia de remoción del H <sub>2</sub> S del C.A.C y el blanco .....	123
<b>Figura 38.</b> Eficiencia de remoción del H <sub>2</sub> S del Lodo Residual y C.A 700 °C/1M.....	109
<b>Figura 39.</b> Comparativa de la eficiencia de remoción H <sub>2</sub> S del C.A.C y C.A de 700 °C/1M	110
<b>Figura 40.</b> Proceso de Adaptación del Sistema de Adsorción del H <sub>2</sub> S.....	116
<b>Figura 41.</b> Tapones de las torres de lecho fijo .....	116
<b>Figura 42.</b> Medios Adsorbentes a TP 500 y 600 °C /1,4 y 2.5 M KOH .....	117
<b>Figura 43.</b> C.A obtenidos a TP 700, 600 °C y [M] 1, 4 y 2.5 M KOH.....	117
<b>Figura 44.</b> Torres de Lecho fijo para la adsorción del H <sub>2</sub> S.....	118
<b>Figura 45.</b> Sistema de Adsorción del H <sub>2</sub> S a escala Piloto .....	118
<b>Figura 46.</b> Preparación del KOH y la dilución del HCL al 5 % .....	119
<b>Figura 47.</b> Recolección del material Precursor .....	119
<b>Figura 48.</b> Molienda, tamizado y pesado del material precursor .....	120

<b>Figura 49.</b> Impregnación y filtración del Agente Activante .....	120
<b>Figura 50.</b> Muestra impregnada con KOH para ser sometida a la estufa .....	121
<b>Figura 51.</b> Lodo seco residual con agente activante sometido a la estufa .....	121
<b>Figura 52.</b> Lavado de la muestra con HCl, luego de la pirólisis.....	122
<b>Figura 53.</b> Equipo de conservación de las muestras (desecador) .....	122
<b>Figura 54.</b> Equipo para la pirolización de los carbones activos en regeneración, mufla.....	122
<b>Figura 55.</b> Medición del pH de la muestras del proceso de obtención de C.A.....	123
<b>Figura 56.</b> Secado del material precursor lavado con HCl y en la estufa .....	123
<b>Figura 57.</b> Cantidad en gramos de los carbones activos obtenidos .....	124
<b>Figura 58.</b> Carbones Activos Producidos .....	124
<b>Figura 59.</b> Toma de muestras de la concentración de ácido sulfhídrico.....	125
<b>Figura 60.</b> Reactivos y Materiales para la determinación del Ácido sulfhídrico.....	125
<b>Figura 61.</b> Procedimiento para la determinación del Ácido Sulfhídrico .....	126
<b>Figura 62.</b> Efectos de la TP para la eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S.....	138
<b>Figura 63.</b> Efectos del Agente Activante para la eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S.....	139
<b>Figura 64.</b> Gráfica de superficie de respuesta del factorial 2 <sup>2</sup> .....	140
<b>Figura 65.</b> Pruebas de normalidad de la aplicación del blanco para la adsorción del H <sub>2</sub> S ..	143
<b>Figura 66.</b> Pruebas de normalidad del C.A TP 500 °C/1M KOH .....	143
<b>Figura 67.</b> Pruebas de normalidad del C.A TP 500 °C/4M KOH .....	144
<b>Figura 68.</b> Pruebas de normalidad del C.A TP 500 °C/4M KOH .....	144
<b>Figura 69.</b> Pruebas de normalidad del C.A TP 500 °C/4M KOH .....	145
<b>Figura 70.</b> Pruebas de normalidad del C.A TP 600 °C/ 2.5M KOH.....	145
<b>Figura 71.</b> Pruebas de normalidad del Carbón Activo Comercial .....	146
<b>Figura 72.</b> Diagrama de cajas , del blanco y C.A TP 500 °C/ 1M KOH.....	146
<b>Figura 73.</b> Diagrama de cajas ,del C.A TP 500 °C/ 4M KOH y CA TP 700 °C/1M.....	146

<b>Figura 74.</b> Remoción del H <sub>2</sub> , del C.A TP 700 °C/ 4M KOH y CA TP 600 °C/2.5M KOH	147
<b>Figura 75.</b> Diagrama de cajas de la remoción del H <sub>2</sub> S, del Carbón Activo Comercial .....	147
<b>Figura 76.</b> Comparativa de la eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S del lodo y C.A elaborado ...	148
<b>Figura 77.</b> Eficiencias menores de adsorción del H <sub>2</sub> S del Blanco, C.A.C y el C.A .....	148
<b>Figura 78.</b> Eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S C.A comercial y el C.A de mayor eficiencia....	149

## ECUACIONES

<b>Ecuación 1.</b> Reacciones químicas de la formación del H <sub>2</sub> S .....	7
<b>Ecuación 2.</b> Activación química del lodo residual con hidróxido de potasio.....	31
<b>Ecuación 3.</b> Balance de masa del reactor.....	33
<b>Ecuación 4.</b> Determinación de la acumulación de Materia Orgánica.....	34
<b>Ecuación 5.</b> Determinación del volumen del almacén del gas toxico .....	43
<b>Ecuación 6.</b> Remoción del sulfuro de hidrógeno.....	49
<b>Ecuación 7.</b> Eficiencia de la remoción del sulfuro de hidrógeno .....	49
<b>Ecuación 8.</b> Modelo lineal para DOE factorial.....	50
<b>Ecuación 9.</b> Obtención de la capacidad de adsorción.....	86

## SIMBOLOS/ NOMENCLATURA

<i>A.A</i>	Agente Activante
<i>C.A</i>	Carbón Activo
<i>C.A.C</i>	Carbón Activo Comercial
<i>C<sub>0</sub></i>	Concentración en el afluente
<i>C</i>	Concentración en el reactor
<i>C(t)</i>	Concentración del H <sub>2</sub> S en el efluente (ppm)
<i>C<sub>nv</sub></i>	Concentración de tiosulfato de sodio, mol/L
<i>g ads</i>	Gramos de adsorción
<i>g</i>	Gramos
<i>KOH</i>	Hidróxido de potasio
<i>M</i>	Peso molecular de H <sub>2</sub> S (34 mg/mmol),
<i>Mg</i>	Miligramos
[ <i>M</i> ]	Concentración molar
<i>Nm</i>	Nanómetros
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sodio
<i>Ppm</i>	Partes por millón
<i>Ph</i>	Potencial de Hidrógeno
<i>PTAR</i>	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
<i>Q</i>	Caudal m <sup>3</sup> /s
<i>r<sub>g</sub></i>	Tasa de generación
<i>r<sub>e</sub></i>	Tasa de Consumo
<i>SO<sub>2</sub></i>	Dióxido de azufre

<i>SST</i>	Sólidos Suspendidos Totales
<i>T</i>	Temperatura °C
<i>Tb</i>	Tiempo que tarda en alcanzar la concentración de ruptura fijada
<i>t</i>	Tiempo (segundos)
<i>UASB</i>	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
<i>V</i>	Volumen del reactor
<i>Vb</i>	Volumen de tiosulfato de sodio consumido por el blanco, mL
<i>V</i>	Volumen de tiosulfato de sodio consumido por la muestra, mL
<i>Vm</i>	Volumen de la alícuota de muestra, mL
<i>V<sub>M</sub></i>	Volumen molar (22,4 ml/mmol)
<i>WHO</i>	Organización Mundial de la salud
<i>W</i>	Peso del material adsorbente introducido en la columna (g)



## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

La Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU realizó un estudio de residuos peligrosos, en ella identificaron 35 de 1689 sitios con presencia de ácido sulfhídrico en el ambiente, considerando además que este número aumentaría si se incrementara la cantidad de sitios evaluados. Los sulfuros generados en los sistemas de alcantarillado de todo el mundo son uno de los problemas críticos por el mal olor que generan, asimismo en el año 1973 de una encuesta realizada a 500 plantas de tratamiento en los EE.UU, indicaron que el 40 % de las PTAR recibieron quejas sobre los olores, por la presencia del  $H_2S$ . (Harreveld, Heeres y Heeres, 2015)

En un estudio realizado se encontró que un tercio de los trabajadores expuestos al  $H_2S$  en varias industrias, experimentaron algunos síntomas sobre la exposición al gas tóxico y el 8% de ellos se volvieron inconscientes frente a la exposición del gas  $H_2S$  Jiang et al (2016). Por otro lado, en un monitoreo de  $H_2S$  realizado en una PATR de Bogotá, se encontró altas concentraciones de la misma Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (2011). Szarblewski, Schneider y Machado (2012) indican que a alta gama de contaminantes que se emiten diariamente puede producir efectos locales e inmediatos, como malos olores, efectos nocivos para la salud y también la formación de humo, o problemas globales, como la destrucción de la capa de ozono, la lluvia ácida y el efecto invernadero (TACLA, 2004). La contaminación atmosférica viene preocupando cada vez más a la sociedad, pues afecta directamente la calidad de vida de las personas (Silva, da Silva, Corrêa, y Arbilla, 2018)

La realidad muestra que la mayoría de sectores que generan el  $H_2S$  cumplen con proporcionar los equipos de protección individual a su personal, sin embargo, la mayoría dan

por caso omiso la presencia de este gas tóxico y por ende los daños que puede generar Ingenier et al.(2017). Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) del Perú no son ajenas a ello ya que para las poblaciones del área de influencia directa de las fuentes de generación de este gas la contaminación de olores ha sido una molestia frecuente y motivo de queja. La proporción considerable de quejas ambientales se elevó debido a los olores del H<sub>2</sub>S.

Por todo lo expuesto, la gestión de olores esencialmente el H<sub>2</sub>S por ser potencialmente tóxico, requiere de nuevas investigaciones para alcanzar métodos de tratamiento eficiente y sostenibles, además de plantear nuevas políticas de saneamiento que pueda incorporarse en los distintos proyectos, y contribuya a las metas del Plan de Acción Ambiental de calidad de Aire del país, el que además forma parte del Plan Ambiental 2017-2021.

La remoción del H<sub>2</sub>S (principal compuesto odorífero) es de vital importancia para el beneficio de todo el personal que opera dentro de los sectores industriales que se generan H<sub>2</sub>S y poblaciones aledañas, contribuyendo en la protección de la salud individual y colectiva de la población aledaña a los lugares donde se genera el H<sub>2</sub>S (plantas industriales, plantas de tratamiento de aguas residuales) en armonía con el ejercicio pleno del derecho fundamental a vivir en un ambiente equilibrado y adecuado para el desarrollo de la vida (Rossini, 2016). Además, contribuirá en uno de los objetivos del desarrollo sostenible, garantizar la disponibilidad de agua, gestión sostenible y el saneamiento para todos. La disminución de olores del H<sub>2</sub>S desagradable, mejorará la calidad del aire, contribuyendo a la mejora de la calidad de vida de las personas.

Actualmente Perú, es uno de los países donde la mayoría de las PTAR no cuenta con una adecuada gestión de lodos generados en las diferentes unidades de tratamiento, ya que Granados y González (2015) menciona que la gestión adecuada del residuo (lodos) representa un 25 % - 65 % de los costos totales de gestión de una PTAR. El uso de los biosólidos de una

PTAR como medio de adsorción de un gas tóxico ( $H_2S$ ) le conferirá a las PTAR características costo-beneficio favorable y sostenible con el ambiente, optimizará costos de su disposición final y propone una alternativa de solución a la preocupación nacional en el sector saneamiento siendo que la Política Nacional de Saneamiento del Perú DS N°007-2017-VIVIENDA establece como uno de sus objetivos al 2021, fomentar el uso de los sub productos generadas en PTAR (lodos). Por otro lado, contribuirá a la lucha contra el cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero dando solución a la adsorción del  $H_2S$ .

La presente investigación a nivel piloto, demostró una alternativa de solución a dos problemáticas medioambientales de vital importancia en nuestro país: mitigar la presencia del gas tóxico  $H_2S$  y la gestión deficiente de lodos generados en una PTAR). Para dar solución a la primera problemática se empleará como medio de adsorción selectiva del (gas tóxico), la reutilización de los lodos de una PTAR, esta estrategia involucra beneficios ambientales en cuanto a la valorización de los subproductos.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

Determinar la eficiencia de adsorción del sulfuro de hidrógeno mediante carbón activo obtenido de la regeneración de lodos provenientes de un *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB).

### **1.1.2. Objetivos específicos**

Estudiar la producción de adsorbentes a partir de lodos generados de un reactor UASB a diferentes condiciones de temperatura de pirolización ( $TP^{\circ}C$ ) y concentración molar del agente activante hidróxido de potasio (KOH) en la eficiencia de adsorción del  $H_2S$ .

Optimizar los parámetros de ( $TP^{\circ}C$ ) y [M] del KOH en el proceso de producción de carbones activos para la adsorción del  $H_2S$  eficiente.

Comparar las eficiencias de adsorción del sulfuro de hidrógeno de los carbones activos regenerados, carbón activo comercial y lodos secos de un reactor UASB sin tratamiento.

Evaluar la remoción de los adsorbentes preparados en la adsorción del  $H_2S$  mediante el parámetro de la porosidad de cada carbón activo producido a diferentes condiciones de los datos obtenidos de laboratorio.

## CAPITULO II

### REVISION BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Antecedentes

Existen numerosas investigaciones realizadas sobre el tratamiento del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), uno de los primeros estudios fue a través de la absorción de este gas en una solución de sales inorgánicas o solución de bases orgánicas en 1937. Continuando con los estudios se planteó la oxidación catalítica del sulfuro de hidrógeno a azufre con un metal alcalino en 1977 Walter C. Meuly (1977), un año después el 7 de febrero se estudió cómo eliminar este gas utilizando hidróxido de sodio conjuntamente con el carbón activado (Rabindra Kumar Sinha, Norman y Ronald, 1798).

Un estudio planteado en 1982 buscaba eliminar este gas ( $H_2S$ ) con peróxido de hidrógeno y compuestos de níquel o hierro como catalizador Szarblewski, Schneider y Machado (2012). En el Perú se ha realizado estudios para el tratamiento del  $H_2S$  para una corriente de 3 millones de pies cúbicos por día (MMSCFD) generada en un yacimiento de petróleo, con una concentración de 982 ppmv de gas mediante métodos físicos en el 2010 Maldonado (2010), asimismo la remoción del  $H_2S$  mediante un método biológico en una Planta de tratamiento de agua residual en el 2014 (Cerrón ,2016).

Sin embargo, en los últimos años el alto costo de las tecnologías de adsorción mencionadas ha provocado un creciente interés de investigación en la producción de alternativas de bajo costo de adsorbentes de una amplia gama de precursores de residuos como los neumáticos, lodo de papel, alimentos, desechos agrícolas y lodos de una PTAR. Bagreev, Bashkova, Locke, y Badosz (2001) demostraron que los biosólidos generados en tratamiento de aguas residuales después de un tratamiento térmico suelen ser un adsorbente superior para

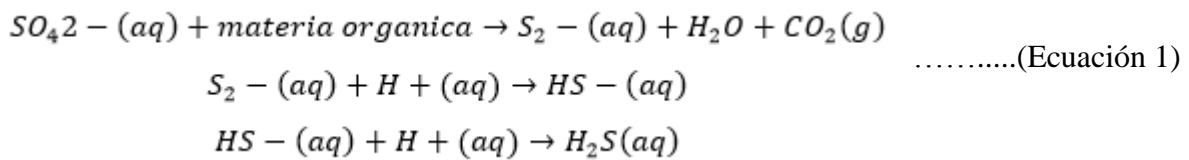
el gas sulfuro de hidrógeno. Del mismo modo en el 2015 se realizó un estudio de la capacidad de adsorción del sulfuro de hidrógeno de los adsorbentes obtenidos a partir de tres lodos de depuradora a los que se aplicaron distintos tratamientos fueron similares y/o superiores a las del carbón virgen Aguilera (2016). Asimismo estudios realizados sobre el desarrollo eficiente de la porosidad de los carbones activos obtenidos a partir de lodos demostraron que ello se logra mediante la activación química con hidróxidos alcalinos influenciando (KOH, NOH) por el método utilizado para la mezcla de activador y el precursor Ros, Lillo-ro, Fuente, Montesmorán y Linares-solano (2006). Estos estudios servirán de base para desarrollar y/o mejorar procesos para el tratamiento eficiente del  $H_2S$ .

## **2.2. Sulfuro de Hidrógeno ( $H_2S$ )**

El  $H_2S$  es un gas incoloro, inflamable, soluble en agua, tiene un olor característico a huevo descompuesto. Durante varias décadas el  $H_2S$  recibió mucha atención por ser un gas altamente tóxico y ser contaminante peligroso para el ambiente Abigail y Sánchez (2016). Es un gas altamente corrosivo, se encuentra en el biogás debido a la biodegradación de proteínas y otros compuestos orgánicos que contienen azufre presente en la materia prima de alimentación durante la digestión anaerobia. La presencia de  $H_2S$  es uno de los mayores factores que limitan el uso del biogás (Vikromvarasiri, Champeda, Boonyawanich y Pisutpaisal, 2017).

Según Pokorna-Krayzelova et al. (2017) la producción de sulfuros se produce durante la oxidación de la materia orgánica en la que el sulfato y otros compuestos sulfurados se utilizan como aceptores de electrones. Durante el proceso, sulfato y demás compuestos a base de azufre, sufren la acción de bacterias reductoras de sulfato y se reducen a sulfuro. En una solución

acuosa, el sulfuro se mezcla con dos átomos de hidrógeno, formando el  $H_2S$  las principales reacciones para la formación de sulfuro de hidrogeno son las mostradas en la Ecuación 1.



El  $H_2S$  no solo daña la salud, sino también representa un compuesto no deseado en algunos sectores industriales donde se genera el mismo. En las estaciones de depuración de aguas residuales que utilizan reactores anaerobios, la presencia de  $H_2S$  representa riesgo de corrosión en las tuberías y contribuye a un factor no deseado para el aprovechamiento energético del biogás.

Entre los principales agentes contaminantes en la atmósfera está el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ). Posterior a su liberación por la actividad microbiana natural o por emisiones antrópicas, este gas es fácilmente oxidado al dióxido de azufre ( $SO_2$ ) que posteriormente es convertido a ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), que retorna al suelo en forma de "lluvia ácida" (Rocha, Rosa y Cardoso, 2009).

**2.2.1. Fuentes de Generación de sulfuro de Hidrógeno**

Las emisiones gaseosas de  $H_2S$  se dan en numerosos procesos naturales y antropogénicos. Además de incidentes agudos que causan daños a la salud humana, son responsables de graves problemas ambientales y económicos, preocupaciones que influyen contaminación con  $SO_2$ , por la facilidad de oxidación del  $H_2S$  atmosférico (Girona, 2006).

Entre los procesos industriales y urbanos que generan el gas tóxico de  $H_2S$ , están las plantas de tratamiento de aguas residuales; procesamiento de alimentos, refinamiento de

petróleo y gas natural; las industrias petroquímicas; las curtiembres; fabricación de celulosa y papel; y los procesos de compostaje (Shareefdeen, 2009; Aroca et al., 2007).

#### **2.2.1.1. Fuentes naturales**

En el medio ambiente son generadas por las bacterias reductoras de sulfato por la digestión anaerobia de material orgánico. Algunas plantas industriales emiten H<sub>2</sub>S significativos, asimismo en lugares donde se produce la descomposición de materia orgánica junto a la falta de oxígeno, incluyendo pantanos, yacimientos de hidrocarburos, volcanes, respiraderos submarinos, manantiales de azufre, y los cuerpos de agua estancada. Por otro lado según Organización Mundial de la Salud WHO (2003) el H<sub>2</sub>S está presente de forma natural en aguas de pozo, actividades geotérmicas cuando los gases dentro del magma (CO<sub>2</sub>, N, H, CO, S, Ar, Cl y F) se combinan con hidrógeno y agua. En los últimos años la actividad geotérmica ha sido menos estudiada de fuentes artificiales y agrícolas de H<sub>2</sub>S.

De todas las fuentes de emisiones terrestres se tiene un valor estimado de 53 000 100 millones de toneladas métricas y oceánicas 27 000 150 millones de toneladas métricas de azufre;(WHO, 2003). Por lo tanto, se deduce que las emisiones geotérmicas representan la mayor fuente de H<sub>2</sub>S ambiental y otras fuentes antropogénicas no contribuyen a las emisiones oceánicas. Corroborada con varios estudios *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (ATSDR, 2016) se puede afirmar que los altos niveles de H<sub>2</sub>S en la atmósfera se deben a las erupciones volcánicas ya que se han implicado en varias extinciones masivas en la historia de la tierra (Kump, Pavlov y Arthur, 2005).

Maizel y Remucal (2017) mencionan que simultáneamente, las aguas residuales se reconocen cada vez recurso, en lugar de simplemente un producto de desecho, las aguas residuales domésticas y municipales contienen energía térmica, compuestos orgánicos y



nutrientes que pueden ser recuperados y utilizados a través de los subproductos que estos generan como los lodos.

Las fuentes de emisión de sulfuro de hidrógeno se encuentran los reactores de flujo ascendente del tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), que en la actualidad son muy empleadas para el tratamiento de efluentes de grandes centros urbanos e industrias por ser una alternativa de bajo consumo de energía Dai, Chen, Zhang, y Yi (2016). Los autores (Ortega, 2002; Cruz, 2013) Afirman que el tratamiento de aguas residuales con el UASB se generan gases como el metano, compuestos orgánicas volátiles sulfurados como el  $H_2S$ , gas tóxico para la salud humana.

### ***El sulfuro de hidrógeno en Reactores Anaerobios***

Un rasgo característico ligada a la tecnología anaerobia es la producción de olores desagradables atribuida a la formación de compuestos azufrados como el  $H_2S$  en el biogás. Estos compuestos poseen un olor muy ofensivo convirtiéndose en la principal causa que exige el cubrimiento total del sistema de tratamiento, un óptimo y eficiente sistema de recolección, tratamiento y disposición del biogás y de los gases generados Lu et al.(2016). El  $H_2S$  se forma en varias fases del tratamiento, en cuerpos de agua residuales que posean grandes concentraciones de sulfatos, como en las estaciones elevadores de desagüe, decantadores y reactores anaerobios como muestra la figura 1 (Pokorna-Krayzelova et al., 2017).

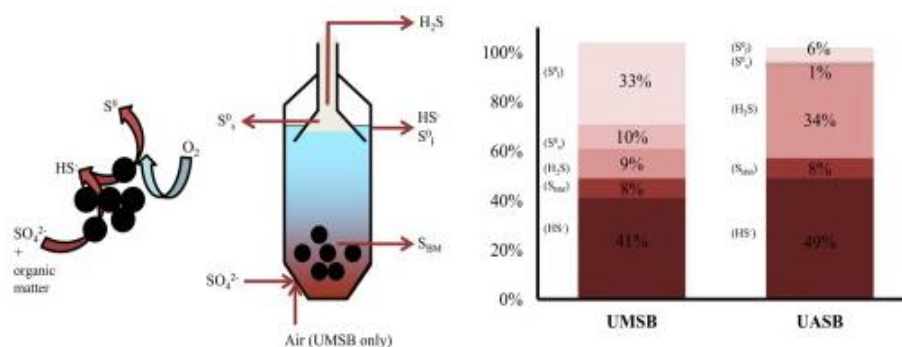


Figura 1. Generación del  $H_2S$  en un reactor anaerobio (Krayzelova, Bartacek y Kolesarova, 2014)

El  $H_2S$  se comporta como ácido débil cuando se disuelve en agua, sin embargo, por ser fuente de iones de hidrógeno, presenta un carácter corrosivo para tuberías (ASM,1987). A pesar de los problemas ocasionados por la corrosión, el olor es el impacto ambiental más notado en las estaciones de tratamiento de aguas residuales.

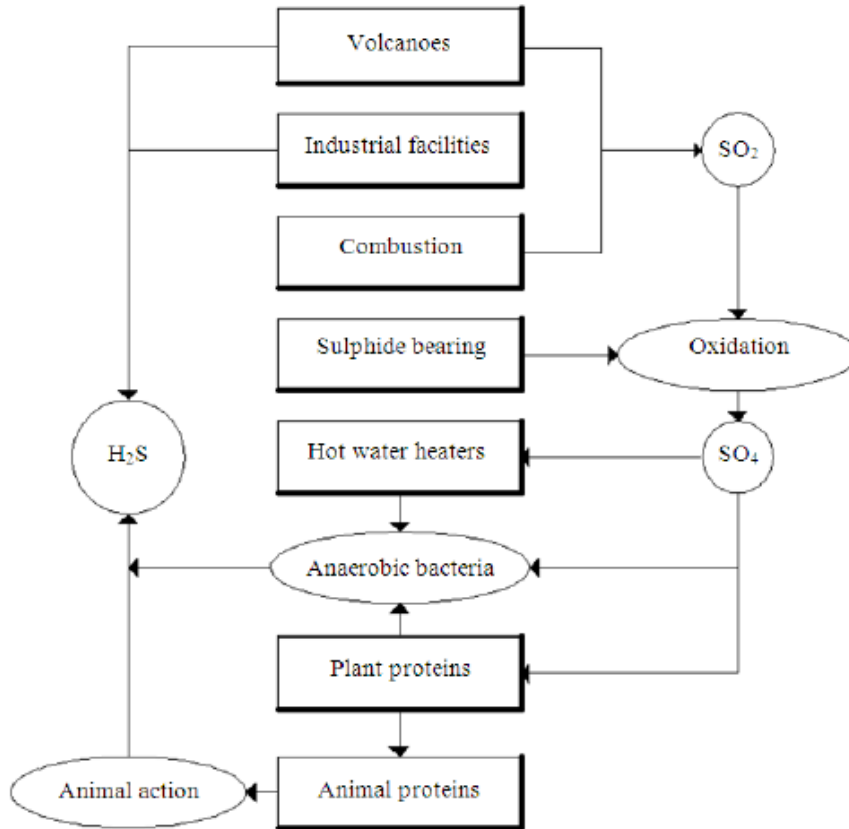


Figura 2. Proceso de generación del  $H_2S$  en un reactor anaerobio (Krayzelova, Bartacek y Kolesarova, 2014)

De esta forma, las bacterias sulfuroreductoras compiten con las bacterias fermentativas, acetogénicas y metanogénicas por los sustratos disponibles, consecuentemente se reduce la producción de metano; inhibición de diversas familias bacterianas por la presencia de  $H_2S$  y toxicidad generada por el  $H_2S$ , malos olores y corrosión (Rubright, Pearce y Peterson, 2017).



*Figura 3.* Reacciones químicas para la generación del H<sub>2</sub>S en un reactor anaerobio (Rubright, Pearce y Peterson, 2017)

### ***Sulfuro de Hidrógeno en plantas de tratamiento de residuos sólidos***

Grandes volúmenes de residuos que contienen el azufre elemental ingresan a vertederos de residuos sólidos municipales cada año. Por las condiciones anaerobias que prevalecen en los vertederos, las formas oxidadas de azufre, esencialmente el sulfato, se convierten en sulfuro. El H<sub>2</sub>S es corrosivo para los sistemas de recolección y tratamiento de gases de vertedero, la presencia de ésta demanda la instalación de costosos sistemas de eliminación. (Sun, Sun, y Barlaz, 2016)

Estudios realizados mencionan que las distintas actividades con residuos, demuestran importantes concentraciones de H<sub>2</sub>S en el ambiente (Heaney et al., 2011).

#### ***2.2.1.2. Fuentes antropogénicas***

En los últimos siglos las fuentes antropogénicas de H<sub>2</sub>S, emisiones a la atmósfera se han estudiado significativamente a comparación de las fuentes naturales, por la propensión de fuentes naturales de emisión H<sub>2</sub>S son de baja tasa. Los sistemas de alcantarillado, la contención de animales, y los mataderos son las fuentes industriales donde se encuentran H<sub>2</sub>S, asimismo se incluyen los sitios de petróleo y gas de procesamiento, plantas de energía geotérmica, instalaciones de procesamiento de alimentos, curtidurías, y molinos de pulpa y/o papel. Mientras H<sub>2</sub>S se libera en forma gaseosa, también se suelen generar en los residuos líquidos relacionados con la industrialización (Georgia, 2016)

Tabla 1

*Concentraciones típicas de H<sub>2</sub>S en biogás*

Tipo de residuo	Concentración típica de H <sub>2</sub> S presente en biogás generado de diferentes residuos	
	(ppm v)	(% vol)
Ganadera	100-1000	0,01-0,1
Industrial	100-10000	0,01-1
Doméstico	1000-20000	0,1-2
Vertedero	100-20000	0,01-2

Fuente: González -Aguilera (2016)

### 2.2.2. Propiedades del sulfuro de Hidrógeno

Edwards (2011) menciona que el H<sub>2</sub>S posee un olor a huevo descompuesto, le favorece la latencia de éste convirtiéndolo aún más peligroso, ya que se pierde rápidamente debido a la parálisis de los receptores olfativos, engañando a la persona de su presencia. El H<sub>2</sub>S generalmente aparece en una cantidad inferior al 1 % del volumen total del biogás como muestra la tabla 1.

La quema de biogás con presencia de H<sub>2</sub>S lleva a la formación de dióxido de azufre, un gas contaminante tóxico y que puede provocar lluvia ácida a altas concentraciones. De esta forma, el análisis de métodos de remoción para este contribuye a la mejora del biogás como fuente de energía reducción de la emisión de contaminantes atmosféricos y disminución de gases para el efecto invernadero por la acción del metano.

### 2.2.3. Carácter tóxico del H<sub>2</sub>S

El H<sub>2</sub>S inhalado penetra a los pulmones alcanzando el torrente sanguíneo, el sistema de protección oxida el H<sub>2</sub>S transformándolo en un producto inocuo. Este también reacciona con enzimas esenciales con componentes metálicos tales como el cobre, cinc y hierro generando sulfuros metálicos ocasionando consecuencias para la salud de las personas. Sin

embargo, el organismo no logra oxidar totalmente cuando la concentración de  $H_2S$  incrementa, el exceso de esta afecta directamente al sistema nervioso central quien comanda la respiración, ocasionando la paralización del sistema respiratorio, ello genera que la persona se asfixie y finalmente pierda la vida (Mainier, Delaidi y Viola, 2005).

#### **2.2.4. Efectos del $H_2S$**

##### **2.2.4.1. *Efectos sobre la salud***

El  $H_2S$  es tóxico y mortal, conocido durante largos periodos de años, como un gas nocivo con amplios efectos citotóxicos Elrod et al.(2007). Es altamente irritante para los pulmones, en bajas concentraciones irrita los ojos y el tracto respiratorio, ocasiona problemas de dolor de cabeza, fatiga, mareos, diarrea, etc. El desagradable olor a  $H_2S$  puede ser molesto, debido a que la persona pierde el rastro del  $H_2S$ , cuando las concentraciones son altas la peligrosidad de esta puede conducir a la muerte (Richard, 1995).De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (WHO, 1981) la presencia del sulfuro de hidrógeno en altas concentraciones en la atmósfera puede generar efectos desfavorables para la salud como muestra la tabla 4. La presencia del  $H_2S$  es detectable por el olfato a bajas concentraciones, sin embargo. las concentraciones máximas ocasionan la pérdida de sensibilidad, haciendo el olor un medio no confiable de percepción del mismo (Sampaio, 2015 y; Flavia et al., 2018)

Tabla 2

*Efectos sobre la salud por la exposición del H<sub>2</sub>S*

<b>Concentración de H<sub>2</sub>S (ppmv)</b>	<b>Efectos sobre la salud humana</b>
0.1	Detección del olor característico
3	Olor ofensivo
10	Irritación en los ojos, náuseas
50	Daños a la visión
100	Conjuntivitis, dificultad para respirar, pérdida de olfato
300	Edema pulmonar
500	Grande Estimulación Nerviosa
500-700	Pérdida de conciencia y posibilidad de muerte a una exposición de 30-60 min
700-1000	Pérdida de Conciencia, Parálisis, Colapso respiratorio inmediato y muerte de algunos minutos de exposición.
1000-2000	Rápida pérdida de conciencia, parálisis, colapso respiratorio

Fuente: Sampaio (2015)

Tabla 3

*Efectos a la salud por exposición a sulfuro de hidrógeno*

Compuestos odoríferos azufrados	Efectos a la salud humana				
	Irritación de las membranas mucosas	Vía respiratoria superior e inferior	Gastrointestinal	Síndrome generales	Otros
<b>Acido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S)</b>	Irritación de ojos y piel	Lesiones pulmonares (exposición por horas)	Náuseas y/o vómitos	Dolor de cabeza, mareos	Carcinogénico
<b>Metilmercaptano (CH<sub>3</sub>SH)</b>	Piel, ojos, nariz y garganta.	Tos, laringitis, edemas pulmonares	Náuseas y/o vómitos	Dolor de cabeza, mareos	Anemia, daños al hígado y riñones
<b>Etilmercaptano (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>SH)</b>	Piel, ojos, nariz, garganta y boca	Asfixia	Náuseas	Dolor de cabeza, fatiga	Alteraciones del sistema cardiovascular y nervioso
<b>Dimetilsulfuro ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S)</b>	Piel, ojos, nariz y garganta	Asfixia	NR	Dolor de cabeza	Alteración del sistema nervioso
<b>Dietilsulfuro ((C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>S)</b>	Provoca irritación ocular grave e irritación de la piel	Puede irritar las vías respiratorias	Náuseas y/o vómitos	Dolor de cabeza	NR
<b>Dimetildisulfuro ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>)</b>	Irritación de ojos y piel	Puede irritar las vías respiratorias	Náuseas	Dolor de cabeza, somnolencia	NR

NR: No reportado

Fuente: IV-OHG (2004)

El H<sub>2</sub>S, es un compuesto odorífero altamente tóxico, con el monitoreo de equipos específicos para medir el H<sub>2</sub>S encontraron los efectos sobre la salud como muestra la tabla 2.3. El biogás contiene altas concentraciones de sulfuro de hidrógeno (>3%); es corrosivo para las estructuras del concreto de la planta por que daña la estructura interna de los generadores eléctricos como reduce el poder calorífico de la mezcla gaseosa del mismo (Viquez, 2010). Su

olor a huevo descompuesto, le muestra sus características que le ayudan a mostrar a otros compuestos, esto porque son fáciles de percibirlos debido a su límite de detección bajo (0.0001-0.03 mg/Nm<sup>2</sup>aire) (Chernicharo A. , 2013).

Tabla 4

*Efectos a distintas concentraciones de sulfuro de hidrógeno H<sub>2</sub>S*

<b>Concentración de sulfuro de hidrógeno</b>		
<b>Mg/m<sup>3</sup></b>	<b>Ppm</b>	<b>Efectos</b>
0.03-0,28	0.002-0.2	Detección de olor (desarrolla alguna tolerancia)
70-209	50-150	Irritación de los ojos y vías respiratoria, parálisis olfatoria
279-679	200-500	Bronquitis. Dolor de cabeza, mareo, tambaleos
679-1395	500-1000	Edema pulmonar, depresión respiratoria, inconciencia
1395-2092	1000-1500	Colapso rápido, parálisis respiratoria, mortal en algunos minutos
2510-6973	1800-5000	Mortal

Fuente: Consejería de Sanidad (2007) y MSRD (1996)

#### **2.2.4.2. Efectos sobre el medio ambiente (agua, aire, suelo)**

El H<sub>2</sub>S generado por la descomposición anaerobia de la materia orgánica es un problema preocupante siendo que es un contaminante del aire afirma Flavia et al.(2018), que causa irritación ocular y respiratoria, dolores de cabeza y nauseas.

Según (Aroca et al, 2007 y Jiang et al,2016) emisiones de sulfuro de hidrógeno por actividades industriales son la principal causa de corrosiones y olores desagradables en los



grandes centros urbanos, siendo la causa principal de rechazo a la implantación de plantas y/o industrias cercanos a la población.

### **2.3. Tecnologías de Tratamiento**

#### **2.3.1. Técnicas de tratamiento de malos olores**

Según Ramírez (2007) el tratamiento de olores son factores de gran importancia en el diseño de las redes de alcantarillado, plantas de tratamiento, como el sistema de deposición de aguas residuales, por ende su tratamiento dependerá del compuesto y naturaleza causante del olor, volumen a tratar, y las características del aire como la gestión de los subproductos generados. En el proceso de gestión de lodos suelen generarse olores por la presencia de compuestos sulfurosos reducidos.

La generación de olores es un problema socio ambiental, como un factor principal de perturbación notada por la población donde Zarra et al.(2008); menciona que la medición de olores se lleva acabo usando métodos analíticos o sensoriales, el análisis sensorial es asignado al (sensor humano).

Tabla 5

*Tecnologías de tratamiento biológico de la fase gaseosa*

<b>Tecnología</b>	<b>Descripción del proceso</b>
Biofiltro	Tecnología de control de olor en la fase gaseosa que utiliza típicamente un medio orgánico de compost de madera, pero que puede utilizar otro tipo de medio. Este puede ser construido en terreno o puede ser una unidad prefabricada.
Filtro de lecho de suelo	Tecnología de control del olor en la fase gaseosa que utiliza típicamente un medio formado por material del suelo, minerales u otro medio bajo condiciones orgánico.
Lavador biológico	Tecnología de control de olor en fase gaseosa utiliza un medio inorgánico en un contenedor para contener a los microorganismos o para para lograr la transferencia de más de olores desde la fase gaseosa a la fase líquida reciclada. Esto puede ocurrir en un estanque separado de la oxidación.
Filtros biológicos por goteo	Utiliza un medio inerte permeable exclusivamente para el crecimiento de los microorganismos fijos y la directa biodegradación de los compuestos odoríferos. No se maneja estanque separado de oxidación.

Fuente: Arriagada-Monreal (2008)

Tabla 6

*Tecnologías de eliminación de H<sub>2</sub>S de biogás (Szarblewski, Schneider y Machado, 2012).*

	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Método físico- Químico</b>		
Carbón Activado	-Proceso simple -Alta eficiencia -Regenerable con valor o vapor Ciclo de vida amplio	-Proceso caro para grandes caudales a desulfurar -Consumo elevado de carbón activo para grandes caudales -Algunos carbones impregnados al gastarse se consideran residuos peligrosos.
Óxidos de hierro (Esponja de Hierro)	Alta eficiencia de eliminación Proceso sencillo Elimina H <sub>2</sub> S y mercaptanos Regeneración aunque solo 2-3 ciclos	-Trataba a bajos caudales -Proceso caro por su gran consumo en adsorbente (solo viable para pequeñas instalaciones) -Puede generar residuos peligrosos

Las múltiples metodologías para la remoción del  $H_2S$ , se engloban en procesos biológicos y físico-químicos. En un estudio realizado Szarblewski, Schneider y Machado (2012) determinaron los principales métodos de tratamiento de  $H_2S$  abordando además algunos métodos basados en los principios físico, químico y biológico, como muestra la tabla 5.

#### **A) *Procesos Biológicos***

Los tratamientos de gases mediante los procesos biológicos ocurren básicamente por la transferencia de los compuestos volátiles a una fase líquida. Los gases contaminantes a tratar son utilizados por los microorganismos como fuente de carbono o como donante de electrones para sus reacciones metabólicas, generando productos como agua, dióxido de carbono y materiales necesarios para la reproducción (Syed, Soreanu, Falletta y Béland, 2006).

Algunas especies de bacterias, hongos o levaduras poseen la capacidad de degradar compuestos orgánicos volátiles y compuestos inorgánicos volátiles, método en el cual se basan en los métodos microbiológicos de tratamiento de gases, los microorganismos son inoculados en materiales y soportes, donde forman biopelículas en el interior de la columna de filtro de gases. El biofiltro es un aparato que consiste en un reactor de material orgánico, en el cual gases odoríferos pasan por flujo ascendente o descendente, a través de una capa filtrante compuesta con empaque orgánico contenida de microorganismos. Algunos factores marcantes para la eficiencia de este sistema son el tipo de medio filtrante, las características de flujo de gas en el interior del biofiltro, la concentración, la solubilidad y la biodegradabilidad del sustrato (Lebrero, Rangel y Muñoz, 2013).

## ***B) Procesos Físico-Químicos***

Método aplicado en la reducción de los efectos y concentraciones de los contaminantes gaseosos, en comparativa del método biológico, una ventaja que posee es la sencillez de las condiciones operacionales. Según Garcia (2014) dentro de ella las técnicas que más se aplican son los procesos de absorción y adsorción.

### ***2.3.1.1. Absorción***

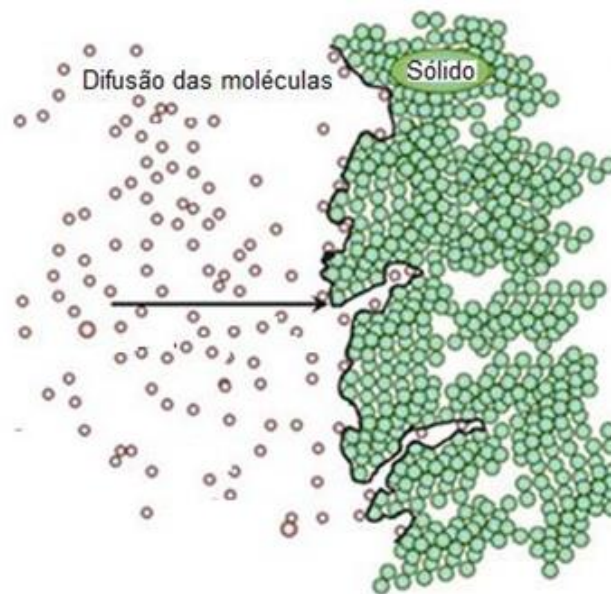
Garcia (2014) indica que es recomendable que el gas a tratar sea soluble al medio líquido absorbente, en caso del  $H_2S$ , es factible utilizar el agua como adsorbente del gas, en ciertas situaciones puede demandar la adición de productos químicos para facilitar la solubilización de algunos gases contaminantes, denominándose lavador químico. Factores a considerar para obtener un rendimiento positivo, es el de realizar una buena mezcla entre líquido y gas, generar el tiempo de residencia óptimo para el contacto entre las dos fases.

Según Noramelya (2016) en su mayoría la absorción física del  $H_2S$  ocurre en agua o solvente orgánico. La absorción química beneficia la eficiencia, la velocidad de reacción y la operación de eliminación de  $H_2S$  en comparación con la física. Además, implica la formación de reversibles enlaces químicos entre el soluto y el solvente. En la absorción química, el disolvente mismo se somete a la regeneración que implica la ruptura de bonos para regenerar el solvente.

### ***2.3.1.2. Adsorción***

La adsorción es el mecanismo por el cual un fluido se adhiere a la superficie de un sólido. El presente método en su mayoría posee una eficiencia de remoción entre el 90 % y 99 %. La adsorción es un proceso resultante de la interacción de la fuerza de van der Waals y

fuerzas electrostáticas entre el fluido adsorbido y la superficie del adsorbente. Estas se dan de dos formas: la física que consiste cuando las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del gas o el líquido y el sólido adsorbente son mayores que la atracción de las moléculas del fluido entre si y la química cuando la estructura del adsorbente es alterada por la interacción con el adsorbato (Garcia, 2014).



*Figura 4.* Mecanismo de adsorción de los carbones activos (García, 2014)

Todo material orgánico que contiene alta cantidad de carbono es un excelente medio para ser transformado a carbón activo, tomándose en cuenta la buena disponibilidad y bajos costes de ésta.

### **Tipos de Adsorción**

Según Sampaio (2015) considera a los siguientes:

#### ***A) Adsorción estática***

Es la que generalmente está asociado a las isothermas de adsorción, en la que el adsorbente y el adsorbato, se mantienen en contacto durante un cierto periodo de tiempo para evaluar las relaciones de equilibrio entre la cantidad de material adsorbido por concentración de la fase fluida.

#### ***B) Adsorción Dinámica***

El proceso dinámico es más común para los gases, el adsorbente que generalmente permanece fijo y el paso de flujo adsorbato, por lo tanto se evalúa la variación de la concentración de adsorbato en el tiempo, representado por el efluente curva o rotura.

#### ***C) Adsorción en Lecho fijo***

Es común que se realice el tratamiento de flujos de gases en las columnas de adsorción llenas de adsorbentes en aplicaciones industriales. En una escala comercial, el modo de funcionamiento, los procesos de separación son factores que se pueden categorizar en contracorriente con procesos continuos de lotes cíclicos. Los procesos por lotes son los de un periodo de tiempo pasados, sin embargo, aun todavía son utilizados ampliamente, en relación con el tratamiento de efluentes gaseosos. Entre estos procesos, se tiene la adsorción mediante lecho fijo su mecanismo consiste en que el adsorbato pasa continuamente a través de la columna hasta que el adsorbente sólido alcanza una condición de saturación cercano.

### **2.4. Carbón Activado**

Se aplica a los materiales carbonosos que pasan por un proceso de transformación mediante la carbonización, de tal forma se obtenga productos con un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna.

La producción de carbón activo comercial consta de dos fases: la carbonización del material precursor para la obtención del carbón y la activación. La carbonización se da a altas temperaturas de 500-800 °C en ausencia de oxígeno, donde la materia prima empleada se volatiliza e hidrata generándose un material rico en carbono por la eliminación de material no carbonoso, asimismo se da el proceso de la desvolatilización, la salida de los gases y vapores del precursor produce porosidad en menor proporción, pero estos podrían ser bloqueados por residuos alquitranados, los parámetros importantes a considerar en este proceso son la temperatura, el tiempo de retención y la velocidad de calentamiento (Chowdhury et al., 2012).

La segunda es el denominado proceso térmico, en la cual se descompone el precursor liberando compuestos volátiles con presencia de hidrógeno y oxígeno, obteniéndose un producto final sólido con alto contenido de carbono, y una estructura muy desarrollada. Se realiza mediante el uso de un agente oxidante, generalmente  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  o una combinación de ellos a temperaturas de entre 850-1000 °C, estos gases reaccionan con átomos de carbono y con las sustancias alquitranadas las que bloquean los poros creando una estructura microporosa desarrollada. Durante la activación se genera una reacción entre el gas y los átomos de carbono más reactivos. La pérdida selectiva de los átomos de carbono generan un ensanchamiento de la porosidad, haciendo que los microporos del precursor carbonizado se hacen accesibles a las sustancias e incrementa el tamaño de poros (Luna, González, Gordón y Martín, 2007).

Una de las metodologías para generar carbón activo es mediante la reacción directa de la materia prima con un reactivo químico, se procede a realizar una mezcla hasta que este sea homogénea entre el precursor y al agente activante, las soluciones más utilizadas son cloruro de Zinc y el ácido fosfórico, la porosidad se desarrolla en el proceso de la activación térmica trabajándose a altas temperaturas entre 450-900 °C bajo atmósfera inerte. Otra de las formas es la carbonización a  $T^\circ$  de 300-400 °C posteriormente recién se impregna con el agente activante y se carboniza (Dias, Alvim-Ferraz, Almeida, Rivera-Utrilla y Sánchez-Polo, 2007).

Los altos costos de operación mostrados en los últimos años, ha generado la búsqueda de adsorbentes alternativos de bajo coste promoviendo el uso de materiales naturales (madera, turba, carbón, lignito, etc.), así como residuos industriales, agrícolas, domésticos o subproductos, lodos, cenizas volantes (Ahmaruzzaman, 2011).

Según Couto (2009) el uso del carbón activado ha sido amplio, empleándose en diversos campos tales como el tratamiento de agua potable, minería, petróleo, tratamiento del aire atmosférico, etc.

#### **2.4.1. Propiedades químicas**

El carbón activado contiene pequeñas cantidades de oxígeno, nitrógeno, azufre e hidrógeno, unidos químicamente en forma de diversos grupos funcionales, tales como carbonilo, carboxilo, fenol, lactona, quinona, y grupos éter, además del carbono. Los grupos funcionales mencionados derivan de la materia prima o por defecto formados durante el mecanismo de activación por la del vapor de aire o agua. (Grisales y Rojas Arrieta, 2016)

Todas las materias primas empleadas para la producción utilizadas para su producción de carbones activados poseen minerales que se generan durante el proceso de activación. Los productos químicos inorgánicos utilizados en la activación química se eliminan de forma incompleta. Los metales alcalinos y alcalinotérreos, en su mayoría carbonatos y fosfatos, incluidos los óxidos de sílice, hierro y aluminio, constituyentes de la cantidad de cenizas que contienen los carbones activos. (Menéndez-Díaz y Martín-Gullón, 2006)

#### **2.4.2. Estructura Física**

Escandell, Sabio y Reinoso (2013) mencionan que los carbones activos poseen una estructura microcristalina similares a la del grafito. La particularidad de la estructura les permite categorizar a una distribución de tamaño de poros bien determinada. Se establecen en



tres tipos de poros según su radio: macroporos ( $r > 25$  nm), mesoporos ( $25 > r > 1$  nm) y microporos ( $r < 1$  nm).

### **2.4.3. Adsorción vía Carbón Activado**

La adsorción mediante carbón activado es una técnica de costos económicos, tiene gran capacidad de adsorción y una cinética de reacción rápida aun en temperaturas ambiente, por el gran área superficial, porosidad y química superficial que les caracteriza. Existen diferentes carbones: los impregnados y activados con un catión y no impregnados que se da con un catalizador débil que posee una velocidad limitada ocasionando una reacción completa permitiendo la oxidación del ion sulfuro ( $HS^-$ ) al azufre elemental, se disocia con una película de agua en la superficie de carbono. El proceso necesita agua limitada en los medios, el exceso de agua en estado gaseoso reacciona con  $CO_2$  formando carbonatos y ácido sulfuroso que desactivan el sitio catalítico, por lo tanto la eficacia de la adsorción del  $H_2S$  se reduce, sin embargo, una mayor cantidad de microporos con pequeños volúmenes mejora capacidad de adsorción (Noramelya, 2016).

### **2.5. Regeneración de Adsorbentes**

La activación del carbón se da mediante la generación de las partículas cristalinas porosas con una enorme área superficial en el interior de los gránulos y polvos de carbón, cada materia prima brindará características y calidades distintas de acuerdo a cualquier mineral no grafitico (Grisales y Arrieta, 2016).

Los costos altos de las tecnologías de adsorción ha generado una demanda creciente en la investigación sobre la producción de alternativas de costos mínimos a adsorbentes, desde una amplia gama de precursores de residuos como lodo de papel, residuos de poliuretano, alimentos y desechos agrícolas. La presente estrategia involucra beneficios ambientales,

valorización de los subproductos contribuye a la minimización, recuperación y reutilización de residuos(Ros et al., 2006).

### **2.5.1. Factores a considerar en la producción de carbón activo**

Las condiciones experimentales seleccionadas influyen directamente en la distribución del tamaño de poros que pueden tener los carbones activos. Se debe tener en cuenta las temperaturas de pirolización, tiempos de activación, tamaño del material precursor, el agente activante entre otros.

### **2.5.2. Técnicas de regeneración de Carbón Activo**

#### **2.5.2.1. Activación Física**

Es uno de los procedimientos para la producción de carbón activo, bien estudiado en las diferentes bibliografías en las que se hace uso de múltiples precursores tales como los: materiales lignocelulósicos, carbones minerales, materiales de origen polimérico, breas, etc. Ransal, Donnet y Stoeckli (1988). El agente activante a seleccionar es de acuerdo a la aplicación, los procesos constan de dos fases: carbonización de un precursor carbonoso y posteriormente activación mediante un proceso de gasificación a altas temperaturas (800-1000 °C) en presencia de un agente activante como  $CO_2$ , vapor de  $H_2O$ ,  $O_2$  o bien la combinación de ellos (Cazorla-Amorós, Ribes-Pérez, Román-Martínez y Linares-Solano, 1996)

#### **A) Etapa de la Carbonización**

En esta etapa se realiza a temperaturas de 500-800 °C en atmósfera inerte. En el proceso de la carbonización el  $O_2$  y el  $H_2$  presentes en el material de partida se eliminan por descomposición pirolítica, los átomos de carbono libres se agrupan formando anillos aromáticos generando estructuras básicas, asimismo productos de descomposición

intermedios, que se depositan en los espacios intersticiales entre unidades adyacentes (Zhai, Wei, Zeng, Zhang y Chu, 2004).

Es la etapa donde se desarrolla la estructura porosa inicial básica por la evolución de la materia orgánica. Sin embargo la porosidad que posee es insuficiente ya que el Carbón activado resultante del proceso posee una estructura parcialmente ordenada, con poca capacidad de adsorción, pero con alto contenido de carbono elemental y bajo contenido de materia volátil (Zhai, Wei, Zeng, Zhang y Chu, 2004).

Tabla 7

*Principales parámetros y sus efectos en la etapa de carbonización*

<b>PARAMETRO</b>	<b>EFECTO</b>
Temperatura Final	Necesidad de aportar a las moléculas cantidades de energía suficientes para romper los enlaces más débiles y permitir la migración de los productos de descomposición más estables.
Tiempo de residencia	Tiene que ser suficientemente grande para permitir la descomposición de los componentes de la materia orgánica, pero no demasiado elevado para evitar la formación de cristales.
Velocidad de calentamiento	Un aumento rápido de la temperatura favorece la formación de poros de gran tamaño por volatilización de gran cantidad de materia orgánica en poco tiempo.
Atmósfera	La eliminación rápida de los gases formados durante la pirólisis por introducción de un gas inerte provoca un aumento de la reactividad, dando lugar a una disminución de la cantidad de producto formado.

Fuente: Grima-Olmedo, Ramírez-Gómez, Gómez-Limón y Clemente-Jul (2016)

### ***B) Activación***

El producto obtenido posee una estructura porosa poco desarrollada, sin esta etapa no podría ser utilizada como adsorbente, siendo que es la etapa donde se desarrolla la superficie

específica del producto carbonizado. Este proceso se da entre 800-1100 °C en presencia del  $O_2$ , vapor de  $H_2O$ ,  $CO_2$  o una combinación de los 3; se produce una reacción de sólido-gas con la consiguiente la eliminación de compuestos intermedios que taponan los espacios entre cristales adyacentes y átomos de carbono más reactivos, generando una formación de la porosidad óptima.

#### 2.5.2.2. *Activación Química*

En la activación química no existen dos etapas, la carbonización y la activación se producen de forma simultánea McDougall (1991). Consiste en poner en contacto el precursor de carbón activado con un compuesto químico (agente activante) y someterle a un tratamiento de (400-700 °C), generando una transformación significativa en la estructura y desarrollo de porosidad; generalmente tras la activación es sometido a una etapa posterior de lavado para la eliminación del exceso de agente activante y el resto de materia orgánica.

En la impregnación se somete con el agente activante que se mezcla con el material inicial y se deja por un tiempo de 2 horas normalmente a temperaturas menores de 100 °C. La mezcla del activante con el precursor del carbón activado se puede realizar en seco también (mezcla física). Posterior a ello se aplica un proceso pirolítico donde la carbonización y la activación se dan en ausencia del oxígeno. La impregnación química con  $H_3PO_4$  o  $ZnCl_2$ .

Deshidrata la materia prima y aromatiza el carbón creando una estructura porosa tridimensional rígida favorecida por el entrecruzamiento de la matriz de carbón activado. El producto se enfría en atmósfera inerte y se lava con ácido y agua para eliminar el exceso de agente activante.

Los agentes activantes por excelencia son  $ZnCl_2$ ,  $H_3PO_4$ ,  $KOH$  y  $NaOH$  aunque también se utiliza el  $K_2S$ ,  $H_2SO_4$ ,  $M_2CO_3$  (M=cualquier metal) y  $MCl_x$  (M=Ca, Mg=Fe), estos deshidratan influyendo en la descomposición que tiene lugar durante el proceso de pirólisis a

la vez que inhiben la formación de alquitranes, ácido acético y metanol, entre otras especies, aumentando así la producción del carbón. La morfología de la porosidad del carbón activado obtenida a partir de activación química es parecida al cuello de botella a temperaturas de 500 °C asociada al material plástico que adopta el material carbonoso (Mui, Ko y McKay, 2004).

Según Dai, Chen, Zhang y Yi (2016) tiene las siguientes ventajas: emplea temperaturas y tiempos de tratamiento menores, se realiza en una sola etapa, mayor eficiencia en la capacidad de adsorción, los carbones activados poseen áreas superficiales elevadas, porosidad estrecha. Sin embargo, algunas desventajas de esta metodología de activación se dan de acuerdo al tipo de activante utilizado, puede incorporar impurezas que afectan a las propiedades del carbón activado. Yakout y Sharaf El-Deen (2016) asimismo el uso de agente activante como el  $ZnCl_2$  su empleo es menor por los problemas medioambientales causados por esta, en pro de otros como el  $H_3PO_4$  y los hidróxidos alcalinos.

El uso de KOH y NaOH como agentes activantes en la preparación de carbones activados es similar a los agentes empleados  $H_3PO_4$  y el  $ZnCl_2$ . Este se realiza por la impregnación del material previamente carbonizado en un rango de temperaturas entre 300 - 450 °C por más de 4 horas; sin embargo, generalmente se realiza por el proceso de activación y pirólisis simultánea, se realiza a temperatura de 500-750 °C enfriándose en una atmósfera inerte seguido a ello se lava con un ácido y agua destilada para eliminar el agente activante presente en exceso, con este proceso se obtienen carbones altamente microporosos con áreas superficiales muy elevadas.

Tabla 8

*Principales reacciones del hidróxido y los átomos de carbono*

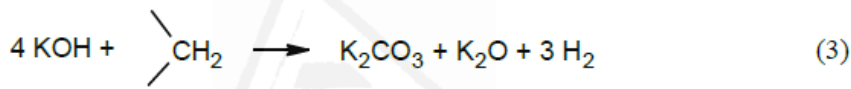
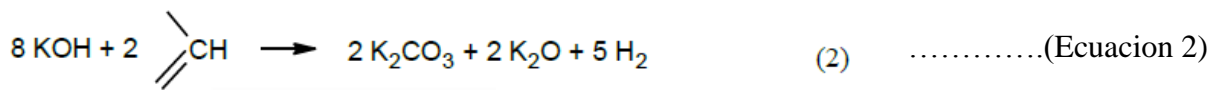
Reacción de la materia orgánica	Observaciones
$6\text{NN}_a\text{OH} + 2\text{C} \rightarrow 2\text{N}_a + 3\text{H}_2 + 2\text{N}_a\text{CO}_3$	Reacción principal. Tiene lugar a partir de 730 °C para reacciones como $\text{N}_a\text{OH}$ y a partir de 630 °C para KOH.
$2\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	Posibles reacciones secundarias de descomposición de $\text{N}_a\text{OH}$ y reducción del carbón simultáneamente.
$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$	
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$	
$\text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_2$	La formulación de carbono es una reacción competitiva con la reacción principal (2), también se forman mediante la pirolisis previo material
$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{Na}_2 + \text{H}_2\text{O}$	
$\text{Na}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow 2\text{Na}_2 + \text{CO}$	
$\text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{C} \rightarrow 2\text{Na}_2 + 3\text{CO}$	

Fuente: Lillo Rodenas, Cazorla-Amoros y Solano (2003)

**Activación química con KOH**

La activación química con hidróxidos alcalinos, es uno de los métodos empleados para la obtención de carbones con una elevada área superficial, según algunos realizados (Ros et al., 2006). El hidróxido potásico, es el agente activante que permite obtener carbones activados con mayor desarrollo de porosidad y por ende mayor rendimiento, cuando se emplean como material precursor con estructura carbonosa de cierto orden.

El KOH reacciona con el material precursor durante el tratamiento térmico. Este reacciona con el precursor carbonoso formando carbono potásico, óxido potásico y potasio metálico, que posteriormente son eliminados en la etapa de lavado, exponiendo la estructura porosa del carbón activado (Carvalho y Castro, 2013).

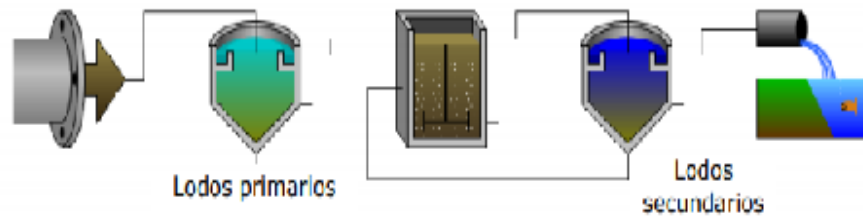


### 2.5.3. Material Precursor

A pesar de su demanda mayor, el carbón activado todavía está dentro de los productos de alto coste, por tanto, se ha estudiado el uso de diferentes materiales precursores, es decir, materias primas, para la producción más económicas del carbón activo. El uso de residuos como material precursor ha ganado importancia por sus bajos costos. Entre los materiales utilizados para la producción de carbono se puede mencionar la madera, residuos agrícolas, los polímeros, la cascara de coco, turba, etc.

#### 2.5.3.1. Lodo de una PTAR

Los lodos se originan en las plantas de tratamiento de aguas residuales, su generación es principalmente en tratamientos primario y secundario, factores que influyen a la alta o baja tasa de generación de lodos son la carga superficial del agua y el tiempo de retención hidráulica. La cantidad producida depende de la eficiencia de tratamiento primario, la relación de sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), cantidad de sustrato soluble, la remoción de nutrientes y los criterios de diseño de la PTAR (Lim, 2013).



*Figura 5.* Generación de lodos en una PTA

### ***Generación de lodos en el Reactor anaerobio de Flujo Ascendente y manto de lodo (UASB)***

El tratamiento biológico anaerobio en sus inicios fue aplicado en Holanda; el diseño de este sistema está basado en que posee un flujo ascensional del afluente mediante el manto de lodos; constituida por la fase líquida, sólida y gaseosa generándose el biogás en esta última captado por una campana. La estabilización de la materia orgánica ocurre en todas las zonas de la reacción, la mezcla del sistema es causada por el flujo ascensional de agua residual y burbujas de gas (Chernicharo, 2013 y; Montes y Rico, 2017).

El parámetro imprescindible a controlar en un reactor UASB es la fase metanogénica, ya que indica la descomposición de la materia orgánica. Las bacterias se encuentran inmersas en el lodo que está depositado en el reactor alimentándose con el vertimiento del afluente, incrementando la tasa de crecimiento microbiano; por ende la producción de lodos anaerobios (Sousa, Santos, Henrique y Santos, 2008).



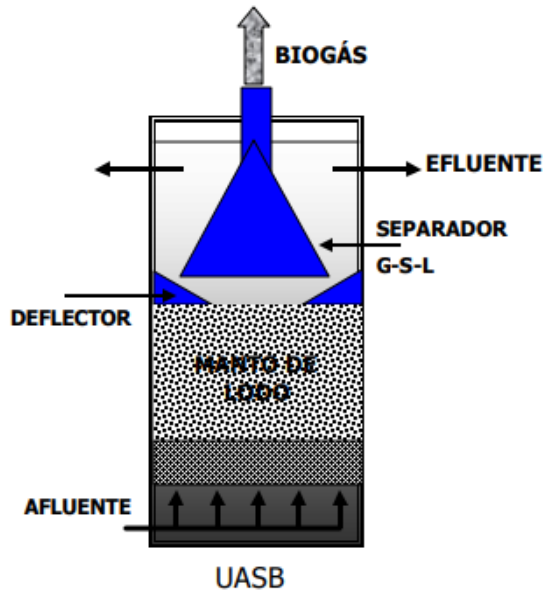


Figura 6. Reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodo (Castrillon, Vazquez, Maranon y Sastre, 2002)

***Balance de masa en un reactor UASB***

Las variaciones que ocurren durante una reacción en un determinado sistema cerrado o en alguna porción definida de una masa líquida.

El balance de masa se define por las variaciones que ocurren durante una reacción en un determinado sistema cerrado o en alguna porción definida de una masa líquida. En la mayoría de las aplicaciones del tratamiento de agua residual, la solución de las ecuaciones del balance de masa, puede ser simplificada considerando que es de interés la concentración resultante a largo plazo en el régimen permanente (Pokorna-Krayzelova et al., 2017).

$$VX \frac{dC}{dT} = QxC_o - QxC + Vxr_g + Vxr_e$$

..... (Ecuación 3)

*Donde*

*V = Volumen del reactor*

*C<sub>o</sub> = Concentración en el afluente*

*Q = Caudal que ingresa o que sale del reactor*

*C = Concentración en el reactor o el afluente*

*r<sub>g</sub> = Tasa de generación*

*r<sub>e</sub> = Tasa de consumo*

La masa de materia orgánica (MO) generada diariamente se conoce como estado estacionario cuando no existe acumulación de MO en el tratamiento, la masa diaria de MO será calculada con la ecuación N°4.

$$V \frac{dC}{dt} = Q \times C_o - Q \times C + V \times r_g + V \times r_e$$

.....(Ecuación 4)

**a) Características de los lodos**

La composición de los lodos es variable ya que está directamente relacionado con la composición del efluente de cuerpos de aguas tratadas y las características de los tratamientos aplicados. Los lodos contienen diversidad de material suspendido o disuelta como (materia orgánica, nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y en menor cantidad calcio (Ca), magnesio (Mg) y otros micronutrientes esenciales para las plantas, compuestos también de metales pesados como cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Pb), Zinc (Zn), patógenos y concentraciones orgánicas contaminantes, así lo confirma en el estudio de caracterización de lodos realizados en España (Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino, 2009).

Según Metcalf y Eddy (2003) menciona que las características dotadas a los lodos generados y tratados dependen principalmente de su origen, tiempo de retención y el tiempo de su tratamiento.

Tabla 9

*Composición química de lodos producidos y tratados*

Parámetros	Unidades	Lodo primario	Lodos primario digerido	Lodo secundario
<b>Concentración de sólidos</b>	%	5-9	2-5	0.8-1.2
<b>Sólidos volátiles</b>	% de ST	60-80	30-60	59-88
<b>Proteína</b>	% de ST	20-30	15-20	32-41
<b>Nitrógeno (N)</b>	% de ST	1.5-4	1.6-3	2.4-5
<b>Fosforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>	% de ST	0.8-2.8	1.5-4	2.8-11
<b>Oxido de potasio (K<sub>2</sub>O)</b>	% de ST	0-1	0-3	0.5-0.7
<b>Celulosa</b>	% de ST	8-15	8-15	-
<b>Hierro</b>	% de ST	2-4	3-8	-
<b>Oxido de silicio (SiO<sub>2</sub>)</b>	% de ST	15-20	10-20	-
<b>pH</b>	upH	5-8	6.5-7.5	6.5-8
<b>Alcalinidad</b>	Mg/CaCo <sub>3</sub> /L	500-1500	2500-3500	580-1100
<b>Ácidos orgánicos</b>	Mg HAc/l	200-2000	100-600	1100-1700
<b>Contenido energético</b>	Kj ST/kg	23000-29000	9000-14000	19000-23000

Fuente: Paredes (2007)

Debido a las características físico-químicas, los lodos tienen la capacidad de acumular metales y compuestos orgánicos, siendo esta una ventaja que hace que el lodo dependa de la calidad del agua residual tratada y esta de cuatro grupos de contaminantes como los metales, nutrientes, contaminantes orgánicos y patógenos.

### ***a.1) Metales***

Son fundamentales para los organismos vivos donde se manejan en los procesos metabólicos como en los pigmentos (Fierro, cobre, vanadio), vitaminas (cobalto), y en las enzimas (Zinc). Cuando incrementa la concentración de metales estos se vuelven tóxicos. Los metales tienen su potencial acumulación en los tejidos humanos y su biomagnificación en la cadena alimenticia anuncian preocupaciones tanto ambientales como sanitarias, y la cantidad de concentración bajas en las aguas residuales menos que las industriales donde la concentración es elevada (Marlé y Pantoja, 2009).

### ***a.2) Nutrientes***

Los lodos contienen cantidades de nitrógeno (N) y fósforo (P), donde aproximadamente el 80% de todo el nitrógeno presente en el lodo, son disponibles en las plantas, nitrógeno orgánico y en sus cuatro formas como  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$  y  $\text{NO}_3\text{-N}$ , las últimas están útiles para el uso como nutrientes, para ello se deberá de convertir en nitrógeno orgánico a inorgánico para que ingrese en su metabolismo. En caso del fósforo su potencial peligrosidad inicia en su alta eutrofización para las aguas subterráneas y superficiales (Marlé y R. Pantoja, 2009).

### ***a.3) Contaminantes orgánicos***

Otro de los contaminantes como son los plaguicidas, los disolventes, los colorantes, como las moléculas orgánicas complejas, generalmente son poco solubles en el agua, así mismo contienen una elevada capacidad de adsorción en los lodos. Debido a ello la preocupación por sus efectos potenciales sobre el ambiente y la salud. La biodegradación es lenta por lo que se puede expandir en la tierra o mediante compostaje (Marlé y R. Pantoja, 2009).

#### ***a.4) Patógenos***

Los lodos contienen bacterias, virus, protozoarios, parásitos y otros patógenos unos son favorecedores algunos no. Durante los procesos de depuración de las aguas residuales, el efluente está libre de patógenos, sin embargo en el proceso de sedimentación primaria y secundaria los microorganismos patógenos se encuentran en los lodos. Por lo que se conocen dos clases de microorganismos como la Salmonella la más predominante en los lodos, donde solo se inactiva por medio de la incineración y proceso de digestión aerobia y anaerobia. El otro tipo son los parásitos en los lodos que contienen huevos de cisticercos, nematodos y especies arcaicas lo que ocasiona infección y dentro de los virus están los polio, la hepatitis y rotavirus generadores de problemas gastrointestinales (Castillo et al., 2011).

#### ***a.5) Manejo de Lodos***

Los biosólidos generados en una PTAR en la mayoría de los casos son dispuestos sin tratamiento en tiraderos a cielo abierto, rellenos sanitarios y sistemas de alcantarillados lo que ocasiona una huella ambiental desfavorable, casos como el de México Según Inguez-Fern et al (2011) su aplicación abierta en los campos de la agricultura, representando así un riesgo potencial para la salud debido a la presencia de metales pesados (As, Cd, Hg, Pb, Se y Zn) que puede presentarse a los cultivos (Cu, Ni, y Zn) y ecosistemas del suelo y agua (N,P).

## CAPITULO III

### ADSORCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO MEDIANTE CARBÓN ACTIVO PRODUCIDO POR REGENERACIÓN DE LODOS PROVENIENTES DE UN *UPFLOW ANAEROBIC SLUDE BLANKET*

#### Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar la eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S mediante carbón activo obtenido de la regeneración de lodos provenientes de un *Upflow Anaerobic Slude Blanket*. El sistema de adsorción H<sub>2</sub>S se realizó en el laboratorio de Química de la Universidad Peruana Unión, el caudal de ingreso de las torres de lecho fijo fue de 4 L/min y 36 gr de medios adsorbentes (6 diferentes Carbones Activos (C.A) en función a Temperaturas de pirolización (TP) y [M] de KOH), C.A a TP 700 °C/1M, C.A TP 500 °C/4M, CA TP 500 °C/1M, CA TP 700 °C/4M y CA TP 600 °C/2.5 M la última con dos repeticiones. La adsorción del H<sub>2</sub>S se determinó el método volumétrico de oxidación-reducción. El parámetro de mayor influencia para la adsorción del H<sub>2</sub>S fue la TP a un 99 y 90 % de IC respectivamente, demostrada por el diseño factorial 2<sup>2</sup> y 3<sup>2</sup>; se obtuvieron eficiencias de eliminación satisfactorias de H<sub>2</sub>S y alcanzaron el 94% durante un tiempo de retención de 20 min del carbón activo a TP 700°C y [1M] KOH. Por tanto, la adsorción del H<sub>2</sub>S mediante carbones activos de lodos es una nueva alternativa viable y sostenible para el ambiente.

**Palabras clave:** Adsorción, Sulfuro de Hidrógeno, Carbones Activos

#### Abstrac

The objective of this study was to determine the efficiency of H<sub>2</sub>S adsorption by activated carbon obtained from the regeneration of sludge from an *Upflow Anaerobic Slude Blanket*. The H<sub>2</sub>S adsorption system was carried out in the Chemistry laboratory of the Universidad Peruana Unión, the inflow of the fixed bed towers was 4 L / min and 36 g of adsorbent media (6 different Active Carbon (CA) depending on a Pyrolyzation temperatures (TP) and [M] KOH), CA at TP 700 ° C / 1M, CA TP 500 ° C / 4M, CA TP 500 ° C / 1M, CA TP 700 ° C / 4M and CA TP 600 ° C / 2.5 M the last with two repetitions. The adsorption of H<sub>2</sub>S was determined by the volumetric oxidation-reduction method. The parameter of greatest influence for the adsorption of H<sub>2</sub>S was TP at 99 and 90% IC respectively, demonstrated by factorial design 2<sup>2</sup> and 3<sup>2</sup>; satisfactory elimination efficiencies of H<sub>2</sub>S were obtained and reached 94% during a retention time of 20 minutes of activated carbon at TP 700 ° C and [1M] KOH. Therefore, the adsorption of H<sub>2</sub>S by activated carbons of sludge is a new viable and sustainable alternative for the environment.

**Keywords:** Adsorption, Hydrogen Sulfide, Active Carbon

### 3.1. Introducción

La contaminación atmosférica viene preocupando cada vez más a la sociedad, pues afecta directamente la calidad de vida de las personas (Silva, da Silva, Corrêa, y Arbilla, 2018). El H<sub>2</sub>S es típicamente el contaminante más problemático porque es tóxico y corrosivo para la mayoría de los equipos en caso de procesos industriales, y la combustión de esta conduce a emisiones de dióxido de azufre, que tienen efectos ambientales nocivos (Omri, Bouallagui, Aouidi, Godon y Hamdi, 2011). En los últimos años el H<sub>2</sub>S se encuentra en niveles altos en los sistemas de alcantarillado, sacrificio de animales, fuentes industriales como petróleo, procesamiento de gases, planta de energía geotérmica, molinos de pulpa, etc. (Rubright, Pearce, y Peterson, 2017). La eliminación del sulfuro de hidrógeno (principal compuesto odorífero) es de vital importancia ya que será un beneficio para todo el personal que opera dentro de los sectores industriales que generan H<sub>2</sub>S y poblaciones aledañas, contribuyendo en la protección de la salud individual y colectiva de la población cercana a los lugares donde se genera el H<sub>2</sub>S en armonía con el ejercicio pleno del derecho fundamental a vivir en un ambiente equilibrado y adecuado para el desarrollo de la vida.

Por lo mencionado desde antaño se vienen investigando sobre varias alternativas de eliminación del H<sub>2</sub>S, Rabindra Kumar, Sinha, Norman J. Wagner y Ronald S. Joyce (1798) estudiaron la adsorción utilizando hidróxido de sodio conjuntamente con el carbón activado, en 1982 buscaron eliminar este gas (H<sub>2</sub>S) con peróxido de hidrógeno y compuestos de níquel o hierro como catalizador Szarblewski, Schneider y Machado (2012), asimismo Ortiz, Aguilera y Ollero (2014) la desulfuración por adsorción utilizando lodos de depuradora tratados térmicamente.

Sin embargo, en los últimos años el alto costo de las tecnologías de adsorción mencionadas ha provocado un creciente interés de investigación en la producción de alternativas de bajo costo de adsorbentes de una amplia gama de precursores de residuos como los neumáticos, lodo de papel, alimentos, desechos agrícolas y lodos de una PTAR. Por ello, la presente investigación tiene por objetivo evaluar la eficiencia de adsorción del  $H_2S$  mediante carbones activos obtenidos a partir de lodos generados en un reactor UASB, además se ha centrado en el estudio de la significancia de parámetros de la temperatura de pirolización, y concentración molar del agente activante en la obtención de medio adsorbente óptimo para la adsorción del  $H_2S$  mediante la aplicación de un diseño factorial estadístico  $3^2$ .

Un factor significativo del presente trabajo es el uso de un residuo como material precursor (lodos secos de un UASB) para los carbones activos, además el tiempo de retención empleada para la adsorción del  $H_2S$ , en los pocos estudios encontrados en la literatura del uso de lodos como medio adsorbente, usualmente se trataron en tiempos prolongados mayores a 1 hora, en este caso fue de 20 min., ello tiene una gran importancia, si el proceso se implementa a escala comercial, reducirá los costos de operación, además dotará de viabilidad y sostenibilidad al ambiente.

Para la eliminación de  $H_2S$ , una de las formas de tratamiento es mediante carbones activados. La baja disponibilidad de materias primas es una de las desventajas ya que implica el incremento de costos y la necesidad de regeneración o gestión como residuo de los carbones activos impregnados. Por tal razón, y unido al problema de la creciente generación de residuos por legislaciones de depuración más estrictas, este proyecto se ha centrado en la utilización de residuos para la elaboración de adsorbentes. Por ello, se utilizarán lodos secos procedentes de la depuración de aguas residuales domésticas, valorizándolos de este modo.



## **3.2. Material y métodos**

### **3.2.1. Lugar de ejecución**

El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, ubicada en el km 19.5 de la carretera central, Ñaña, Lurigancho-Lima. El proceso de pruebas se ejecutó desde diciembre del 2017 a fines de febrero del 2018.

### **3.2.2. Muestra**

Las muestras del precursor de los carbones activos utilizados para la adsorción del  $H_2S$ , fueron los lodos originados en el reactor UASB del centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales (CITRAR FIA-UNI). Estos reciben un tratamiento de deshidratación por percolación y evaporación. La temperatura ambiental máxima de los lodos insitu es de 32.8 °C, del lodo en el lecho de secado 42.2 °C, pH de 6-7.5, sólidos totales 94.5 % y humedad 1. 61 %. El material precursor utilizado tuvo un tiempo de deshidratación de 8 meses aproximadamente (Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales, 2016).

### **3.2.3. Área de Estudio del material precursor**

El mapa de ubicación (ver anexo VI), muestra el lugar de la procedencia del material precursor usado para la preparación de los carbones activos. Se encuentra ubicado en la Av. Túpac Amaru distrito de Rímac Lima-Perú, en la zona norte del campus de la Universidad Nacional de Ingeniería, en las coordenadas siguientes 276759.00 m E, 8671375.00 m S.

Asimismo la figura 7 muestra el flujograma de la planta de tratamiento de agua residual del Centro de Investigación de Tratamiento de aguas residuales Domésticas y Residuos Peligrosos, para aclarar la unidad específica del origen del material precursor a emplear para la elaboración de los carbones activos.

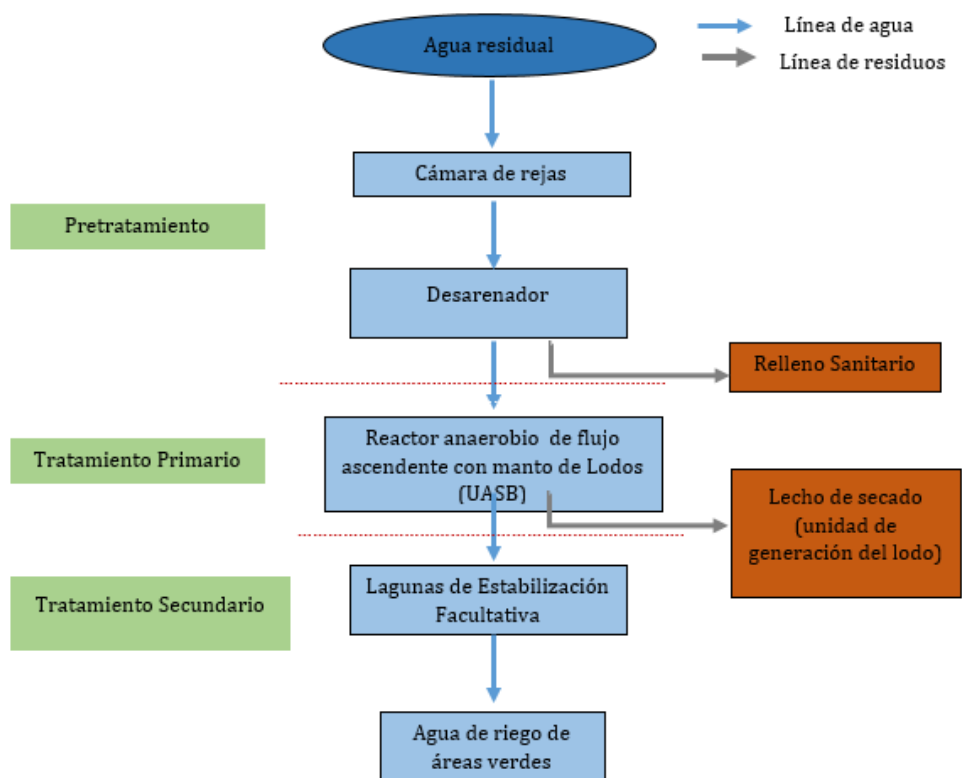


Figura 7. Flujograma de la Planta de Tratamiento de Aguas residuales CITRAR-UNI

### 3.2.4. Materiales y Equipos

Para la implementación del sistema de adsorción se emplearon los materiales y equipos mostrados en las tablas 58-61 del anexo VI, asimismo se detalla los esquemas del diseño de la investigación en el mismo anexo.

### 3.2.5. Metodología

El desarrollo de la investigación constituyó de cuatro partes: la implementación del sistema de adsorción del  $H_2S$  a escala piloto, obtención de carbones activos, preparación de reactivos y monitoreo para la determinación de la remoción  $H_2S$ , finalmente la caracterización de los carbones activos preparados a partir de lodos.

### 3.2.5.1. Sistema de adsorción del H<sub>2</sub>S a escala piloto

La instalación diseñada fue constituida de tres partes principales: zona de generación de gas (H<sub>2</sub>S), zona de almacén y dilución del H<sub>2</sub>S, sistema de las torres de adsorción; para lo cual se desarrollaron cálculos previos, mostradas en el ANEXO II, obteniéndose los resultados siguientes tabla 10.

Tabla 10

*Cantidad de insumos a utilizar para la generación del H<sub>2</sub>S*

Numero	Reactivo	cantidad	Unidades
1	FeS	105.26	g
2	H <sub>2</sub> S	23.46	litros
3	HCl al 7 %	1104.94	ml

Para la realización de las pruebas se utilizó (H<sub>2</sub>S) gas simulado, generado químicamente a partir de sulfato de hierro y ácido clorhídrico a una concentración del 7 % para verificar la certificación del producto y ficha MSDS. (Ver anexo VI)

#### ***-Diseño de las torres de lecho fijo***

La determinación del volumen y dimensiones de las torres de lecho fijo se realizó en base a los cálculos empleados en la tesis (González Aguilera, 2016). Considerándose el borde libre, espesor y los orificios para el ingreso del ácido sulfhídrico, el soporte del adsorbente tendrá las dimensiones mencionadas en la tabla 11.

*Datos:*

T= 20 min (tiempo de acumulación del sulfuro de hidrógeno)

Q= 4 l/min

$$V = Qxt$$

**Ecuación 1.** Determinación del volumen del almacén del gas toxico

$$V = Qxt$$

$$V_{\text{sulfuro de hidrogeno}} = 4 \frac{L}{\text{min}} \times 20 \text{min} = 80 L$$

La concentración de olores de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) se utilizó los datos obtenidos en investigaciones anteriores tomando los valores críticos de un monitoreo de acuerdo a los antecedentes del estudio realizado en planta, siendo la concentración máxima de 180 ppm, a partir de ello se realizó el dimensionamiento de la torres de lecho fijo.

Tabla 11

*Datos para el diseño de las torres de lecho fijo*

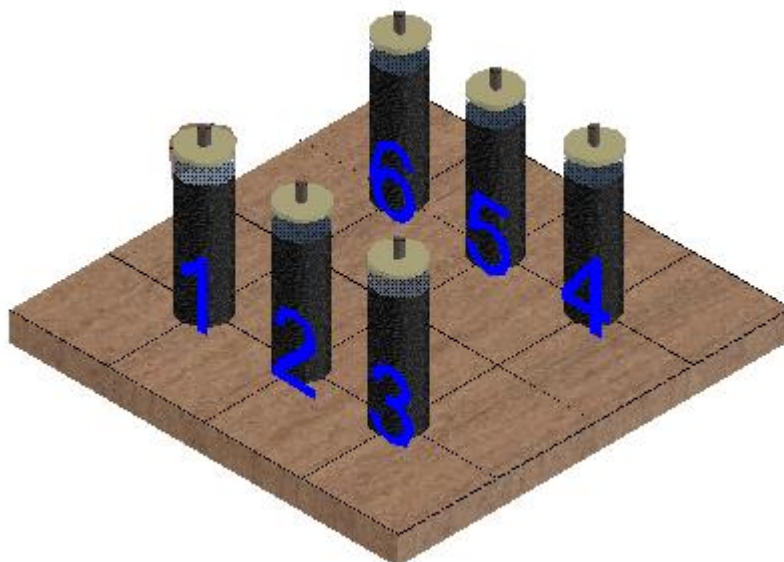
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Caudal	4	L/min
Temperatura	19	°C
Concentración	50-200	ppm

Tabla 12

*Características del material de las torres de lecho fijo*

<b>Características del material acrílico</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Altura	20	cm
Espesor	3	mm
Diámetro interno	8	cm
Diámetro externo	3.6	pulg.
Orificios para la distribución homogénea del ácido sulfhídrico	0.5	cm
<b>Torre de lecho fijo</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>

Volumen	1.5	L
Altura del medio adsorbente	0.20	m
Borde Libre	0.50	m
Altura total del biofiltro	0.30	m



*Figura 8.* Diseño de las torres de lecho fijo

### 3.2.6. Procedimientos

#### 3.2.6.1. Preparación de reactivos

Los reactivos empleados para la elaboración de los carbones activos fueron el Hidróxido de potasio (KOH) y el ácido clorhídrico, asimismo se utilizó diferentes reactivos para la determinación del  $H_2S$ , posteriormente se detalla la preparación de estos.

La preparación de reactivos se realizó en dos fases: se preparó la dilución de reactivos como agente activante el KOH a diferentes concentraciones molares y los reactivos necesarios para la determinación del  $H_2S$ .

**a) Preparación del reactivo Activante a diferentes concentraciones molares**

La solución de KOH fue preparada con el reactivo proveniente de la distribuidora CIMATEC S.A.C. El KOH adquirido en presentación granulada, con una densidad aparente y solubilidad apreciable en agua (> 10%), soluble en alcohol y glicerina, insoluble en amoníaco y éter. (Ver en anexo VI.)

El reactivo activante del KOH se preparó a las siguientes concentraciones molares de 4M, 2.5M y 1M, por consiguiente se realizó los cálculos siguientes (ver anexo II), para la primera concentración molar se utilizó 56.11 g de KOH y 750 ml de agua destilada, para la segunda concentración molar 140.275 g de KOH y 750 ml de agua destilada y finalmente 64.53 g de KOH y 750 ml de agua destilada para 1 M.

**b) Reactivos para la determinación del  $H_2S$ .**

-Disolución de Iodo ( $I_2$ ) 0.0025 M: Disolver 5.0 g de KI y 0.635 g de  $I_2$  en 1L de agua destilada.

-Disolución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 1 M: Diluir 55 ml de ácido sulfúrico concentrado en 1L de agua destilada.

-Disolución de almidón al 0.4 %: disolver 0.4 g de almidón soluble en 5 mL de agua (hasta formar una pasta). Agregar a esta pasta a 100 mL de agua destilada hirviendo. Luego, agregar 0.2 g de ácido bórico y hervir la disolución por 1-2 minutos.

-Disolución de tiosulfato de sodio ( $Na_2S_2O_3$ ) 0.01 M estandarizada: Esta fue adquirida preparada de un laboratorio de química por la exactitud requerida.

**3.2.6.2. Obtención del carbón activado a partir de lodos residuales producidos en un UASB**

La obtención del medio adsorbente para la desulfuración se obtuvo siguiendo las etapas que muestra la figura 9, asimismo la muestra precursora fue sometida a diferentes temperaturas de pirolización y concentración de agente activante (KOH) como indica la tabla 13, además se

siguió ese orden de tratamientos térmicos y posteriores lavados con los reactivos respectivos a emplear.

Tabla 13

*Proceso de la regeneración del lodo de una PTAR*

<b>A</b>	Activación
<b>A.A</b>	Agente activante
<b>-A</b>	Muestra sometida con ácido HCL 5M
<b>-AI*</b>	Muestra Activada químicamente con NaOH o KOH (N o K) mediante el método de impregnación
<b>-AMF*</b>	Muestra activada químicamente con NaOH o KOH (N o K) mediante el método de Mezcla Física
<b>-AMFt*</b>	Muestra activada químicamente con NaOH o KOH (N o K) mediante el método de Mezcla Física Triturada
<b>Au</b>	Austenita, CaZn ((OH)/(AsO <sub>4</sub> ))



*Figura 9.*Proceso de la obtención del Carbón Activado a partir de lodos de una PTAR

El procedimiento de tratamiento previo del lodo residual utilizado como adsorbente del  $H_2S$  se realizó como sigue:

-Se recolectó lodo deshidratado proveniente de lecho de secado del reactor UASB de la PTAR de CITRAR FIA-UNI, en seguida se realizó la molienda en un mortero de porcelana y luego se tamizó con un tamiz de  $1\text{ cm}^2$  hasta obtener 150 gramos de la muestra para cada tipo de carbón activo a preparar.

-Luego de tener un tamaño homogéneo de lodos se realizó la activación empleando 2 ml por gramo de KOH a diferentes concentraciones molares como muestra la tabla 14. Se dejó la

mezcla durante 1 hora y posteriormente se filtró para eliminar el reactivo residual de la mezcla precursor y reactivo activante, en seguida se llevó a una estufa a 110 °C durante un periodo de 12 horas.

-El lodo secado se llevó a pirólisis en una mufla según las temperaturas indicadas en la Tabla 19 de 500 °C, 600°C y 700 °C durante 1 hora. Después del tratamiento térmico se realizó un proceso de lavado empleando en primer lugar 100 ml de disolución de HCl al 5 %, luego se llevó a un agitador durante 4 horas, posteriormente se filtró para eliminar el reactivo residual, luego se realizó el lavado con agua destilada hasta obtener pH neutro 4-5 aproximadamente, finalmente las muestras son sometidas a la estufa a 105 °C durante 2 horas para el secado, y se realizó el pesado de los finalmente carbones activos. El primer lavado se realizó para eliminar la materia mineral residual y los productos derivados de la activación, mientras en el segundo se eliminan los posibles restos de ácidos.

### **3.2.7. Monitoreo**

#### **a) Determinación del $H_2S$**

La medición de la concentración del  $H_2S$  se realizó mediante un método volumétrico indirecto de oxidación-reducción en donde el sulfuro de hidrógeno en medio acuoso es oxidado por una cantidad equivalente de yodo, cuyo remanente es valorado con una disolución estandarizada de tiosulfato de sodio empleando un indicador visual de almidón.

El procedimiento realizado para la determinación de  $H_2S$  fue la siguiente, primero se coloca una alícuota de 5 ml de disolución de 0.0025 M  $I_2$  en un erlenmeyer de 50 mL; seguido se agregar 5 mL de 1 M8  $H_2SO_4$  y una alícuota de 1-5 ml de muestra ( $V_m$ ); valorar con la disolución de 0.01 M  $Na_2S_2O_3$  (Cnv), estandarizada, hasta que la disolución tenga una coloración amarillo pálido, seguidamente, agregar 5 gotas de almidón al 0.4 %, continuar la



valoración hasta la desaparición del azul y anotar el volumen final (V). Se repite los pasos de 1-4 para el resto de las muestras; valorar un blanco repitiendo los pasos mencionados y registrar el volumen de tiosulfato consumido por el blanco (vb).

$$H_2S \text{ (mg/L)} = 17040.44 * C_{nv} \left( \frac{V_b - V}{V_m} \right)$$

Cnv: Concentración de tiosulfato de sodio, mol/L

Vb: Volumen de tiosulfato de sodio consumido por el blanco, mL

V: volumen de tiosulfato de sodio consumido por la muestra, mL

Vm: volumen de la alícuota de muestra, mL

La eficiencia se determinó con la ecuación mostrada abajo con los datos obtenidos de un monitoreo continuo del afluente de biogás (biogás antes de pasar por el medio adsorbente) y efluente (biogás luego del medio adsorbente)

$$e = (C_a - C_e) \dots\dots\dots(\text{Ecuación 6})$$

*e = Remoción del sulfuro de hidrógeno*

*C<sub>a</sub> = Concentración del sulfuro de hidrogeno, afluente a las torres de fijo*

*C<sub>e</sub> = Concentración del sulfuro de hidrogeno, efluente a las torres de fijo*

$$E\% = \frac{e * 100}{C_a} \dots\dots\dots(\text{Ecuación 7})$$

*E = Eficiencia de remoción del sulfuro de hidrógeno en %*

### 3.2.8. Diseño, variables de estudio y análisis estadístico

#### 3.2.8.1. *Diseño estadístico*

Se aplicó el diseño experimental factorial ( $2^2$  y  $3^2$ ) con puntos centrales que consiste de 4 puntos factoriales, 2 puntos centrales, totalizando 6 experimentos. Los rangos y niveles de las variables independientes usados en la forma codificada y no codificada en este estudio son mostrados en la tabla 14.

En muchos experimentos interviene el estudio de los efectos de dos o más factores. En general, los diseños factoriales son más aplicables para el tipo de experimentos mencionados. Por diseño factorial se entiende que en cada ensayo o replica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores Rodríguez (2014).

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor, con frecuencia se le llama efecto principal porque se refiere a los factores de interés primario en el experimento.

Si varios de los factores de un experimento factorial son cuantitativos, se puede usar una superficie de respuesta para modelar la relación entre los parámetros establecidos y los factores del diseño para lo cual se generó el grafico de contorno de respuesta (Montgomery, 2004).

Los experimentos se realizaron en orden y los datos analizados por análisis de varianza, normalidad, para comparar el efecto de los tratamientos. Los parámetros del modelo de primer orden de los efectos para el diseño factorial de dos factores será (Rodrigues y Iemma, 2014):

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \dots \dots \dots \text{(Ecuación 8)}$$

Donde  $y$  es la respuesta predicha medida;  $\beta_0$  es el intercepto;  $\beta_i$  y  $\beta_{ij}$  son los coeficientes del modelo lineal e interacción y  $X_i$  y  $X_j$  son los valores codificados de las variables independientes.

### 3.2.8.2. Análisis estadístico

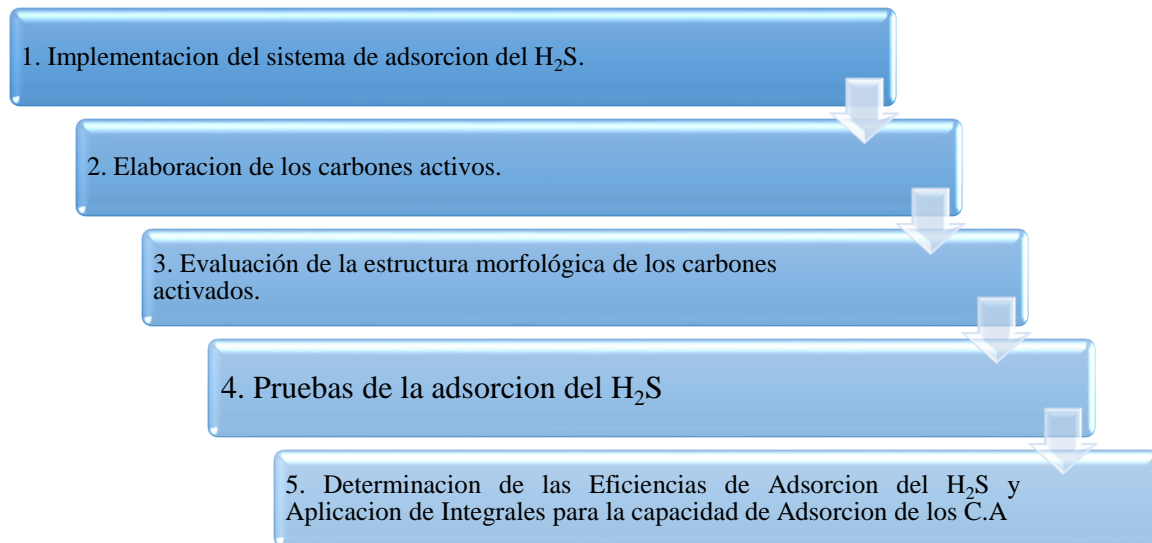
Los gráficos de contorno y superficie de respuesta son usados para mostrar la relación entre la respuesta y los niveles de cada variable independiente y deducir las condiciones óptimas. Todos los análisis estadísticos se realizaron a un nivel de significancia de 5 % ( $p \leq 0.05$ ) usando el software STATISTICA versión 13.1.

Tabla 14

*Factorial variable codificados y no codificados para la obtención de los resultados del H<sub>2</sub>S*

Tratamientos	Variables Independientes				Variable Dependiente
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	T.P (°C)	A.A ([] M KOH)	[] H <sub>2</sub> S (ppm)
1	-1	-1	500	1.0	-
2	-1	1	700	1.0	-
3	1	-1	500	4.0	-
4	1	1	700	4.0	-
5	0	0	600	2.5	-
6	0	0	600	2.5	-

## Flujograma de la Investigación



*Figura 10.* Proceso de diseño de investigación

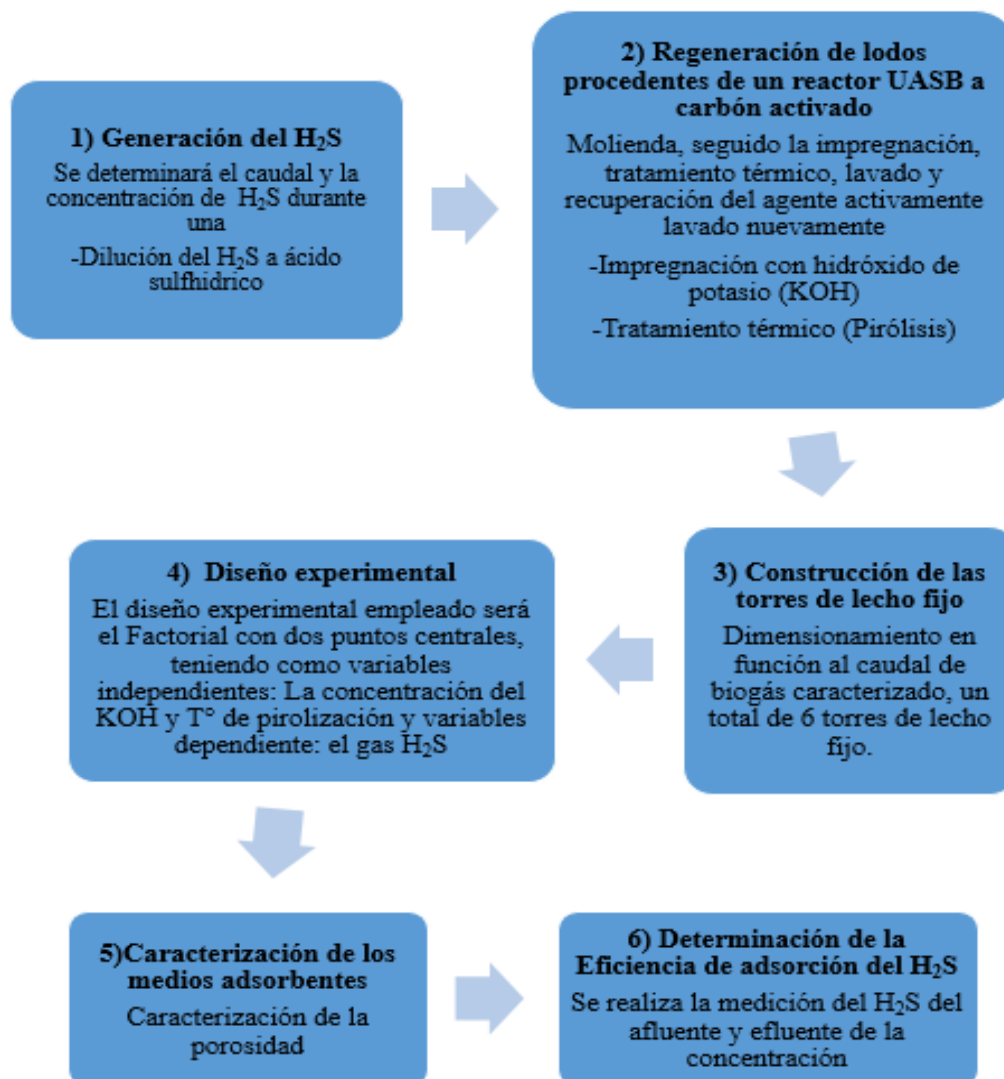


Figura 11. Proceso del diseño de investigación

### 3.3. Resultados y Discusión

El sulfuro de hidrógeno puede eliminarse física y químicamente debido a la estructura porosa, la presencia de metales y la alcalinidad de la superficie del adsorbente elaborado. Una característica importante de los materiales derivados de lodos es su basicidad, principalmente, por la adición de calcio o magnesio durante el proceso de tratamiento de fangos, y la presencia de componentes en forma de óxidos.

### 3.3.1. Características del Material Precursor.

Tabla 15

*Características del Material Precursor*

<b>Lodos del Lecho de secado del reactor UASB</b>		
<b>Tiempo de Exposición</b>	<b>Sólidos Totales (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>
0	8.2	91.8
43	93	7
85	94	6

**Fuente:** CITRAR-FIA-UNI (2018)

La tabla 15 muestra las características del material precursor de los carbones activos, los resultados indican que la cantidad de sólidos totales, y % humedad disminuye en función al incremento del tiempo de exposición, los resultados (tabla 15) reflejan el mecanismo de la deshidratación por las condiciones atmosféricas, específicamente la radiación solar ya que a medida que incrementa el tiempo de exposición el % de humedad se reduce de 91.8 a 6 % .

### 3.3.2. Características de los medios adsorbentes obtenidos

Tabla 16

*Características de las condiciones de obtención de los medios adsorbentes*

<b>Numero de C.A</b>	<b>T °C S</b>	<b>TS</b>	<b>[M] KOH</b>	<b>TC con A.A</b>	<b>TP °C</b>	<b>PH</b>
TP 500°C/ [1M] KOH	110 °C	12 h	1 M	1 h	500 °C	4.5
TP 500 °C/ [4M] KOH	110 °C	12 h	4 M	1 h	500 °C	4.2
TP 700 °C/ [1M] KOH	110 °C	12 h	1 M	1 h	700 °C	5.0
TP 700 °C/ [4 M] KOH	110 °C	12 h	4 M	1 h	700 °C	4.0
TP600°C/[2.5M] KOH	110 °C	12 h	2.5 M	1 h	600 °C	4.8
TP600°C/[2.5M] KOH	110 °C	12 h	2.5 M	1 h	600 °C	4.7

T°C S=Temperatura de secado TS=Tiempo de Secado TC con A.A= Tiempo de contacto con Agente Activante y TP °C= Temperatura de Pirolización

Cotoruelo, Marqués, Díaz, Rodríguez-mirasol y Rodríguez (2012) afirman que el tiempo de activación no influye en gran medida en la capacidad de adsorción, por ello los 6 diferentes carbones activos preparados fueron sometidos durante 1 hora a la mufla como muestra la tabla 16.

Los mismos, recalcan que el proceso de la pirólisis se realiza en ausencia de oxígeno para evitar la combustión, en este caso (lodo seco y la adición del KOH) que permite el desarrollo de la porosidad interna, se eliminan las sustancias y los residuos carbonosos depositados, abriendo poros actuales y desarrollando nuevos. La pirólisis o calcinación de los lodos produce cambios físico-químicos con una pérdida de peso significativa entre 50 g a 100 g, debido a la volatilización de la materia orgánica, también por deshidroxilación de hidróxidos y descomposición de sales inorgánicas, lo que efectivamente se muestra en la tabla 17 la diferencia de pesos significativa entre los g de material precursor iniciales (140-180 g) a la cantidad de carbón activo obtenidos (45-53 g).

Tabla 17

*Variación de pesos en gr en el proceso de obtención de los carbones Activos*

<b>Carbón Activo</b>	<b>M.P Secado (Estufa)</b>	<b>M.P Secado (Mufla)</b>	<b>M.P Secado (Estufa)</b>	<b>Unidad (Gramos)</b>
TP 500 °C/ [1M] KOH	140.65	97.27	46.02	gr
TP 500 °C/ [4M] KOH	161.95	104.52	45.70	gr
TP 700 °C/ [1M] KOH	147.45	91.27	49.10	gr
TP 700 °C/ [4 M] KOH	177.69	116.34	49.87	gr
TP600°C/[2.5M] KOH	150.00	109.78	51.59	gr
TP600°C/[2.5M] KOH	146.00	108.64	52.59	gr

M.P=Material precursor TP: Temperatura de Pirolización [M]=Concentración Molar

Por otro lado, los carbones pirolizados fueron lavados con HCl al 5 % a temperatura ambiente en un agitador magnético; en este proceso según la bibliografía se debe lavar hasta llegar a pH neutro, sin embargo, en la presente investigación se realizó el lavado hasta pH

menores a 7 siendo que el proceso requiere una cantidad considerable de agua, por tanto todos los carbones activos elaborados tienen pH en un intervalo de 4-5 tabla 16. Ros et al. (2006) afirman que el pH básico favorece la formación de azufre elemental y polimérico como productos finales de oxidación; hay un umbral de pH por debajo del cual este proceso se vuelve inviable. Sin embargo, probablemente no aplica a nuestros materiales derivados de lodo ya que incluso a pH muy bajo, la capacidad de adsorción sigue siendo significativa.

### **3.3.3. Determinación de las eficiencias de adsorción**

Una vez implementado el sistema de la adsorción del H<sub>2</sub>S como muestra la figura 45 (ver anexos I), los resultados obtenidos de la concentración del H<sub>2</sub>S del efluente de cada torre de lecho fijo atravesado por el líquido diluido del H<sub>2</sub>S se procedió a calcular la eficiencia de adsorción de cada medio de adsorción mediante la fórmula mostrada en el apartado de la metodología, así como otros datos de interés para el presente trabajo para una mejor interpretación del trabajo se muestran los resultados de las 10 réplicas de cada medio adsorbente en el anexo III.

#### ***-Eficiencia de adsorción de las pruebas preliminares***

Se realizó ensayos para corroborar si los parámetros escogidos fueron los significativos para obtener los adsorbentes óptimos para remover el H<sub>2</sub>S, de los cuales se obtuvo los resultados mostrados en las tablas 18, 19, 20 y 21.



**1) Eficiencia de adsorción mediante Carbón Activo obtenido a una temperatura de pirolización de 500 y Agente Activante de 1 M KOH.**

Tabla 18

*Carbón Activo obtenido a una TP 500 °C y A.A de 1M KOH*

Carbón Activo elaborado	Temperatura Pirolización (°C)	Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente H <sub>2</sub> S	Efluente H <sub>2</sub> S	% Eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S
1	500	4 M	1	112.47	17.04	84.85
			2	54.53	6.82	87.50
			3	194.26	57.94	70.18
			4	54.53	6.82	87.50
			5	119.28	10.22	91.43
			6	289.69	58.00	79.98
			7	174.00	47.60	72.64
			8	173.00	20.45	88.18
			9	183.63	26.00	85.84
			10	173.00	34.88	79.84
			11	60.89	17.04	72.01

**2) Eficiencia de Adsorción con Carbón Activo obtenido a una temperatura de pirolización de 500 y A.A de 4 M KOH.**

Tabla 19

*Carbón Activo obtenido a una TP 500 °C y A.A de 4 M KOH*

Carbón Activo elaborado	Temperatura Pirolización (°C)	Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente de H <sub>2</sub> S ppm	Efluente de H <sub>2</sub> S ppm	% Eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S
2	500	1 M	1	54.53	17.04	68.75
			2	119.28	37.49	68.57
			3	235.16	51.12	78.26
			4	64.75	23.86	63.16
			5	119.28	37.49	68.57
			6	211.30	68.16	67.74
			7	168.00	57.40	65.83
			8	169.51	67.34	60.27
			9	180.20	69.50	61.43
			10	60.85	22.46	63.09
			11	60.86	22.84	62.47

En la tabla 19 se observa que la eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S del carbón activo obtenido a una TP de 500 °C y A.A de 1 M KOH llega a una eficiencia de 66.2 % de remoción del H<sub>2</sub>S. La concentración promedio del ácido sulfhídrico en el efluente es 43.15 ppm el resultado obtenido aun es alta, este puede causar dolor de cabeza, irritación del tracto respiratorio, por lo que se afirma que la eficiencia de este medio de adsorción no es óptima. Investigación realizada por Grima-Olmedo, Ramírez-Gómez, Gómez-Limón y Clemente-Jul (2016) encontraron que los adsorbentes preparados a temperaturas bajas presentan menor capacidad de adsorción, probablemente debido al insuficiente desarrollo en la formación de su estructura porosa, lo que efectivamente se corrobora en los resultados mostrados en tabla 19.

Un medio de adsorción preparado a una TP y activación de 500 °C y 4 M de KOH posee una eficiencia en un rango promedio de 70 % -80 %, 27.53 ppm es la concentración promedio de H<sub>2</sub>S luego del tratamiento con el tipo de medio adsorbente descrito anteriormente. Teniendo en cuenta las mismas TP de 500 °C, quien posee mayor eficiencia de adsorción es el carbón activo de mayor concentración molar de 4 M de KOH, Motato y Arrieta (2016) afirman que el reactivo activante se le aplica para la limpieza del material precursor ello influye en la calidad del adsorbente obtenido fenómeno probable ocasionado en este caso.

### 3) Eficiencia de Adsorción del Carbón Activo obtenido a una Temperatura de Pirolicación de 700 y Agente Activante de 1 M KOH.

Tabla 20

*Carbón Activo obtenido a una TP 700 °C y A.A de 1M KOH*

Carbón Activo elaborado	Temperatura Pirolicación (°C)	[ ] Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente H <sub>2</sub> S	Efluente H <sub>2</sub> S	% Eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S
3	700	1 M	1	169.77	10.00	94.11
			2	166.31	8.68	94.78
			3	145.52	9.63	93.38
			4	117.80	9.09	92.28
			5	102.56	4.72	95.40
			6	117.80	9.09	92.28
			7	117.80	9.09	92.28

8	117.80	3.65	96.90
9	131.66	6.64	94.95
10	138.59	8.14	94.13
11	145.52	9.00	93.82

En la tabla 20 se observa que la eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S es máxima a comparación de los otros medios adsorbentes siendo que llega a una eficiencia en un rango promedio de 92 %-97 %, cabe señalar que el carbón activo empleado fue obtenido a una TP máxima y concentración molar del KOH mínima para el caso de esta investigación.

Grima-Olmedo et al. (2016) Afirman que a una temperatura de activación mayores a 700 °C la formación de los poros del carbón activo será mayor, lo que implica una mayor adherencia del H<sub>2</sub>S en el carbón activo obtenido, resultado obtenido en la investigación, la particularidad de añadir el metal alcalino KOH fue para dotar una superficie catalítica al medio adsorbente, para lograr la oxidación del H<sub>2</sub>S por ende su remoción a mayor eficiencia.

#### 4) Carbón Activo obtenido a una Temperatura de Pirolicación de 700 y A.A de 4 M KOH.

Tabla 21

*Carbón Activo obtenido a una TP 700 °C y A.A de 4 M KOH*

Carbón Activo elaborado	Temperatura Pirolicación (°C)	Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente H <sub>2</sub> S	Efluente H <sub>2</sub> S	% Eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S
			1	166.31	14.11	91.51
			2	166.31	24.98	84.98
			3	145.52	17.78	87.78
			5	128.19	24.92	80.56
4	700	4 M	6	117.80	21.59	81.67
			7	103.94	11.54	88.90
			8	114.34	5.63	95.08
			9	124.73	5.15	95.87
			10	131.66	6.64	94.95
			11	128.19	22.20	82.68

El carbón activo preparado a las condiciones mostradas en la tabla 21, posee una eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S en un promedio de 87.82 %.

De los dos carbones activos empleados para la adsorción del H<sub>2</sub>S a una TP de 700 °C el que posee mayor eficiencia es el de concentración molar menor en este caso 1M de KOH, ello puede explicarse con Mui et al.; (2004) demostraron que el empleo de una alta concentración molar del reactivo activante para producción de carbones no es tan favorable ya que en la reacción química del contacto con el material precursor y el reactivo se interfiere en la formación de poros la que está directamente relacionada con la eliminación del H<sub>2</sub>S.

#### **3.3.4. Análisis estadístico descriptivo de las pruebas preliminares**

Por consiguiente, los resultados obtenidos se analizaron mediante diseño estadístico anova factorial, afirmando que efectivamente los parámetros seleccionados, temperatura y la concentración molar del agente activante (KOH) eran los correctos para la adsorción efectiva del gas tóxico H<sub>2</sub>S, siendo que se obtuvo hasta una eficiencia de 94 %.

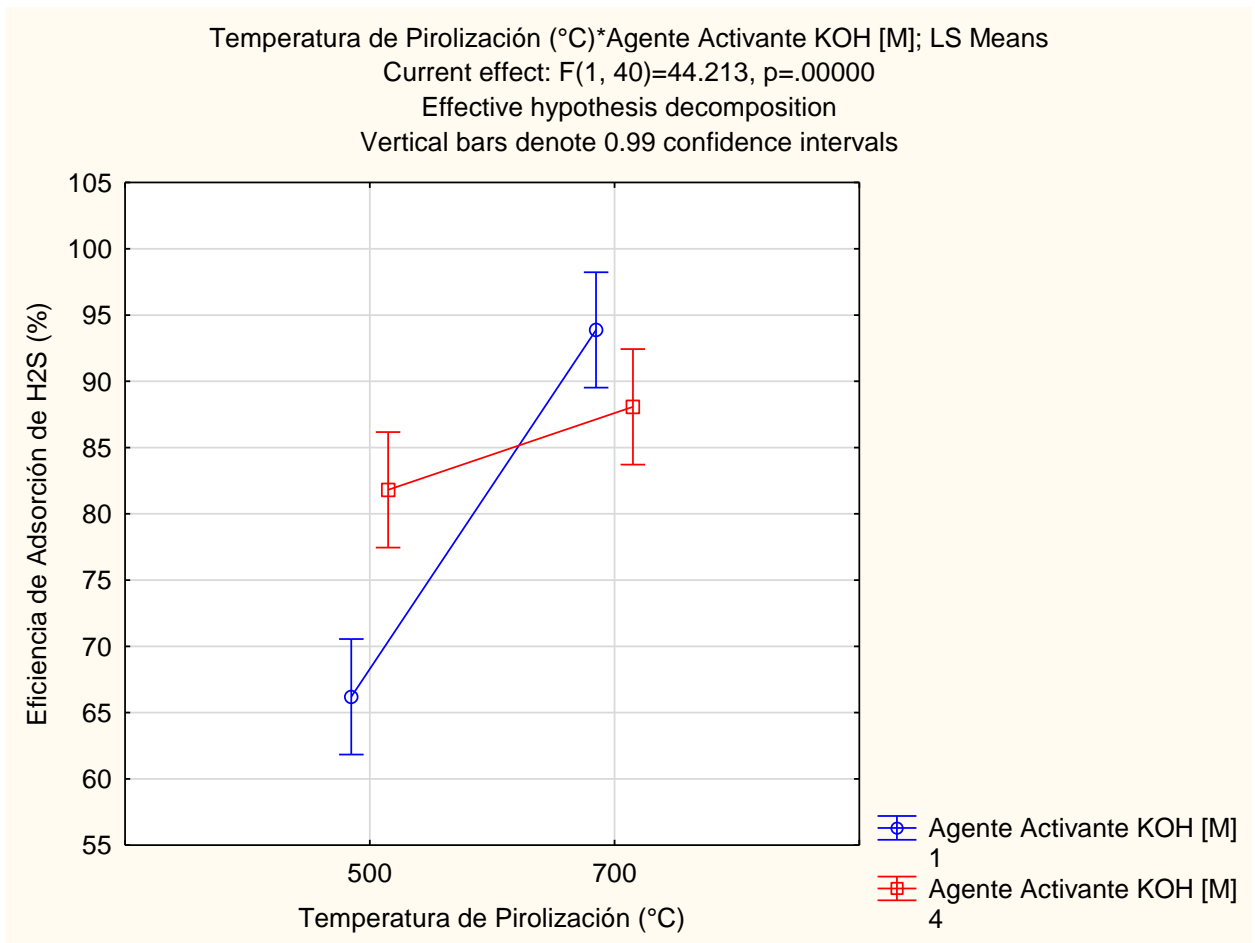


Figura 12. Influencia de la temperatura de pirolicación en la adsorción del H<sub>2</sub>S

La figura 12, muestra, que a 700 °C de temperatura de pirolicación y agente activante de 1 M KOH se obtiene una eficiencia de hasta 90 % de la adsorción del H<sub>2</sub>S a comparación del segundo 500 °C y 4 M de KOH la eficiencia se encuentra en el rango de 75 % - 85 %.

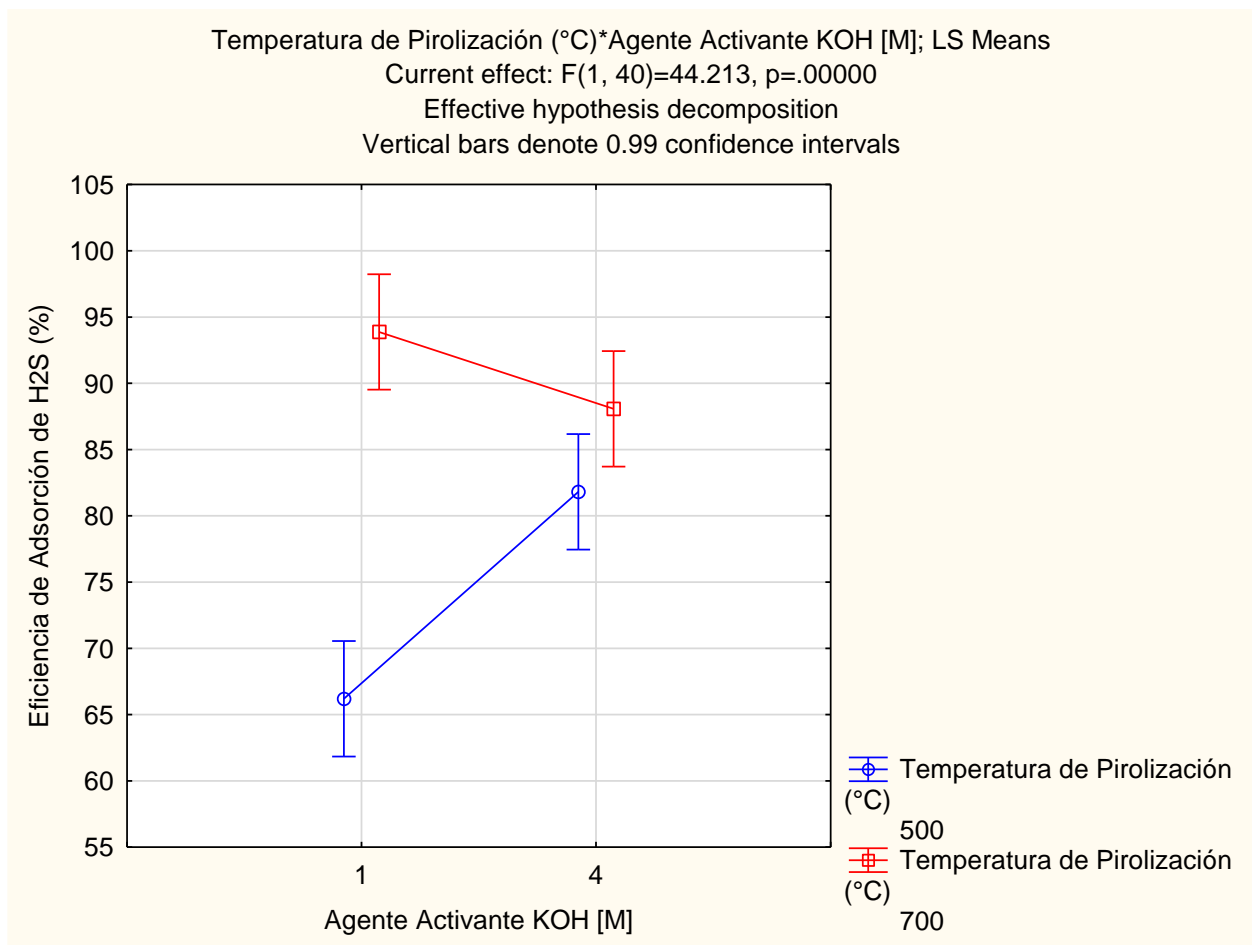


Figura 13. Influencia de la [M] del KOH en la adsorción del H<sub>2</sub>S

Asimismo la figura 13, corrobora la significancia de la concentración molar del KOH en la producción de los medios adsorbentes para la adsorción del H<sub>2</sub>S, se llega a obtener una eficiencia hasta el 90 %. Además (Gao et al., 2013) afirma el resultado obtenido que las características de los carbones activos obtenidos a partir de un material orgánico, están influenciadas por el grado de activación, la naturaleza del agente activante (KOH) y el proceso de temperatura.

**b) Ensayos de las eficiencias de adsorción del H<sub>2</sub>S**

Al seleccionar los niveles de las variables tanto para temperatura de pirolicación y agente activante, se procedió con el diseño de experimentos, con el fin de comparar variables

con diferentes unidades y diferentes órdenes de magnitud, previamente se codificaron en valores adimensionales tabla 14 de la metodología.

La tabla 22 muestra los valores reales y codificados, de la variable de temperatura de pirolización, concentración molar del agente activante (KOH), así como los resultados de los ensayos experimentales obtenidos para la variable de respuesta porcentaje de la eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S mediante los carbones activos elaborados, se realizaron 10 réplicas para cada número de tratamiento mostrado en anexo III.

Las capacidades de adsorción del H<sub>2</sub>S en cada torre de lecho fijo contenida con los diferentes tipos de carbones activos obtenidos, (6 para ser específicos) se evaluó durante un tiempo de retención de 20 min y un caudal de ingreso cuantificada mediante un rotámetro de 4 l/min para los 6 medios de adsorción obtenidos.

Tabla 22

*Niveles de las variables independientes y valores experimentales de la variable respuesta para el diseño factorial con dos puntos centrales*

N° Tratamientos	VARIABLES INDEPENDIENTES		VARIABLE DEPENDIENTE Porcentaje de la adsorción del H <sub>2</sub> S										
	TP °C	[M] de KOH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	500	1	68.75	68.57	68.57	63.16	68.57	67.74	65.83	60.27	61.43	63.09	62.47
2	700	1	92.85	94.78	94.78	92.28	95.40	92.28	92.28	96.90	94.95	94.13	93.38
3	500	4	84.85	87.50	87.50	87.50	91.43	79.98	72.64	88.18	85.84	79.84	72.01
4	700	4	91.51	84.98	84.98	80.56	81.67	88.90	95.08	95.87	94.95	82.68	84.80
5	600	2.5	93.79	88.67	88.67	93.15	94.13	93.15	96.90	97.52	95.40	99.08	96.90
6	600	2.5	90.58	93.16	93.16	94.29	94.80	94.93	93.45	94.43	91.96	94.63	94.60

TP: Temperatura de activación, [M] KOH: Concentración molar del agente activante Hidróxido de Potasio.

Para optimizar el proceso de la producción de adsorbentes empleando el material precursor del lodo residual de una PTAR, se aplicó un diseño factorial con dos puntos centrales teniendo los resultados mostrados en la tabla 22.

**Carbón Activo obtenido a una Temperatura de Pirolización de 600 y Agente Activante de 2.5 M KOH**

Tabla 23

*Carbón Activo obtenido a una TP 600 °C y A.A de 2.5 M KOH*

Carbón Activo elaborado	Temperatura Pirolización (°C)	Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente H <sub>2</sub> S	Efluente H <sub>2</sub> S	% Eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S
5	600	2.5 M	1	159.38	9.90	93.79
			2	159.38	18.05	88.67
			3	145.52	20.50	85.91
			4	110.87	7.60	93.15
			5	103.94	6.10	94.13
			6	110.87	8.00	92.78
			7	117.80	4.02	96.59
			8	128.19	3.18	97.52
			9	128.19	6.20	95.16
			10	131.66	2.50	98.10
			11	117.80	3.65	96.90

La adsorción del H<sub>2</sub>S luego de pasar por un carbón activo a las condiciones indicadas en la tabla 23, llega a tener una remoción significativa del 93 %, la concentración del H<sub>2</sub>S promedio del efluente es de 9.3 ppm, valor que según National Institute for Occupational Safety and Health (2005) se encuentra dentro del nivel establecido 10 ppm, sin embargo no suficiente para la adsorción óptima del H<sub>2</sub>S ya que a mayor eliminación del H<sub>2</sub>S contribuye a la disminución de los efectos que ocasiona este agente por ser altamente tóxico.

**Carbón Activo obtenido a una Temperatura de Pirolización de 600 y Agente Activante de 2.5 M KOH**

Tabla 24

*Carbón Activo obtenido a una TP 600 °C y A.A de 2.5 [M] KOH*

Carbón Activo elaborado	Temperatura Pirolización (°C)	Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente H <sub>2</sub> S	Efluente H <sub>2</sub> S	% Eficiencia de adsorción del H <sub>2</sub> S
6	600	2.5 M	1	138.59	13.05	90.58
			2	161.69	12.00	92.58
			3	173.24	10.78	93.78



4	179.01	10.21	94.29
5	196.34	10.21	94.80
6	179.01	10.00	94.41
7	138.59	9.08	93.45
8	173.24	10.50	93.94
9	127.04	10.21	91.96
10	184.79	9.93	94.63
11	173.24	9.36	94.60

Las Tablas 23, 24 muestran los resultados de los ensayos de la adsorción del H<sub>2</sub>S de los dos puntos centrales del diseño factorial aplicado, los resultados obtenidos permiten afirmar la fiabilidad en cuanto a la eficiencia de estos medios adsorbentes preparados a las mismas condiciones, los resultados no difieren se mantienen en el rango de una eficiencia del 93 %, en los carbones preparados a las mismas condiciones de TP de 600 °C y A.A 2.5 M KOH.

Ros et al. (2006) evaluando el promedio diámetro de los poros, encontró que el valor más bajo obtenido fue a una temperatura de activación de 600 °C, lo que indica que el desarrollo de microporosidad. En este caso la eficiencia no fue baja siendo que se aplicó KOH de concentraciones molares considerables, incrementando la capacidad de adsorción. Además demostraron que la activación realizada a 600 °C es superior a 400 °C, la influencia del tiempo no es significativa, permaneciendo prácticamente constante, lo que se corrobora con los resultados obtenidos.

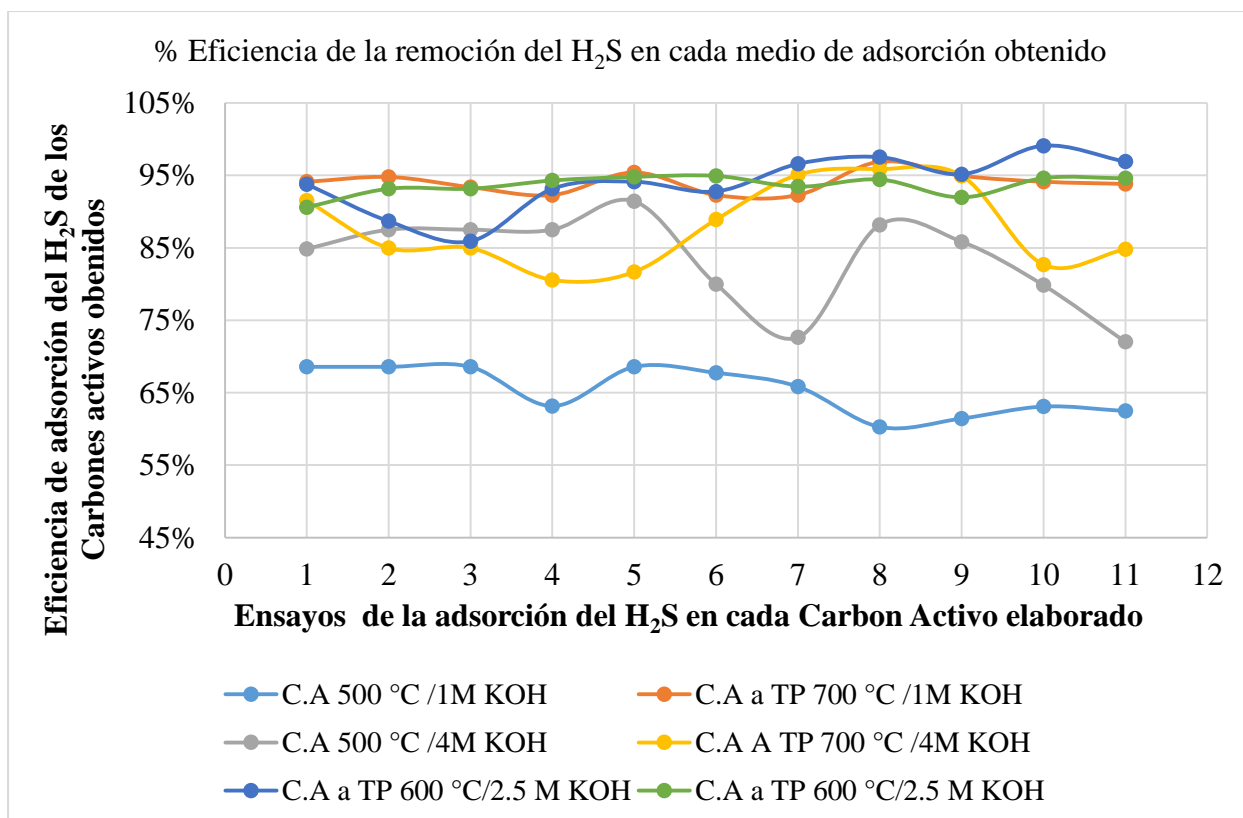


Figura 14. Variación del Porcentaje de adsorción del H<sub>2</sub>S mediante los carbones activos preparados a diferentes TP y concentración molar de los 11 ensayos realizados.

La figura 14 muestra la variación en las eficiencias de adsorción del H<sub>2</sub>S de los 6 tipos de carbones activos obtenidos a temperaturas de pirolización diferentes y concentración molar del agente activante, muestra los resultados de la eficiencia de los 11 ensayos realizados para cada medio adsorbente en la adsorción del sulfuro de hidrógeno, de ello se afirma que se tuvo una eficiencia menor del H<sub>2</sub>S mediante el carbón activo obtenido a una TP de 500 °C y 1 M de KOH; el carbón activo a TP 600 ° y 2.5 M KOH posee una eficiencia casi similar que el carbón activo a TP 700 ° y 1 M KOH, sin embargo, los resultados muestran algunos ensayos en los cuales los resultados son menores al 90 % a comparación del carbón activo de TP 700 ° y 1 M KOH se mantiene constante, por tanto el de mayor eficiencia es este último.

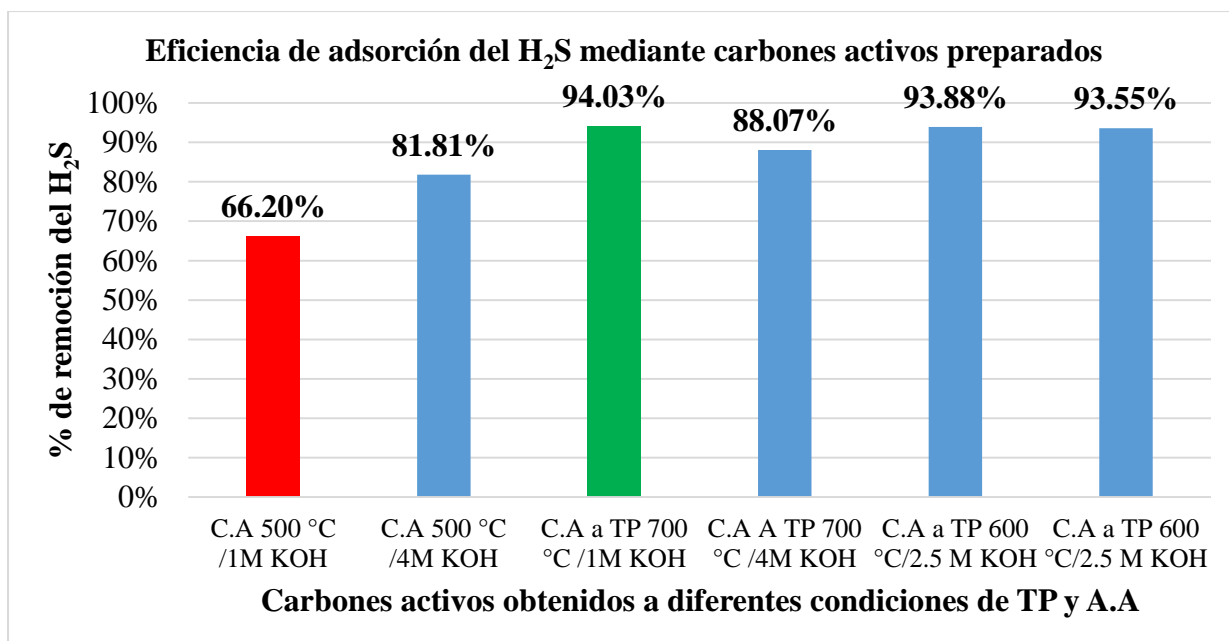


Figura 15. Representación Gráfica de la eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S promedio de cada Carbón Activo preparado.

El carbón es un material sólido cuya propiedad principal es la de ser un excelente adsorbente, versátil y de manejo sencillo, estas propiedades le otorgan la capacidad de absorber multitud de moléculas diferentes sobre su superficie, retirándolas del medio con el que se encuentre en contacto, característica demostrada por los resultados mostrados en la figura 15.

### 3.3.5. Análisis del diseño estadístico DOE Factorial 2<sup>2</sup>

Para evaluar el ajuste del modelo obtenido se ha realizado, un análisis de varianza, a partir del cual se determinó si el modelo aplicado fue significativo (Sig<0.05) (ver anexo IV, tabla 48) se puede observar que el modelo resulta estadísticamente significativo, con un nivel de confianza del 99 %. El R<sup>2</sup> tiene un ajuste del 87 % lo que implica que el modelo se ajusta relativamente a los datos, cabe mencionar que es probable que ello se deba a la mayor cantidad de ensayos realizados según Pagura, Hernandez y Dianda (2015) para un diseño factorial es necesaria 4 réplicas máximo, sin embargo la finalidad de esta investigación no solo fue probar en el diseño estadístico sino determinar la eficiencia de la purificación del gas tóxico, a mayor

cantidad de ensayos los resultados dotan de consistencia a las afirmaciones realizadas en esta investigación, siendo que además el comportamiento del H<sub>2</sub>S es complejo.

Siendo que se logra una representatividad del 87 %, se realizó la simulación y predicción por superficie de respuesta mediante el diseño experimental factorial 3<sup>2</sup> para una remoción del H<sub>2</sub>S aún más óptima, lográndose un IC del 90 % a un nivel de confianza del 99 % como muestra la (tabla 41 ver anexo IV). Asimismo, se generó el diagrama de Pareto para analizar los efectos principales de interacción que influyen para la adsorción del H<sub>2</sub>S eficaz u óptima.

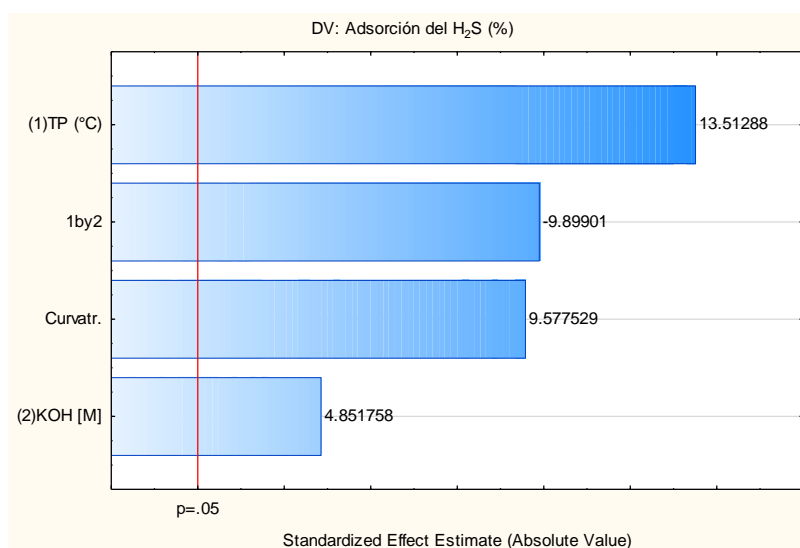


Figura 16. Significancia de los parámetros en la capacidad de adsorción del H<sub>2</sub>S de los carbones activos obtenidos.

De la figura 16 se observa que los dos parámetros son estadísticamente significativos ( $\alpha=0.05$ ), lo que implica que los parámetros escogidos son determinantes para la capacidad de adsorción del H<sub>2</sub>S de los carbones activos preparados; sin embargo, el parámetro de mayor influencia es la temperatura de pirólisis, seguido de la interacción de los dos parámetros es decir de la concentración molar del reactivo activante en este caso del KOH, asimismo se

afirma que la influencia solo del agente activante es mínima, sin embargo, todos son importantes ya que los cuatro resultados se muestran significativas.

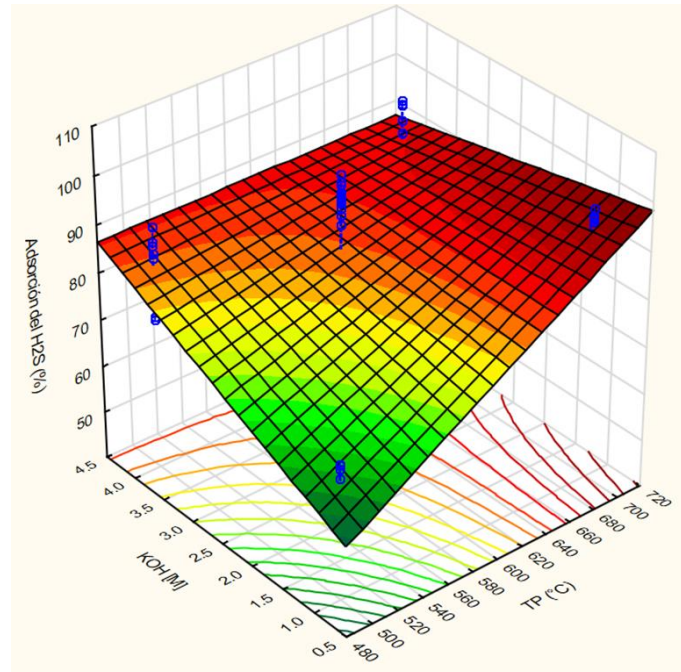
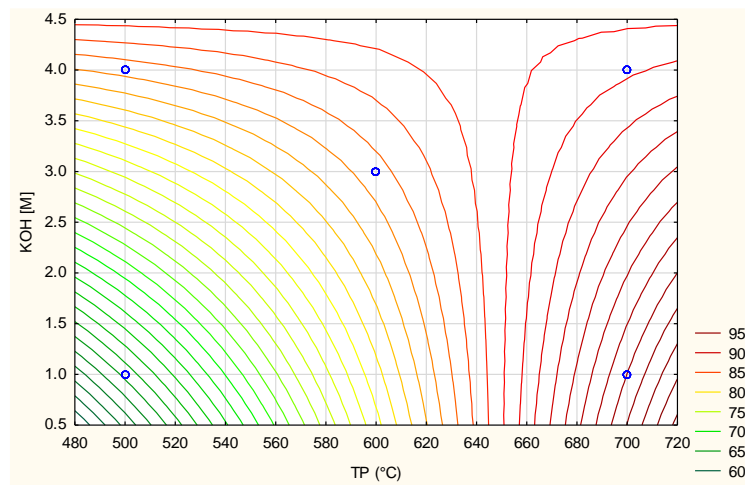


Figura 17. Diagrama de Superficie de respuesta del Carbón Activo óptimo en la adsorción del H<sub>2</sub>S

La figura 17 se observa el gráfico de superficie de respuesta, el carbón obtenido a mayor temperatura de pirolización y una concentración molar menor tuvo una eficiencia mayor en la remoción del gas tóxico H<sub>2</sub>S, muestra que a TP 700°C y Agente activante de 1M KOH corroborando en las investigaciones realizadas por Carvalho y Castro (2013) quienes afirman que con el incremento de la temperatura de pirólisis, la capacidad de adsorción de los carbones activos regenerados a partir de lodos incrementa significativamente y por ende la eficiencia en la remoción del gas tóxico H<sub>2</sub>S.

La y Gandarillas (2016) corroboran que para la adsorción del H<sub>2</sub>S mediante carbón activo, este debe impregnarse con un compuesto químico, el método habitual es con hidróxido de sodio en este caso se realizó con KOH, ello permite la unión de las fuerzas de adsorción la

afinidad química de este modo el carbón activado aporta el área superficial y la retención se realiza por adsorción química. Asimismo se generó el diagrama de contorno (figura 18)



*Figura 18.* Variables significativas que influyen en la capacidad de adsorción del H<sub>2</sub>S de los medios adsorbentes elaborados en gráfica de contorno

A altas temperaturas la capacidad de adsorción de los materiales derivados de lodos aumenta, debido a que en el proceso se forma una fase mineral que consiste en metales catalíticamente activos tales como el hierro, zinc y cobre, además se genera poros. Para materiales en los que el efecto catalítico es predominante, el sulfuro de hidrógeno se adsorbe hasta que todos los poros estén llenos de azufre también hay indicios de que la quimisorción juega un papel importante en la eliminación de H<sub>2</sub>S.

Para la eliminación completa del H<sub>2</sub>S por ser de bajo volumen molecular, implica alterar profundamente la funcionalidad del carbón, siendo necesaria las propiedades catalíticas de esta (incrementando la impregnación sobre su superficie), de esa forma el carbón activo actuará como soporte poroso para que se produzcan reacciones del gas tóxico con los agentes químicos, inmovilizándolos o dando productos inocuos que se desorben (Reinoso y Sabio, 2004).

### 3.3.6. Análisis estadístico DOE Factorial 3<sup>2</sup> simulación y predicción de H<sub>2</sub>S por superficie de respuesta

Tabla 25  
DOE Superficie de respuesta Factorial 3<sup>2</sup>+pc

Trat.	Variables Independientes				Variables dependientes			
	Codificados		No codificados		KOH [M]			Y DS
			Temperatura (°C)	KOH [M]	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	
1	-1.0	-1.0	500.0	1.0	63.51	66.32	61.81	63.88 ± 2.28
2	-1.0	0.0	500.0	2.5	72.81	74.61	71.64	73.02 ± 1.49
3	-1.0	+1.0	500.0	4.0	82.11	82.89	81.47	82.16 ± 0.71
4	0.0	-1.0	600.0	1.0	78.32	79.69	78.33	78.78 ± 0.79
5	0.0	0.0	600.0	2.5	89.64	94.33	97.23	93.73 ± 3.82
6	0.0	+1.0	600.0	4.0	84.67	84.72	85.52	84.97 ± 0.48
7	+1.0	-1.0	700.0	1.0	93.13	93.06	94.84	93.68 ± 1.01
8	+1.0	0.0	700.0	2.5	90.18	89.81	92.21	90.73 ± 1.29
9	+1.0	+1.0	700.0	4.0	87.23	86.55	89.58	87.79 ± 1.59
10	0.0	0.0	600.0	2.5	92.71	94.37	93.90	93.66 ± 0.85

En la tabla 41 (ver anexo IV) se reafirma que todas las variables tienen un efecto significativo en la variable respuesta por los valores ( $p < 0.05$ ), el parámetro con mayor efecto significativo es la temperatura en modelo lineal y cuadrático.

Para evaluar el ajuste del modelo obtenido se realizó, un análisis de varianza, a partir del cual se determinó que el modelo aplicado fue significativo ( $p < 0.05$ ). La figura 19 (a,b) muestra que el modelo resulta estadísticamente significativo, para todos los parámetros salvo la interacción de TP lineal y KOH cuadrático, y TP lineal y KOH cuadrático. El parámetros que tiene mayor efecto significativo en la (TP) lineal seguido de TP lineal y KOH lineal, y TP cuadrático y KOH cuadrático.

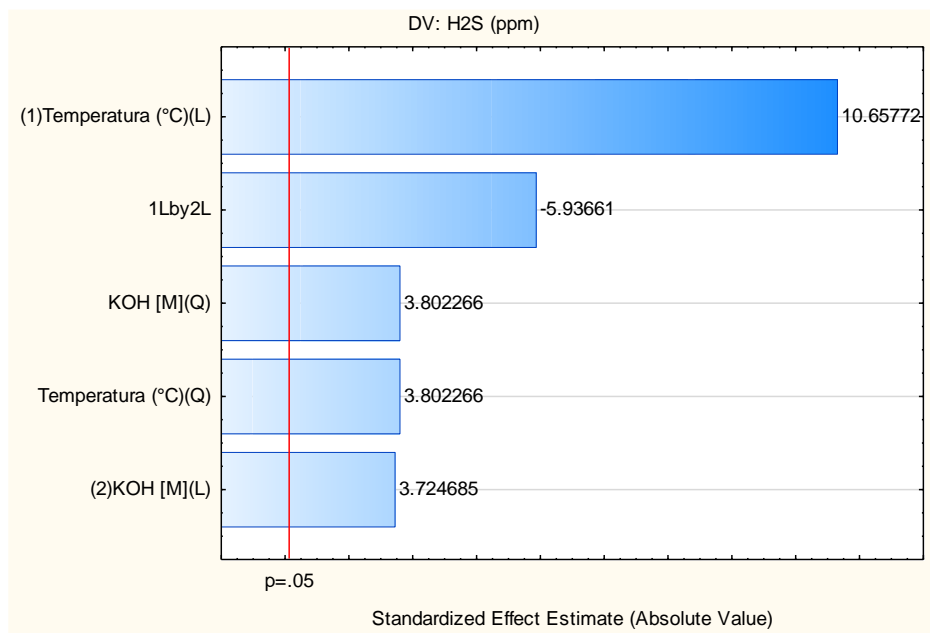
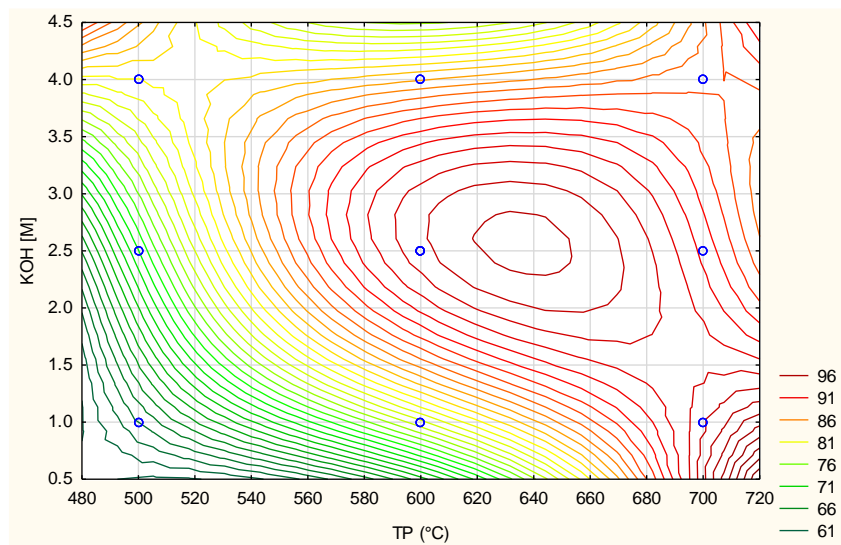
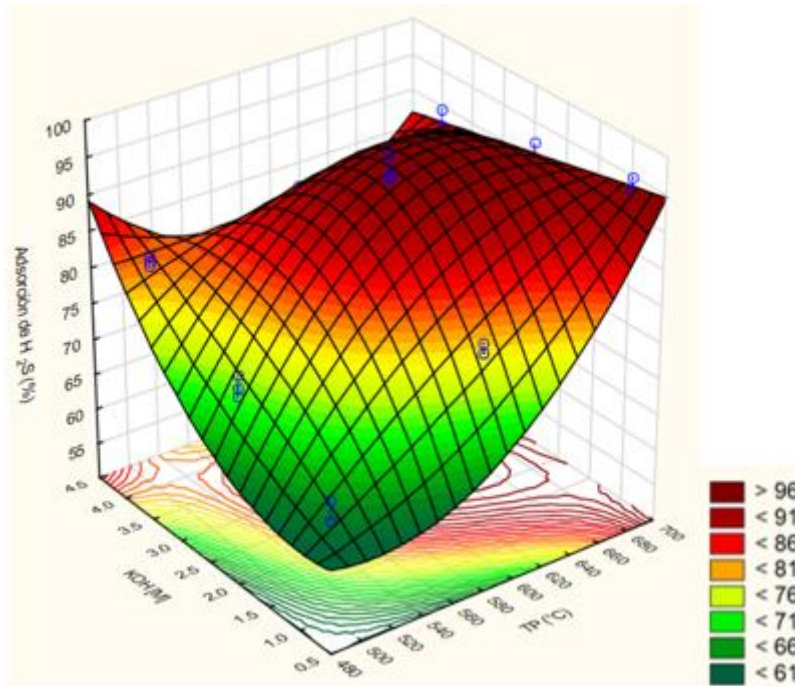


Figura 19. Diagrama de Pareto/ Significancia de parámetros para la adsorción del H<sub>2</sub>S



(a)





(b)

Figura 20. Simulación y predicción de H<sub>2</sub>S por superficie de respuesta

La figura 20 (a, b) se muestra gráficamente la simulación para la optimización de los parámetros de temperatura y KOH [M] que inciden en la variable respuesta (adsorción del H<sub>2</sub>S), se puede observar que a un intervalo de 2.25 a 2.75 [M] de KOH y a un intervalo de 618 a 655 °C de TP la adsorción del H<sub>2</sub>S es mayor a 96%, quiere decir que el punto de optimización es a una temperatura de 635 °C de TP y a una concentración de 2.6 M de KOH la remoción del H<sub>2</sub>S es 99.00% aproximadamente.

El modelo de segundo orden polinomial corrobora que el parámetro de T (TP) tuvo mayor significancia en la adsorción de H<sub>2</sub>S, seguido de [M] de KOH y sus interacciones de lineales y cuadráticas conforme es mostrado los coeficientes de cada variable de la ecuación polinomial mostrado a continuación.

Los datos generados a un modelo polinomial de segundo orden es presentando en el siguiente modelo matemático:

$$H_2S \text{ (ppm)} = 698.71 - 2.33T + 0.002T^2 - 893.20C + 183.89C^2 + 3.11TC - 0.63TC^2 - 0.0026T^2C + 0.0005T^2C^2$$

Donde

**T:** temperatura de pirolisis (TP) (°C)

**C:** Concentración de molaridad [M] de hidróxido de potasio KOH

La simulación de predicción demuestra que las variables significativas para la adsorción del H<sub>2</sub>S fueron la temperatura (TP) en mayor proporción seguida también de la concentración molar del agente activante, además presenta una correlación significativa con una representación mayores al 90.00 %, lográndose una eficiencia de remoción al 99 % del H<sub>2</sub>S.

### 3.4. Conclusiones

La eficiencia de adsorción del sulfuro de hidrógeno mediante carbón activo obtenido de la regeneración de lodos provenientes de un *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) fue óptimo en un 94 %.

La producción de adsorbentes a partir de lodos residuales generados en un reactor UASB es viable. El carbón activo producido a una TP mayor y concentración molar menor del KOH fue el más eficiente del diseño de experimental factorial 2<sup>2</sup> de TP 700 °C y agente activante de 1 M de KOH.

Para la simulación de predicción por superficie de respuesta, los parámetros optimizados para la adsorción del H<sub>2</sub>S a un (99 %) fue a una TP de 635 °C y agente activante de 2.6 M de KOH.

## Referencias Bibliográficas

- Abigail, S., Sánchez, C., Abigail, S., & Sánchez, C. (2016). Estudio Dos Efeitos De Compostos Doadores De Sulfeto De Hidrogênio (  $H_2S$  ) Sobre O Prurido Agudo Induzido Pela Ativação Dos Receptores Ativados Por Proteases Do Tipo 2 ( Par-2 ) Em Camundongos Estudo Dos Efeitos De Compostos Doadores De Sulfeto De Hidrog, 2.
- Ahmaruzzaman, M. (2011). Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Advances in Colloid and Interface Science*, 166(1–2), 36–59. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.04.005>
- Ambient Air Quality Guidelines. (2002).
- Aroca, G., Urrutia, H., Núñez, D., Oyarzún, P., Arancibia, A., & Guerrero, K. (2007). Comparison on the removal of hydrogen sulfide in biotrickling filters inoculated with *Thiobacillus thioautotrophicus* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Electronic Journal of Biotechnology*, 10(4), 514–520. <https://doi.org/10.2225/vol10-issue4-fulltext-6>
- Arriagada Monreal, A. (2008). Tecnologías Para El Tratamiento De Olores En Aguas Servidas.
- Bagreev, A., Bashkova, S., Locke, D. G., & Bandosz, T. J. (2001). Sewage sludge-derived materials as efficient adsorbents for removal of hydrogen sulfide. *Environmental Science and Technology*, 35(7), 1537–1543. <https://doi.org/10.1021/es001678h>
- Carvalho, M., & Castro, M. (2013). Preparación de Carbones Activados con KOH a Partir de Residuo de Petróleo. Adsorción de Hidrógeno, 217.
- Castillo, B., Solís, L., Novelo, M., García, S., Solís, E., & Canul, P. (2011). Tratamiento de efluentes de fosas sépticas por el proceso de lodos activados. *Ingeniería*, 15(3), 157–165.
- Cazorla-Amorós, D., Ribes-Pérez, D., Román-Martínez, M. C., & Linares-Solano, A. (1996). Selective porosity development by calcium-catalyzed carbon gasification. *Carbon*, 34(7), 869–878. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(96\)00026-7](https://doi.org/10.1016/0008-6223(96)00026-7)
- Chowdhury, Z. K., Summers, R. S., Westerhoff, G. P., Leto, B. J., Nowack, K. O., & Corwin, C. J. (2012). *Activated Carbon: solutions for improving water quality*. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0103200902011105.a01.pub2>
- Cotoruelo, L. M., Marqués, M. D., Díaz, F. J., Rodríguez-mirasol, J., & Rodríguez, J. J. (2012). Adsorbent ability of lignin-based activated carbons for the removal of p -nitrophenol from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 184, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.026>
- Consejería de Sanidad. (2007). Riesgo Químico- Accidentes grave- Sulfato de hidrogeno. *Dirección general de salud pública-Servicio de sanidad Ambiental*, 19. Obtenido de [https://www.murciasalud.es/recursos/ficheros/114700-sulfuro\\_de\\_hidrogeno.pdf](https://www.murciasalud.es/recursos/ficheros/114700-sulfuro_de_hidrogeno.pdf)
- Cruz, A. D. da. (2013). Trabalho de conclusão de curso, 39–75. <https://doi.org/9788580190298>

- Da Silva, C. M., da Silva, L. L., Corrêa, S. M., & Arbilla, G. (2018). A minimum set of ozone precursor volatile organic compounds in an urban environment. *Atmospheric Pollution Research*, 9(2), 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.11.002>
- Cerron V. Determinación de la eficiencia de un biofiltro para remover el sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) contenido en el biogás, generado por un reactor anaerobio tipo UASB – Lima (Tesis de pregrado). Lima: Universidad Peruana Unión, 2016
- Dai, X., Chen, Y., Zhang, D., & Yi, J. (2016). High-solid Anaerobic Co-digestion of Sewage Sludge and Cattle Manure: The Effects of Volatile Solid Ratio and pH. *Scientific Reports*, 6(1), 35194. <https://doi.org/10.1038/srep35194>
- De Sousa, J. T., Santos, K. D., Henrique, I. N., Brasil, D. P., & Santos, E. C. (2008). Anaerobic digestion and the denitrification in UASB reactor. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 2(2), 63–67. <https://doi.org/10.4090/juee.2008.v2n2.063067>
- Dias, J. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., Almeida, M. F., Rivera-Utrilla, J., & Sánchez-Polo, M. (2007). Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 85(4), 833–846. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.031>
- Elrod, J., Calvert, J., Morrison, J., Tao, L., Kiss, L., Iefer, D., & Chow, C. (2007). Hydrogen sulfide attenuates myocardial ischemia-reperfusion injury by preservation of mitochondrial function. *Proc. Natl Acad Sci USA*, 25; 104.
- Environment, M. f. (2002). Prepared by the Ministry for the Environment and The Ministry of Health. *Wellington*, 66.
- ENVIRONMENTS, M. F. (2002). *Ambient Air Quality Guidelines*. New Zealand: Environment.
- Flavia, A., Godoi, L., Marlon, A., Polezer, G., Brown, A., Potgieter-vermaak, S., ... Godoi, M. (2018). Science of the Total Environment Human exposure to hydrogen sulphide concentrations near wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*, 610–611, 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.209>
- Gao, Y., Yue, Q., Gao, B., Sun, Y., Wang, W., Li, Q., & Wang, Y. (2013). Preparation of high surface area-activated carbon from lignin of papermaking black liquor by KOH activation for Ni ( II ) adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 217, 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.09.038>
- Garcia, C. G. (2014). Montagem e operação de unidade de adsorção em leito fixo para remoção de H<sub>2</sub>S de corrente gasosa, 121.
- Girona, U. De. (2006). Los lodos deshidratados y Chars basados en lodos para H<sub>2</sub>S Extracción a baja temperatura : Influencia de aguas residuales características del lodo, 40(1), 302–309.
- González Aguilera, P. (2016). Estudio de la adsorción de sulfuro de hidrógeno usando lodos secos de depuradora con aplicación al biogás de vertedero. Evaluación experimental, modelado y simulación. Retrieved from <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/52425>

- Grima-Olmedo, C., Ramírez-Gómez, Gómez-Limón, D., & Clemente-Jul, C. (2016). Activated carbon from flash pyrolysis of eucalyptus residue. *Heliyon*, 2(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00155>
- Grisales, A. L., & Rojas Arrieta, M.-W. (2016). Obtencion de carbon activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales. *Universidad Tecnologica de Pereira*.
- Harreveld, A. P. T. Van, Heeres, P., & Heeres, P. (2015). Una revisión de 20 años de Normalización de medición de la concentración de olor por olfatometría dinámica en Europa Una revisión de 20 años de Normalización de medición de la concentración de olor por olfatometría dinámica en Europa, 2247.
- Health, N. I. (2005). Safer Healthier People. *DHHS (NIOSH) Publication* , 149.
- Heaney, C., Wing, S., Campbell, R., Caldwell, D., Hopkins, B., & Yeatts, K. (21 de mayo de 2011). Relation between malodor, ambient hydrogen sulfide, and health in a community bordering a landfill. *Environmental research*, 52.
- Ingenier, C. S. D. E., Caminos, D. E., Ingenier, D. E., Grado, D. E. M., Ingenier, E. N., Dri, M., ... Cartagena, B. (2017). Escuela técnica superior de ingeniería de caminos, canales y puertos y de ingeniería de minas grado en ingeniería civil.
- Ingenier, S. E. N., Polit, D. E. L. A. E. U., & Sevilla, C. U. (n.d.). Manual del carbón activo, 1–89.
- Iniguez-Fern', R. N. D., Andez1, I. A.-V., Azquez2, J. J. C.-P., Erez1\*, J. S. W.-C., J. S. Alvarado-Gonz' alez1, G. C., On-Dom', ... Opez1La, E. I. E. N. (2011). Revista Mexicana de Ingeniería Química. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(1), 17–28.
- José, L., León, G., & Mónica, M. (2016). Comparison with commercial carbons.
- La, J., & Gandarillas, I. (2016). Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización Índice Máster en Ingeniería y Gestión del Agua.
- Lebrero, R., Rangel, M. G. L., & Muñoz, R. (2013). Characterization and biofiltration of a real odorous emission from wastewater treatment plant sludge. *Journal of Environmental Management*, 116, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.038>
- Lim, J. G. (2013). Tratamiento de aguas residuales , ¿ problema o recurso ? , 11–13.
- Lu, M., Niu, X., Liu, W., Zhang, J., Wang, J., Yang, J., ... Yang, Z. (2016). Biogas generation in anaerobic wastewater treatment under tetracycline antibiotic pressure. *Nature Publishing Group*. <https://doi.org/10.1038/srep28336>
- Luna, D., González, a, Gordón, M., & Martín, N. (2007). Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. *ContactoS*, 64, 39–48. <https://doi.org/000700407>
- Mainier, F. B., Delaidi, E., & Viola, M. (2005). o Sulfeto de hidrogênio (h 2 s) e o meio ambiente.

- Maizel, A. C., & Remucal, C. K. (2017). The effect of advanced secondary municipal wastewater treatment on the molecular composition of dissolved organic matter. *Water Research*, 122, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.055>
- Marlé, I., & Reyes Pantoja, D. (2009). Tratamiento de aguas residuales provenientes de rastro mediante un sistema de biodegradación anaerobia-aerobia maestra en ingeniería.
- McDougall, G. J. (1991). Physical nature and manufacture of activated carbon. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 91(4), 109–120. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0026139382&partnerID=tZOtx3y1>
- Menéndez-Díaz, J. A., & Martín-Gullón, I. (2006). *Chapter 1 Types of carbon adsorbents and their production. Interface Science and Technology* (Vol. 7). [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(06\)80010-4](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(06)80010-4)
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2009). *Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España*. España.
- Mui, E. L. K., Ko, D. C. K., & McKay, G. (2004). Production of active carbons from waste tyres - A review. *Carbon*, 42(14), 2789–2805. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.06.023>
- Maldonado, M. d. (2010). Evaluación de procesos para endulzamiento del gas de producción. *Universidad Nacional de Ingeniería*.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. Mexico: Limusa Wiley.
- MSDR. (1996). Material Safety Data Sheet for Hydrogen Sulfide. *Murray Hill, NJ: Boc gases*. Obtenido de <http://www.vngas.com/pdf/g94.pdf>
- Noramelya, N. (2016). Overview of H<sub>2</sub>S Removal Technologies from Biogas Production, 11(20), 10060–10066.
- Omri, I., Bouallagui, H., Aouidi, F., Godon, J., & Hamdi, M. (2011). Bioresource Technology H<sub>2</sub>S gas biological removal efficiency and bacterial community diversity in biofilter treating wastewater odor. *Bioresource Technology*, 102(22), 10202–10209. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.094>
- Ortiz, F. J. G., Aguilera, P. G., & Ollero, P. (2014). Separación y Purificación Tecnología, 123, 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.12.025>
- Paredes, F. (2007). Evaluación técnico económica de una planta de carbon activado. *Ingeniería Industrial*, 3(67), 1–140.
- Papura, J. A., Hernandez, L. N., & Dianda, D. F. (2015). Diseño de Experimentos, Diseño factoriales 2k. 27.
- Pokorna-Krayzelova, L., Mampaey, K. E., Vanneck, T. P. W., Bartacek, J., Jenicek, P., & Volcke, E. I. P. (2017). Model-based optimization of microaeration for biogas desulfurization in UASB reactors. *Biochemical Engineering Journal*, 125, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2017.06.009>

- Rico, C., Montes, J. A., & Rico, J. L. (2017). Evaluation of different types of anaerobic seed sludge for the high rate anaerobic digestion of pig slurry in UASB reactors. *Bioresource Technology*, 238, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.014>
- Richard, K. (1995). Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials, 5 Volume Set, 12th Edition. *Jurnal of alieth adia, escobas y duana*, 1-6.
- Ros, A., Lillo-ro, M. A., Fuente, E., Montes-morán, M. A., & Linares-solano, A. (2006). precursores a base de lodos, 65, 132–140.
- Rodrigues, M. Y. (2014). *experimental Design and Process Optimization*. CRC Press.
- Rubright, S. L. M., Pearce, L. L., & Peterson, J. (2017). Óxido nítrico Toxicología ambiental de sul hidrógeno fi Delaware, 71, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2017.09.011>
- Ronzano, E., & Dapena, J. L. (2015). *Tratamiento Bioogico de las aguas residuales*. DiazdeSantos.
- S. Edwards, R. A. & A. E. G. (2011). Removal of Hydrogen Sulphide from Water S . Edwards , R . Alharthi and A . E . Ghaly Department of Process Engineering and Applied Sciences , Dalhousie University Halifax , Nova Scotia , Canada, 7(4), 295–305.
- Sun, M., Sun, W., & Barlaz, M. A. (2016a). A batch assay to measure microbial hydrogen sulfide production from sulfur-containing solid wastes. *Science of The Total Environment*, 551–552, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.161>
- Sun, M., Sun, W., & Barlaz, M. A. (2016b). A batch assay to measure microbial hydrogen sulfide production from sulfur-containing solid wastes. *Science of the Total Environment*, 551–552, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.161>
- Syed, M., Soreanu, G., Falletta, P., & Béland, M. (2006). Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes -A review. *CANADIAN BIOSYSTEMS ENGINEERING*, 48(21). Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.320.5576&rep=rep1&type=pdf>
- Szarblewski, M. D. S., Schneider, R. D. C. D. S., & Machado, E. L. (2012). Métodos para a remoção de sulfeto de hidrogênio de efluentes gasosos aplicáveis a reatores anaeróbios. *Revista Jovens Pesquisadores*, 1(1), 62–74.
- Universidad Autónoma de Madrid Facultad de Ciencias Sección de Ingeniería Química. (2012).
- Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería., J. L., Gutiérrez-González, E. C., Colina-Andrade, G. de J., Rojas-Morales, J. L., Gutiérrez-González, E. C., & Colina-Andrade, G. de J. (2016). Ingeniería, investigación y tecnología. *Ingeniería, Investigación Y Tecnología*, 17(4), 453–462. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432016000400453&lang=pt](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432016000400453&lang=pt)
- Yakout, S. M., & Sharaf El-Deen, G. (2016). Characterization of activated carbon prepared by phosphoric acid activation of olive stones. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S1155–

S1162. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.12.002>

Zarra, T., Naddeo, V., Belgiorno, V., Reiser, M., & Kranert, M. (2008). Odour monitoring of small wastewater treatment plant located in sensitive environment. *Water Science and Technology*, 58(1), 89–94. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.330>

Zhai, Y., Wei, X., Zeng, G., Zhang, D., & Chu, K. (2004). Study of adsorbent derived from sewage sludge for the removal of Cd<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> in aqueous solutions. *Separation and Purification Technology*, 38(2), 191–196. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.11.007>



La demostración de la eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S mediante carbones activos obtenidos procedentes del lodo de una PTAR no estaría completa sin comparar las eficiencias de adsorción de los carbones activos regenerados, carbón activo comercial y lodos secos de un reactor UASB sin tratamiento. Asimismo la determinación de la capacidad de adsorción de los medios adsorbentes, como el análisis de las superficies de los carbones activos obtenidos para la remoción del H<sub>2</sub>S mediante el parámetro de la porosidad producido a diferentes condiciones de los datos obtenidos de laboratorio, ello dota de consistencia a las respuestas de las hipótesis de esta investigación, de que cambios en la química de la superficie favorables a la quimisorción de H<sub>2</sub>S ocurre cuando el lodo que se piroliza a 700 °C y concentración molar de 1 M KOH es eficiente.

## CAPITULO IV

### DESARROLLO DE UN ECODISEÑO DE CARBONES ACTIVOS A PARTIR DE LODOS DEL REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE PARA LA ADSORCIÓN DEL H<sub>2</sub>S

#### Resumen

En la presente investigación se evaluó la capacidad de adsorción del carbón activado producido a base de lodos de una PTAR, comercial y lodo sin tratamiento. El lodo utilizado proviene del lecho de secado de un reactor UASB la transformación fue realizada mediante un proceso de activación química con hidróxido de potasio (KOH) y pirólisis. La última se realizó a diferentes temperaturas (500, 600, 700°C) durante 1 hora y concentración molar de (1, 2.5, 4 M de KOH). El rendimiento de los carbones fluctuó entre el 60 y 94%, registrándose el mayor rendimiento a la temperatura de 700°C/1M KOH. La capacidad de adsorción, para el lodo residual, carbón activo comercial y elaborado calculada mediante la integración, fue de 0.161, 0.543 y 0.424 mg H<sub>2</sub>S/g ads y porosidades de 1-2 nm, >50 nm y 10-40 nm respectivamente. De acuerdo a ello, el mejor carbón se obtuvo a una temperatura de pirólisis de 700 °C/1MKOH. Los resultados de la concentración del adsorbato (H<sub>2</sub>S) en el efluente resultan estadísticamente significativas y presentan normalidades.

**Palabras Clave:** Medios adsorbentes, lodos, adsorbato, porosidad y capacidad de adsorción

#### Abstract

In the present investigation, the adsorption capacity of activated carbon produced from sludge from a PTAR, commercial and mud without treatment was evaluated. The sludge used comes from the drying bed of a UASB reactor, the transformation was carried out through a chemical activation process with potassium hydroxide (KOH) and pyrolysis. The last one was carried out at different temperatures (500, 600, 700 ° C) for 1 hour and molar concentration of (1, 2.5, 4 M KOH). The performance of the coals fluctuated between 60 and 94%, with the highest performance at the temperature of 700 ° C / 1M KOH. The adsorption capacity, for the residual sludge, commercial and processed activated carbon calculated by integration, was 0.161, 0.543 and 0.424 mg H<sub>2</sub>S / g ads and porosities of 1-2 nm,> 50 nm and 10-40 nm respectively. Accordingly, the best carbon was obtained at a pyrolysis temperature of 700 ° C / 1M KOH. The results of the concentration of the adsorbate (H<sub>2</sub>S) in the effluent are statistically significant and show normalities.

**Keyword:** Adsorbent media, sludge, adsorbate, porosity and adsorption capacity

#### 4.1. Introducción

La búsqueda de soluciones viables a los desequilibrios sociales y ambientales a través del compromiso de todos los actores y productores, los distribuidores, los investigadores y los consumidores es uno de los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030. Bárcena (2016), por ello se introduce el término de ecodiseño que son las acciones orientadas a la mejora ambiental del producto en la etapa inicial de diseño, mediante la mejora de la función, selección de materiales de menor impacto, aplicación de procesos alternativos, mejora en el transporte y en el uso y minimización de los impactos en la etapa final de tratamiento A. Merino (2017); en este caso en la producción de carbones activos.

Actualmente Perú, es uno de los países donde la mayoría de las PTAR no cuenta con una adecuada gestión de los lodos generados en las diferentes unidades de tratamiento, ya que Granados y González (2015) mencionan que la gestión adecuada del residuo (lodos) representa un 25 % - 65 % de los costos totales de gestión de una PTAR. El uso de los biosólidos de una PTAR como medio de adsorción de un gas tóxico ( $H_2S$ ) le conferirá a las PTAR características costo-beneficio favorables y sostenibles con el ambiente, optimizará costos de su disposición final y propone una alternativa de solución a la preocupación nacional en el sector saneamiento siendo que la Política Nacional de Saneamiento del Perú DS N°007-2017-VIVIENDA establece como uno de sus objetivos al 2021, fomentar el uso de los sub productos generadas en PTAR (lodos).

Por ello se vienen investigando sobre varias alternativas del empleo del material precursor para la producción de carbones activos, Ros et al.(2006) estudiaron la eficiencia de adsorción de carbones activos a base de lodos mediante la activación química con KOH, Carvalho y Castro (2013) estudió la producción de carbón activo usando como agente activante el KOH de un residuo de petróleo, C. Sampaio (2015) evaluó la adsorción del  $H_2S$  mediante material adsorbente a base de lodo biológico, finalmente en el 2017 se hace referencia con respecto a la activación de lodos de depuradora con cloruro de cinc (M. Mayta, 2017).

El objetivo de este trabajo fue comparar las eficiencias de la capacidad de adsorción del sulfuro de hidrógeno de los carbones activos regenerados, carbón activo comercial y lodos secos de un reactor UASB sin tratamiento, asimismo la determinación del desarrollo de porosidad de cada una de ellas. Vale notar que, en lo que se sabe no hay estudios previos en la literatura relacionados con la activación de lodos de aguas residuales por hidróxidos alcalinos

(KOH), mientras que el dióxido de carbono y ácido fosfórico han sido escasamente utilizados para la activación de lodos de depuradora, a excepción de una patente en la cual emplearon el KOH sin embargo no se realizó un estudio sobre la variación de concentraciones molares del agente activante Ros et al.(2006). La transformación del material precursor a carbones activos usualmente lo realizan mediante un proceso de activación química con cloruro de Zinc a pesar de los problemas ambientales que surgen del uso de ese reactivo en particular Moreno, Droppelmann y Verdejo (2006). Por ello, en este caso se empleó el KOH, siendo que reducirá los costos de operación, además dotará de viabilidad y contribuirá en la conservación del ambiente.

## **4.2. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **4.2.1. Área de Estudio del material precursor**

El mapa de ubicación (ver anexo VI) muestra el lugar de la procedencia del material precursor usado para la preparación de los carbones activos. Se encuentra ubicado en la Av. Túpac Amaru distrito de Rímac Lima-Perú, en la zona norte del campus de la Universidad Nacional de Ingeniería, en las coordenadas siguientes 276759.00 m E, 8671375.00 m S.

### **4.2.2. Material Precursor**

Las muestras del precursor de los carbones activos utilizados para la adsorción del  $H_2S$ , fueron los lodos originados en el reactor UASB del centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales (CITRAR FIA-UNI). Estos reciben un tratamiento de deshidratación por percolación y evaporación. La temperatura ambiental máxima de los lodos insitu es de 32.8 °C, del lodo en el lecho de secado 42.2 °C, pH de 6-7.5, sólidos totales 94.5 % y humedad 1. 61 %. El material precursor utilizado tuvo un tiempo de deshidratación de 8 meses aproximadamente (Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales, 2016).

### 4.2.3. Procedimientos

#### *Obtención del carbón activado a partir de lodos residuales producidos en un UASB*

La obtención del medio adsorbente para la desulfuración se obtuvo siguiendo las etapas que muestra la tabla 26, asimismo la muestra precursora fue sometida a diferentes temperaturas de pirólisis y concentración del agente activante (KOH) como indica la tabla 14, y posteriormente fueron lavadas con HCl cada muestra luego de la pirólisis.

Tabla 26

#### *Proceso de la regeneración del lodo de una PTAR*

---

<b>A</b>	Activación
<b>A.A</b>	Agente activante
<b>-A</b>	Muestra sometida con ácido HCL 5 M
<b>-Al*</b>	Muestra Activada químicamente con KOH mediante el método de impregnación
<b>-AMF*</b>	Muestra activada químicamente con KOH mediante el método de Mezcla Física
<b>-AMFt*</b>	Muestra activada químicamente con KOH mediante el método de Mezcla Física Triturada
<b>Au</b>	Austenita, CaZn ((OH)/(AsO <sub>4</sub> ))

---

El procedimiento de tratamiento previo del lodo residual utilizado como adsorbente del  $H_2S$  se realizó como sigue:

-Se recolectó lodo deshidratado proveniente de lecho de secado del reactor UASB de la PTAR de CITRAR FIA-UNI, en seguida se realizó la molienda en un mortero de porcelana y luego se tamizó con un tamiz de  $1\text{ cm}^2$  hasta obtener 150 g de la muestra para cada tipo de carbón activo a preparar.

-Luego de tener un tamaño homogéneo de lodos se realizó la activación empleando 2 ml de KOH por gramo del lodo seco residual, a diferentes concentraciones molares como muestra la tabla 14. Se dejó la mezcla durante 1 hora y posteriormente se filtró para eliminar el reactivo residual de la mezcla precursora y reactivo activante, en seguida se llevó a una estufa a 110 °C durante un periodo de 12 horas.

-El lodo secado se llevó a pirólisis en una mufla a 500 °C, 600°C y 700 °C durante 1 hora. Después del tratamiento térmico se realizó un proceso de lavado empleando 100 ml de disolución de HCl al 5 %, luego se llevó a un agitador durante 4 horas, posteriormente se filtró para eliminar el reactivo residual, luego se realizó el lavado con agua destilada hasta obtener pH neutro 4-5 aproximadamente, finalmente las muestras son sometidas a la estufa a 105 °C durante 12 horas para el secado, y se realizó el pesado de los carbones activos. El primer lavado se realizó para eliminar la materia mineral residual y los productos derivados de la activación, mientras en el segundo se eliminan los posibles restos de ácidos.

#### 4.2.4. Caracterización

##### a) Obtención de la capacidad de Adsorción mediante la Integración

Para la realización del ensayo de adsorción del H<sub>2</sub>S, se hizo pasar 4 L/min de ácido sulfhídrico a través de la columna (torres de lecho fijo) con una carga de 36 gramos de adsorbente a presión y temperatura ambiente. Se registraron las curvas de ruptura de los distintos tipos de carbón activo ensayados representando la concentración de H<sub>2</sub>S a la salida de cada lecho, cuantificada mediante el método volumétrico del H<sub>2</sub>S, frente al tiempo.

La capacidad de adsorción de cada adsorbente ( $q_b$ ), en términos de miligramos de H<sub>2</sub>S retenido por gramo de adsorbente, se calculó por integración del área bajo la curva de ruptura.

$$q_b = \frac{Q_e \cdot M}{W \cdot VM} (C_o \cdot T_b - \int_0^{t_b} C(t) dt) \dots \dots \dots (Ecuación 9)$$

Donde:

$$Q_e = \text{Caudal del afluente del ácido sulfihidrico} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

W=Peso del material adsorbente introducido en la columna (g),

M= Peso molecular de H<sub>2</sub>S (34 mg/mmol),

V<sub>M</sub>= volumen molar (22,4 ml/mmol)

C<sub>0</sub>= concentración de H<sub>2</sub>S en el afluente (ppm)

C(t)= Concentración del H<sub>2</sub>S en el efluente (ppm)

T<sub>b</sub>= es el tiempo que tarda en alcanzar la concentración de ruptura fijada para dar por finalizado el ensayo.

Los resultados experimentales fueron 10 réplicas en cada medio de adsorción, para verificar la reproducibilidad y fiabilidad de los mismos.

### ***Análisis de datos por Matlab***

Matlab es un entorno de programación para el desarrollo de algoritmos, el análisis de datos, la visualización y el cálculo numérico, es una aplicación muy útil para resolver y simular el modelado de procesos dinámicos, permite analizar los datos para finalmente optimizarlos. El lenguaje de Matlab, basado en matrices, es la forma más habitual de expresar las matemáticas computacionales. Los gráficos integrados facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. La simulación del modelado del proceso de adsorción empleando los datos mostrados en el anexo II, caudal, efluente se llevó a cabo mediante la implementación en Matlab del código programado (ver anexo V).

### **b) Caracterización Textural de los Carbones Activos**

Finalizada la etapa de elaboración de carbones activos se procedió a analizar su estructura morfológica con la finalidad de determinar la existencia de porosidad propia del proceso de activación. Para establecer puntos de comparación se emplearán tres muestras: lodo residual, carbón activado de lodo residual, carbón activo comercial, mediante el método de microscopía electrónica de barrido.

Los carbones activos elaborados fueron conservados en un desecador y para su análisis se llevó 10 g de cada muestra, a las muestras a analizar se impregnó 1 gramo de cada muestra en 3 tubos para su análisis en el Microscopio Electrónico de Barrido de donde se obtuvieron las respectivas fotografías mediante el software del equipo.

Esta técnica permitió visualizar y caracterizar la microestructura a través del estudio de superficies. La composición de la región observada es determinada in situ gracias a un analizador elemental, que permitió realizar análisis espectrales o mapas de los diferentes elementos. En el analizador por dispersión de energía de rayos X característicos que emite la muestra como resultado del bombardeo de electrones (Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. et al., 2016).

#### ***Microscopía Electrónica de barrido (SEM/EDX)***

Las micrografías se realizan mediante microscopio electrónico de barrido (SEM/EDX) de la marca Zeiss esta tecnología combina lentes electromagnéticas y electrostáticas, logrando una captura sencilla, eficiente y de alta resolución de modelo EVO MA10, que está equipado con dos lentes gemelas que proporcionan imágenes de alto contraste, con una resolución sub-manométrica. Posee una excelente geometría para el análisis de espectroscopia de rayos X(EDS), y un espectrómetro de rayos X de energía dispersiva (EDS) para identificar la morfología de las superficie de la muestra. (Sevilla, 2016).





Figura 21. Equipo del Análisis SEM de los carbones Activos

Tabla 27

*Análisis del precursor de los carbones activos*

Parámetro	Frecuencia
Estructura de la porosidad del lodo regenerado para cada tipo de material obtenido como carbón activado.	Una vez después del tratamiento



Figura 22. Diagrama de la regeneración del lodo residual a carbón activado.

#### 4.2.5. Diseño estadístico descriptiva y test de normalidad

Para verificar la data de la concentración del efluente de cada torre de lecho fijo, se empleó las pruebas de normalidad, que según Sandoval, Garcia y Lopez (2004) sirve para verificar el comportamiento de datos, para ello se analizan pruebas numéricas y gráficas. Las numéricas plantean una curva normal teórica y mediante una prueba de falta de ajuste someten a prueba la hipótesis nula de que los datos se asemejen a la distribución y la gráfica de cajas que muestra un valor aberrante, que influye en el comportamiento de los datos, ofrecen información de manera compacta, muestran el rango de los datos, la dispersión a través del rango intercuartílico y la mediana como medida de tendencia central.

### 4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron los ensayos respectivos con carbón activo comercial y lodo residual seco, 10 réplicas para cada medio adsorbente, como las primeras pruebas realizadas como muestran las tablas 28 y 29.

#### 4.3.1. Aplicación de los carbones activos como medio de adsorción para el H<sub>2</sub>S

##### -Adsorción del H<sub>2</sub>S mediante carbón activo comercial

Tabla 28

*Eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S mediante carbón activo comercial*

<b>Carbón Activo Elaborado</b>	<b>Temperatura Pirolización (°C)</b>	<b>Agente Activante KOH</b>	<b>Ensayos</b>	<b>Afluente H<sub>2</sub>S</b>	<b>Efluente H<sub>2</sub>S</b>	<b>% Eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S</b>
<b>Carbón Activo Comercial</b>			1	138.59	0.00	100.00
			2	161.69	1.02	99.37
			3	184.79	0.34	99.82
			4	196.34	0.00	100.00
			5	173.24	1.02	99.41
			6	184.79	1.36	99.26
			7	138.59	1.70	98.77
			8	161.69	0.34	99.79

	9	167.46	0.00	100.00
	10	179.01	0.68	99.62
	11	190.56	0.34	99.82

Aguilera (2016) afirma que la estructura porosa y cantidad de carbono elemental, se encuentran bien desarrollados en carbones activos comerciales. Lo mencionado anteriormente posee una relación directa en la adsorción del H<sub>2</sub>S, resultado reflejado en la tabla 28 por el porcentaje de eficiencias que presenta hasta un 99 % de adsorción del H<sub>2</sub>S.

Tabla 29

*Eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S mediante lodo seco residual proveniente de un reactor UASB*

<b>Carbón Activo Elaborado</b>	<b>Temperatura Pirolización (°C)</b>	<b>Agente Activante KOH</b>	<b>Ensayos</b>	<b>Afluente H<sub>2</sub>S</b>	<b>Efluente H<sub>2</sub>S</b>	<b>% Eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S</b>
			1	37.49	23.86	36.36
			2	102.24	64.75	36.67
			3	177.22	61.35	65.38
			4	64.75	40.90	36.84
			5	119.28	74.98	37.14
<b>Blanco (Lodo seco residual proveniente de un reactor UASB)</b>			6	153.36	85.00	44.58
			7	156.77	88.61	43.48
			8	180.10	112.86	37.33
			9	176.50	122.19	30.77
			10	46.50	34.88	25.00
			11	58.60	36.83	37.14

La eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S mediante el lodo seco residual no es óptima, posee una eficiencia de 25-36 % en promedio. Fierro (2012) afirma que la adsorción de H<sub>2</sub>S se da por la presencia de poros, ello se lleva a cabo en el proceso de la activación, sin embargo el material precursor no fue sometido a ningún tipo de tratamiento.

Luego de realizar las pruebas con los carbones activos de referencia, se aplicó los 6 carbones activos preparados a partir de lodos de una PTAR en la adsorción del H<sub>2</sub>S, los resultados de las eficiencias de adsorción se discuten a detalle en el capítulo II, asimismo los resultados de los ensayos realizados se muestran en el anexo III de la tesis.

#### 4.3.2. Determinación de la capacidad de Adsorción mediante la Integración

*Resultados de la capacidad de adsorción del H<sub>2</sub>S promedio de los carbones activos*

Tabla 30

*Capacidad de Adsorción de los carbones activos*

<b>Medios de Adsorción</b>	<b>Capacidad de Adsorción (mg H<sub>2</sub>S/g ads)</b>
C.A 500 °C /1M KOH	0.297286163
C.A 500 °C /4M KOH	0.394677579
C.A a TP 700 °C /1M KOH	0.424414843
C.A A TP 700 °C /4M KOH	0.393048518
C.A a TP 600 °C/2.5 M KOH	0.465302430
C.A Comercial	0.543004953
Blanco (Lodo seco)	0.161556207

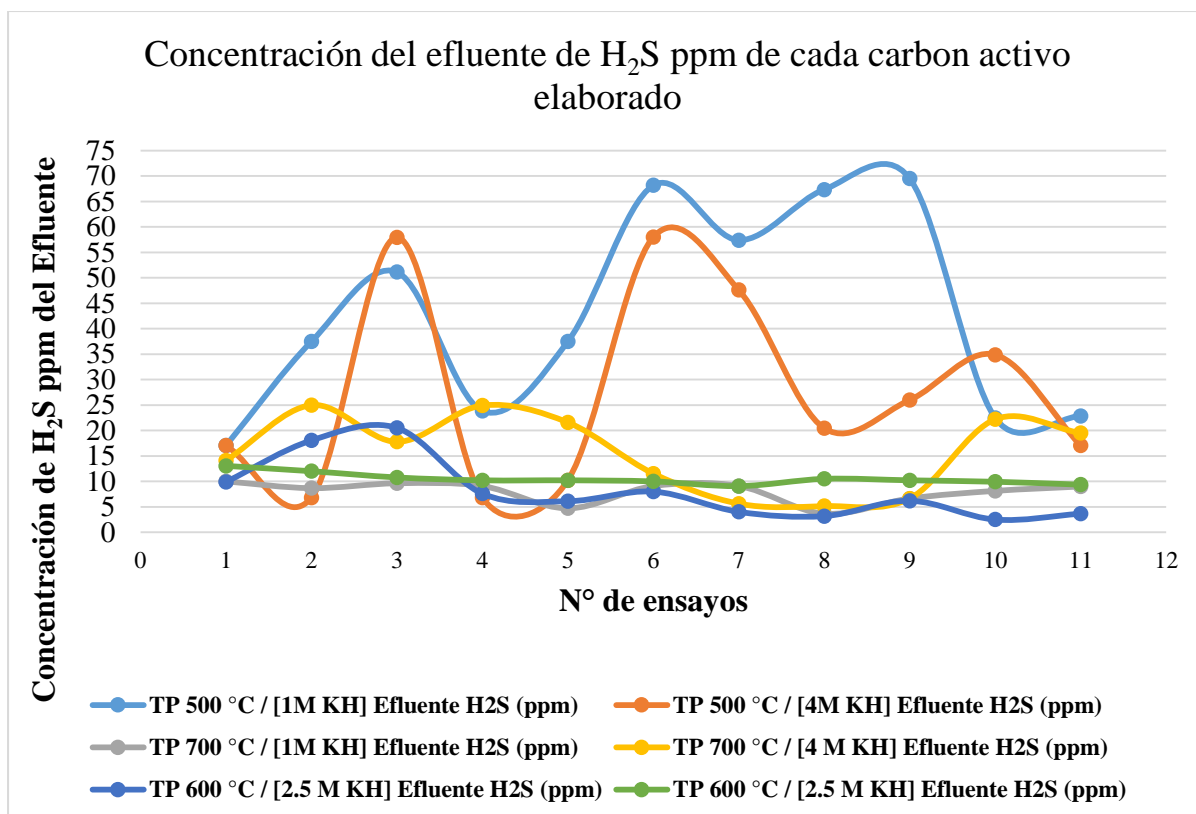


Figura 23. Concentración del H<sub>2</sub>S (ppm) luego del tratamiento mediante carbones activos elaborados

La figura 23 muestra los valores del efluente de la concentración del H<sub>2</sub>S ppm obtenidos luego de pasar como fluido ácido sulfhídrico, mediante torres de lecho fijo como medios de adsorción (carbones activos elaborados a diferentes condiciones de temperatura y concentración molar del agente activante).

El ensayo 2 y 4 la concentración del H<sub>2</sub>S resulta menor a 10 ppm, para el C.A de TP 500°C/ [4M] KOH, el único medio de adsorción que no mantiene una remoción constante, es probable que ello se deba a la concentración del afluente que ingresó en este caso fue alto la concentración en ppm, por otro lado por la inestabilidad del gas, del mismo modo el C.A de TP °500 [1M] KOH. Los 4 C.A restantes no poseen divergencia marcada en la concentración del efluente, cabe destacar que el C.A a TP 700 °C y [1M] KOH es el que posee menor

concentración de H<sub>2</sub>S de 10 ppm aprox. de forma continua en los 11 ensayos como se observa en la figura 23.

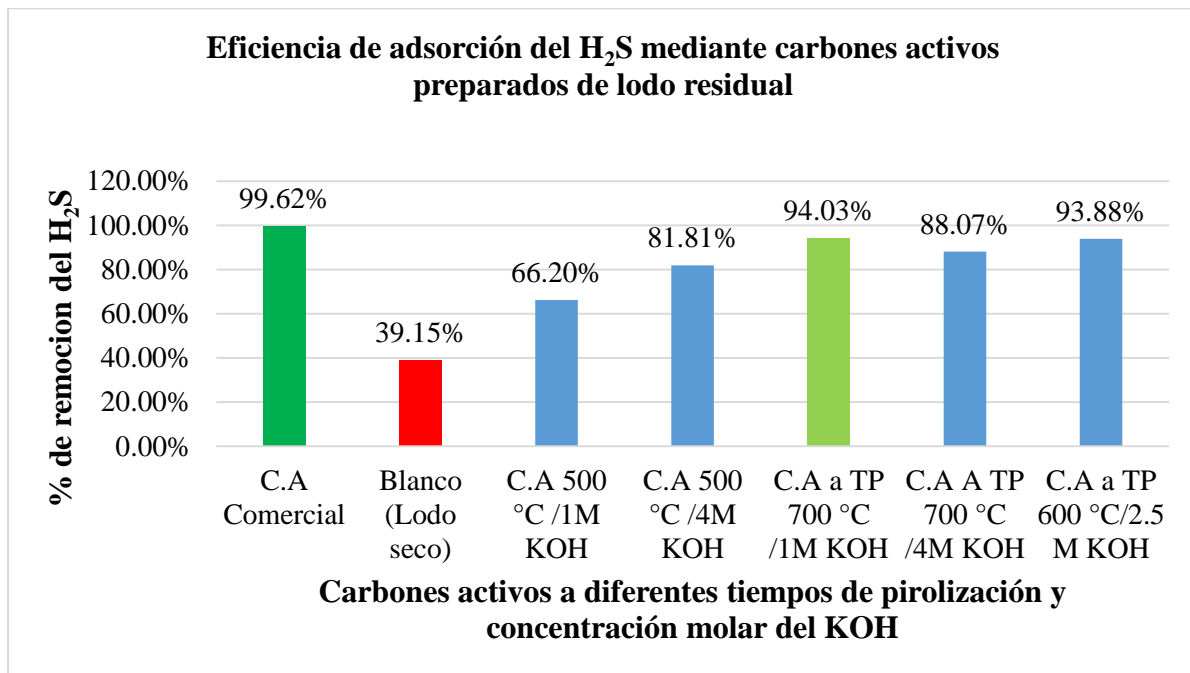


Figura 24. Representación gráfica de la eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S promedio de cada Carbón Activo preparado, Carbón Activo Comercial y el blanco.

La figura 24 muestran la eficiencia promedio de adsorción del H<sub>2</sub>S luego de tratar el gas tóxico mencionado comparando el lodo seco, el carbón activo comercial y C.A producidos a partir de lodos, se afirma que luego del proceso de la regeneración del material precursor incrementa la eficiencia en gran medida hasta el 94.03 % de un porcentaje de remoción del 39.15 %, asimismo cabe recalcar que la eficiencia del carbón activo comercial resultante muestra veracidad a los datos obtenidos siendo que tiene una eficiencia de 99.62 %, resultado esperado por el desarrollo de sus porosidades que presenta en la figura 35.

**Análisis de eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S del C.A preparado de alta rendimiento de adsorción, Blanco y C.A comercial**

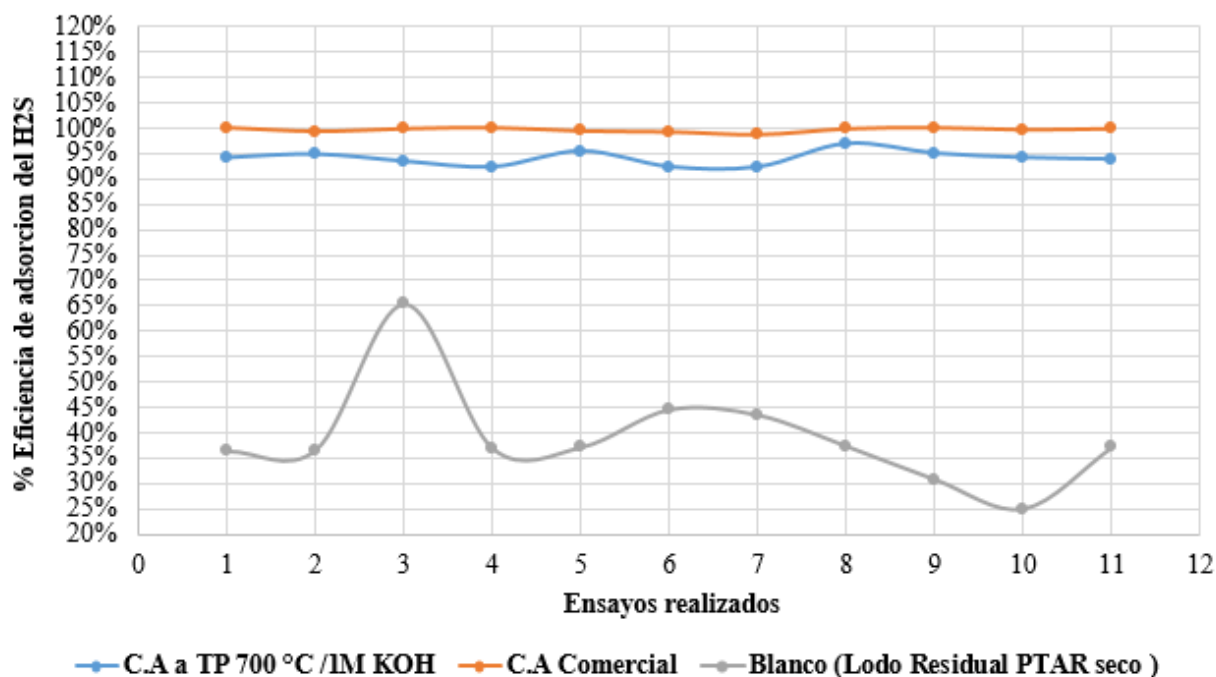


Figura 25. Variación del porcentaje de la eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S mediante los carbones activos preparados, el blanco y carbón activo comercial de los 11 ensayos realizados.

La figura 25 muestra la variación del porcentaje de la eficiencia de remoción del H<sub>2</sub>S del carbón activo; el de mayor eficiencia fue el C.A de TP 700 °C y agente activante [1 M] KOH, se observa claramente que llegó a alcanzar el porcentaje de eficiencia marcante, rango similar al carbón activo elaborado de forma industrial. José, León y Mónica (2016) mencionan que es posible alcanzar % de adsorción óptimas del H<sub>2</sub>S mayores al 90 % mediante carbones activos elaborados, lo que efectivamente se obtuvo en los resultados, el lodo residual seco proveniente de un reactor UASB tuvo una eficiencia menor llegando a un porcentaje continuo de eficiencia en un intervalo de 25-36 %.

a) *Determinación de la capacidad de Adsorción mediante la Integración de los medios Adsorbentes*

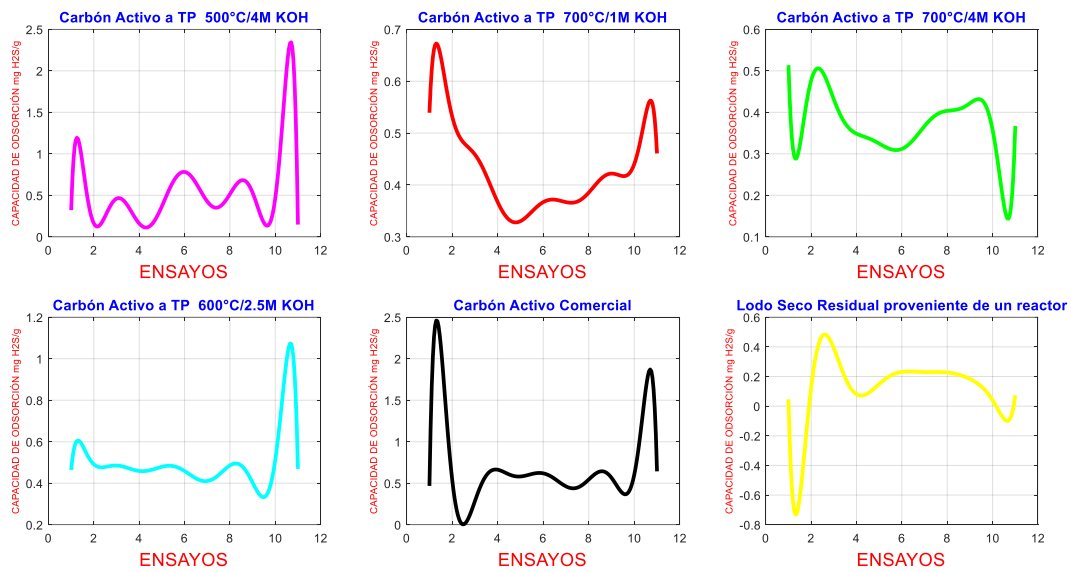


Figura 26. Capacidades de Adsorción de los C.A preparados, Blanco y C.A.C

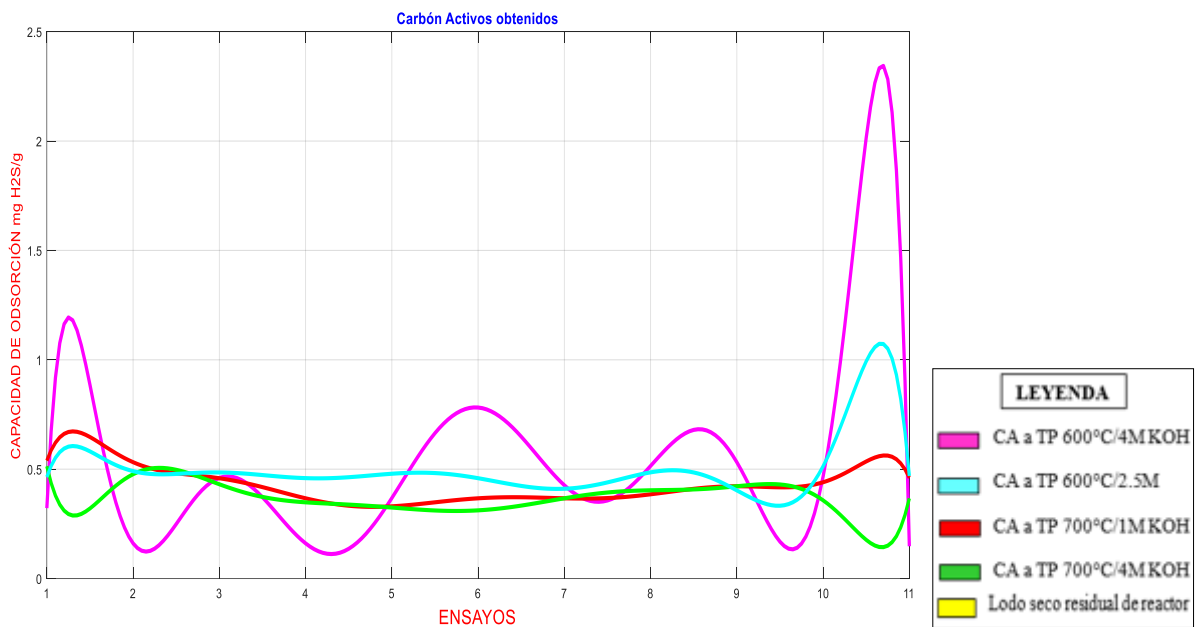


Figura 27. Capacidades de Adsorción de los C.A obtenidos a partir de lodos



La figura 26, 27 muestran el comportamiento de la capacidad de adsorción de los 6 carbones activos, el carbón activo comercial, Blanco (Lodo Residual Seco) de los 11 ensayos realizados para determinar la capacidad de adsorción de los carbones activos, el CA a TP °C 600 / 2.5 M KOH presenta 0.465 mg H<sub>2</sub>S/g de adsorbente, seguido del CA TP °C 700 / 1M KOH de 0.424 mg H<sub>2</sub>S/g de adsorbente, resultados razonables con la concentración del efluente H<sub>2</sub>S obtenidos mostrados en la figura 23.

Cabe mencionar que el CA a TP °C 600 / 2.5 M KOH obtuvo la mayor proporción de adsorción, sin embargo como corrobora la figura 27, se tiene picos altos en algunos casos y en otros disminuye, por tanto teniendo 2 carbones activos a capacidades de adsorción similares se nota que el CA TP °C 700 / 1M KOH en el comportamiento de la adsorción es constante el valor obtenido, ello se corroborara con la porosidad y el análisis estadístico descriptivo más adelante.

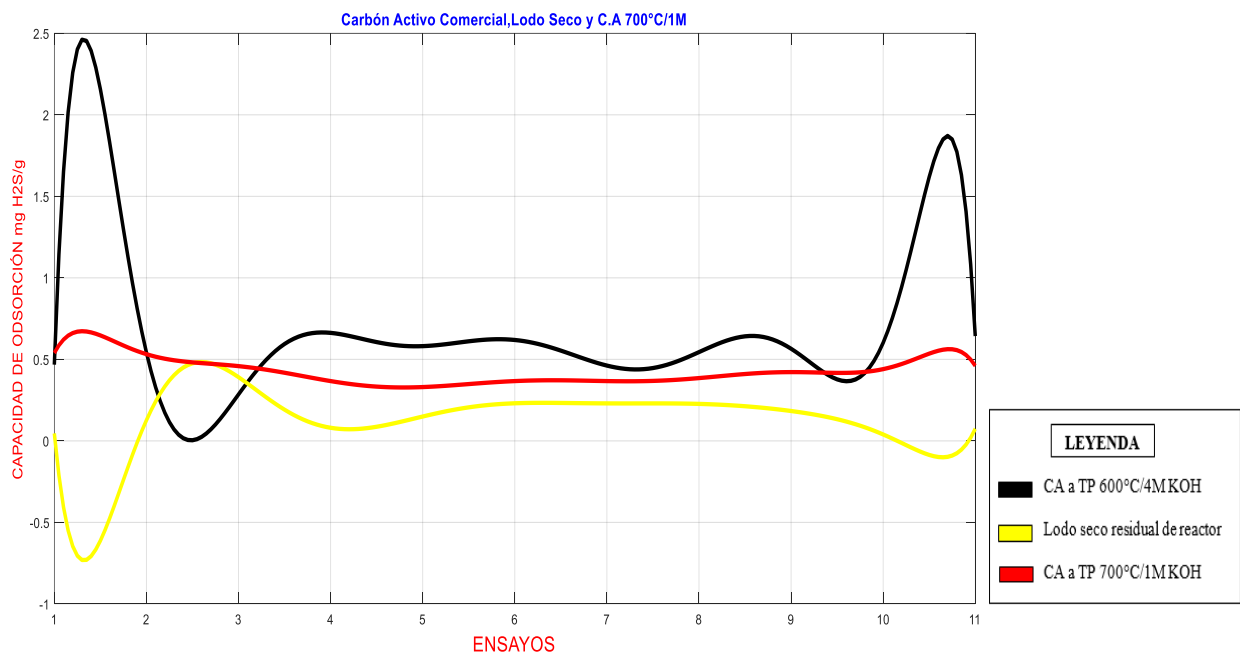


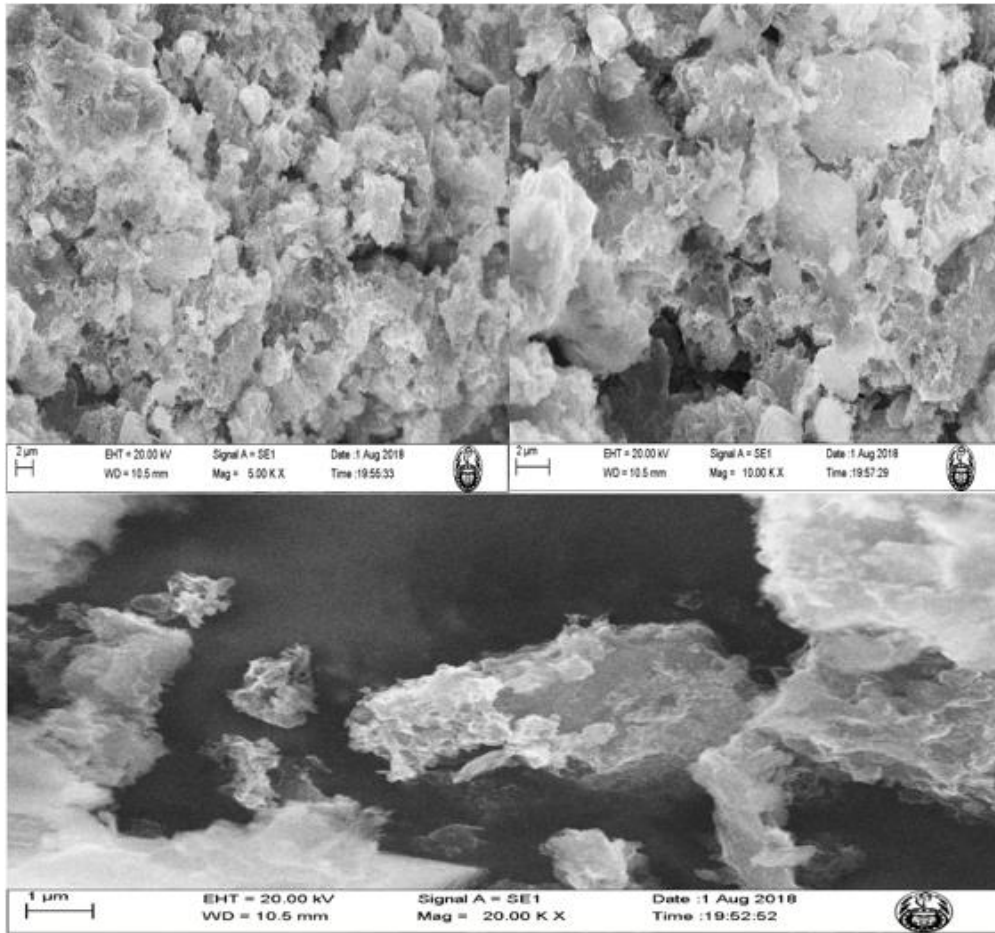
Figura 28. Capacidades de Adsorción del C.A.C, Blanco (Lodo Residual Seco)

La figura 28 permite mostrar la capacidad de adsorción mayor del carbón activo elaborada a una temperatura de 700 °C y agente activante [1M] KOH comparada con el carbón activo comercial, y el lodo sin ningún tratamiento. La eficiencia que presenta se encuentran cercanos a los valores del carbón activo comercial (ver figura 7 indica los colores correspondientes del medio adsorbente) 0.42 mg H<sub>2</sub>S/g ads del C.A 700 °C y A.A [1M] KOH a 0.54 mg H<sub>2</sub>S/g ads del C.A comercial, es favorable demostrar esa eficiencia siendo que José et al. (2016) encontraron que carbones activos elaborados de precursores orgánicos tuvieron incluso una eficiencia mayor al carbón activo comercial. En la tabla 30 se denota los valores de capacidad de adsorción mg de H<sub>2</sub>S por gramo de adsorbente, teniendo el valor mínimo el blanco (lodo seco residual) 0.1615 mg H<sub>2</sub>S/g ads.

#### **4.3.3. Determinación de la porosidad mediante Análisis SEM de los Carbones Activos**

##### ***a) Morfología de los carbones activos regenerados de biosólidos de una PTAR***

A 500X, 10000X y 20 000 X se observaron las muestras de adsorción que no tuvieron una adsorción de H<sub>2</sub>S marcante, las cuales presentan bordes irregulares y una superficie con desarrollo de porosidad moderada. Sin embargo el C.A TP 700 °C y A.A 1 M KOH, presenta la formación de poros definidos circulares y ovaladas incluso analizado a aumentos menores se observó a 400X, 5000X y 10000X (Ver figura 29, 30, 31, 32, 33 y 34).



*Figura 29.* Superficie del C.A TP 500 °C y A.A 1M KOH a 500 x, 10 000 x y 20 000 x

En la superficie del carbón activo a TP de 500 °C y A.A 1M KOH no es posible identificar las porosidades, sin embargo a un aumento de 10 000 X, es posible visualizar una escasa porosidad.

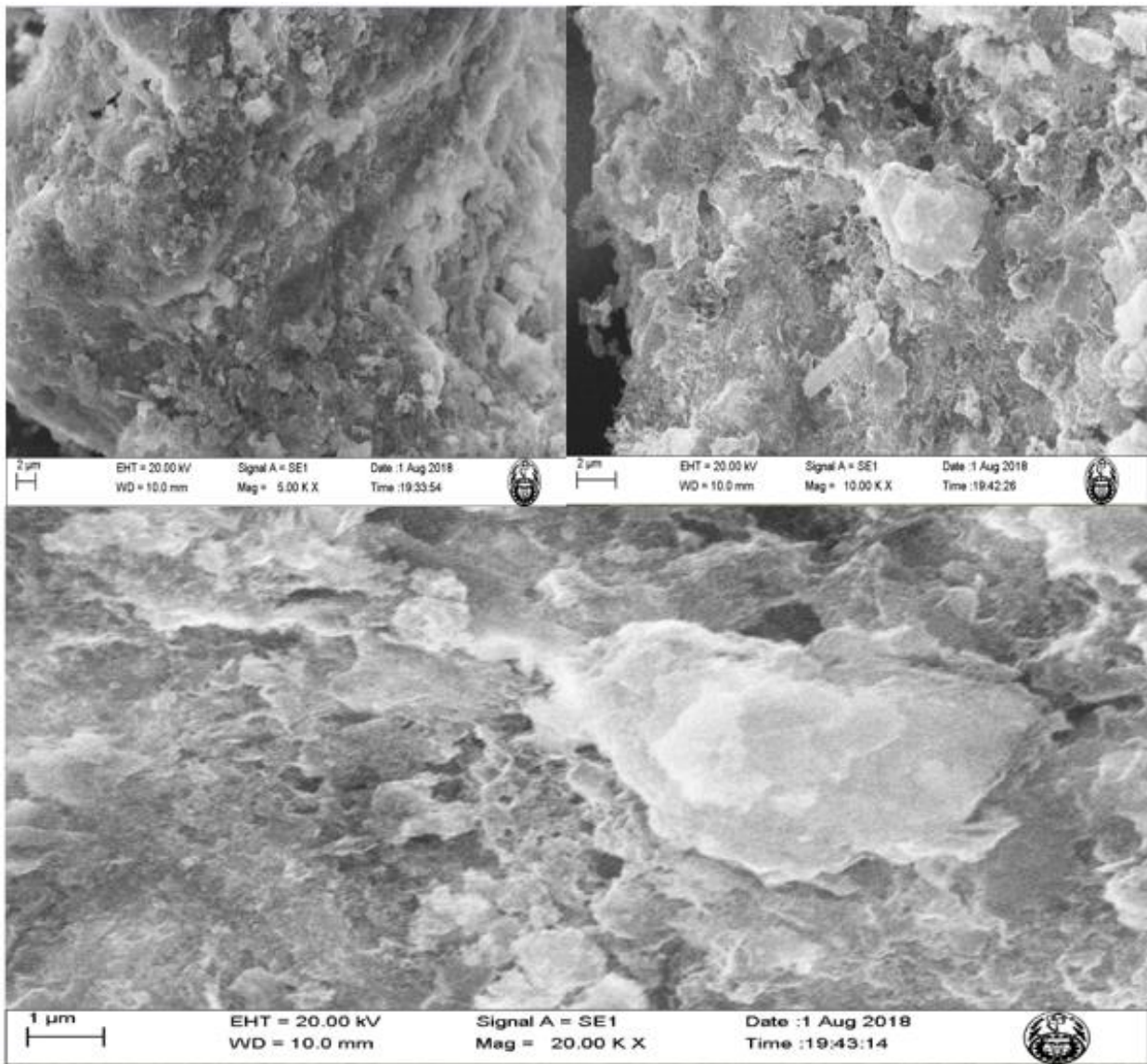


Figura 30. Superficie del C.A TP 500 °C y A.A 4 M KOH a 5000 x, 10 000 x y 20 000 x

Asimismo el Carbón activo a una TP de 500 °C / [4M] KOH, en este caso presenta mayor cantidad de poros a comparación de la primera, sin embargo, los poros que presenta no poseen bordes definidos, el resultado mostrado es probable a la diferencia de concentración molar del agente activante como menciona Rodarte (2017) que el agente activante limpia los residuos encontrados.



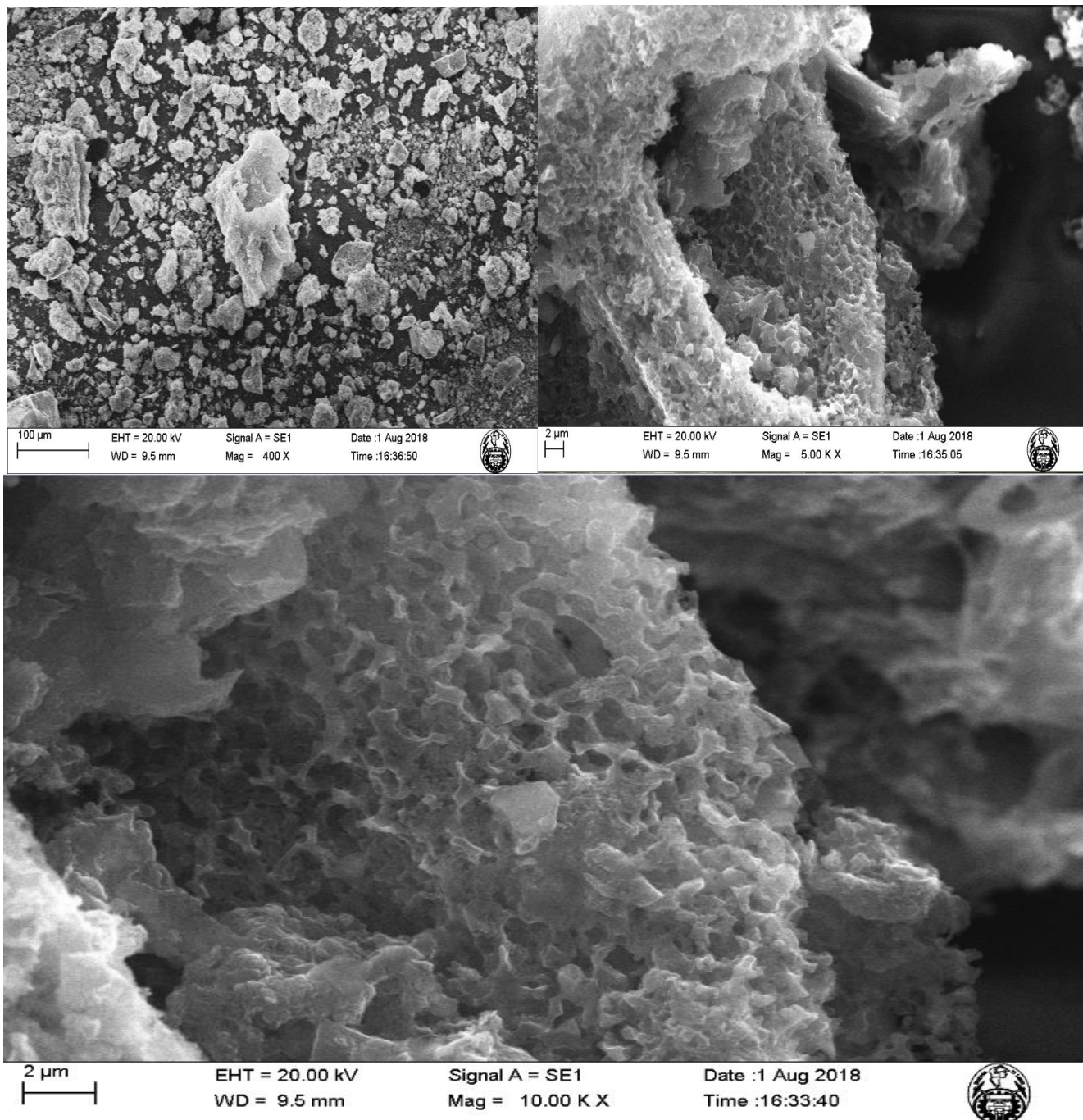


Figura 31. Superficie del C.A TP 700 °C y A.A 1 M KOH a 400 x, 5 000 x y 10 000 x

La figura 31 muestra mayor cantidad de poros, a comparación de los otros carbones activos (mostrados respectivamente en la figuras) además posee de 20 nm-40 nm de diámetro de poros, lo que efectivamente se comprueba con las concentraciones mínimas del efluente del  $H_2S$  del adsorbato obtenidas mostradas en la figura 38.

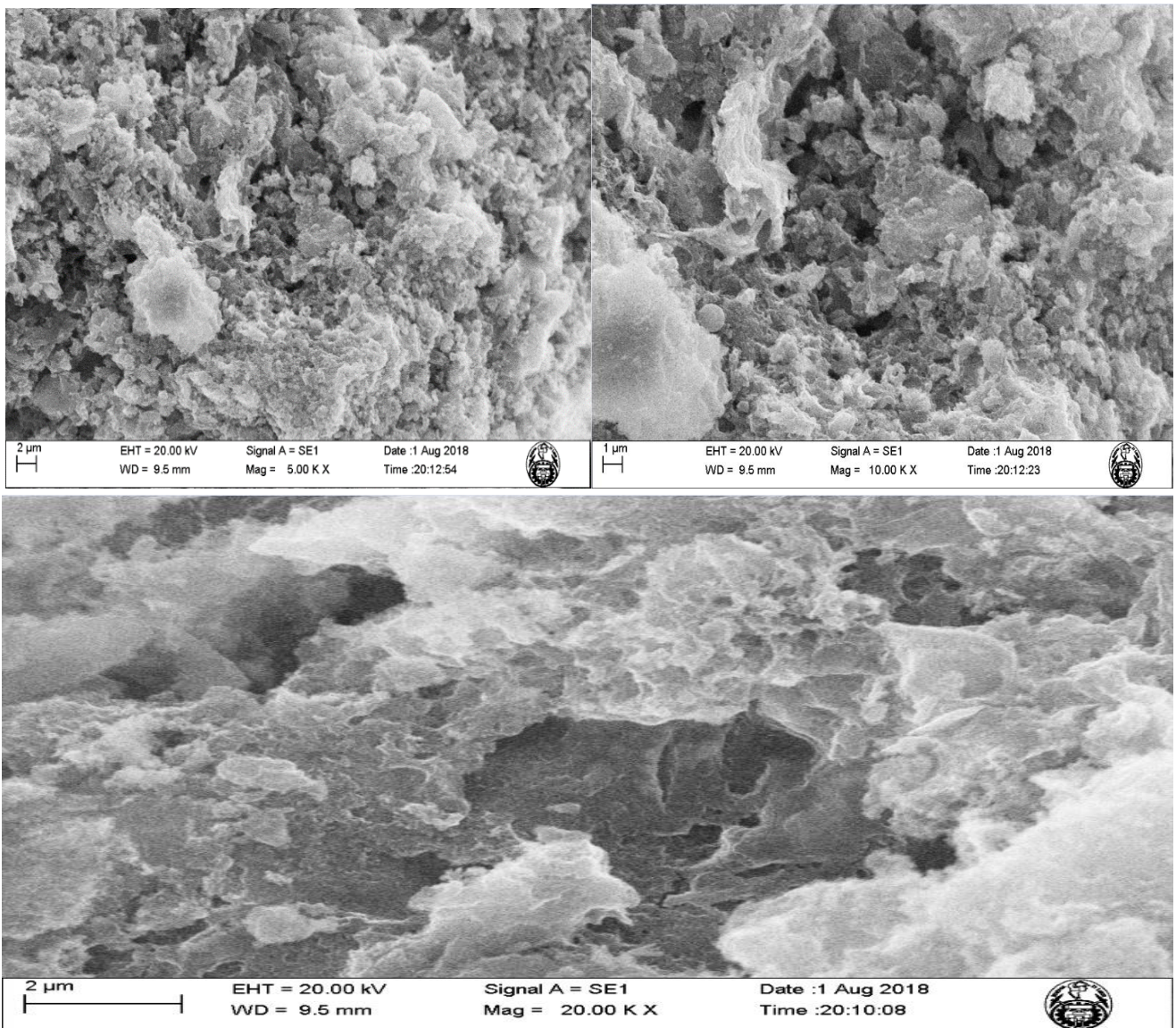


Figura 32. Superficie del C.A TP 700 °C y A.A 4 M KOH a 5000 x, 10 000 x y 20 000 x

El carbón activo obtenido a una TP 700 °C y A.A 4 M KOH no presenta cantidad numerable de porosidad en su superficie, asimismo las que presenta no posee bordes definidos y una aproximación de diámetro de porosidad 5 nm-20 nm, la que guarda relación con la capacidad de adsorción como muestras la figura 32.



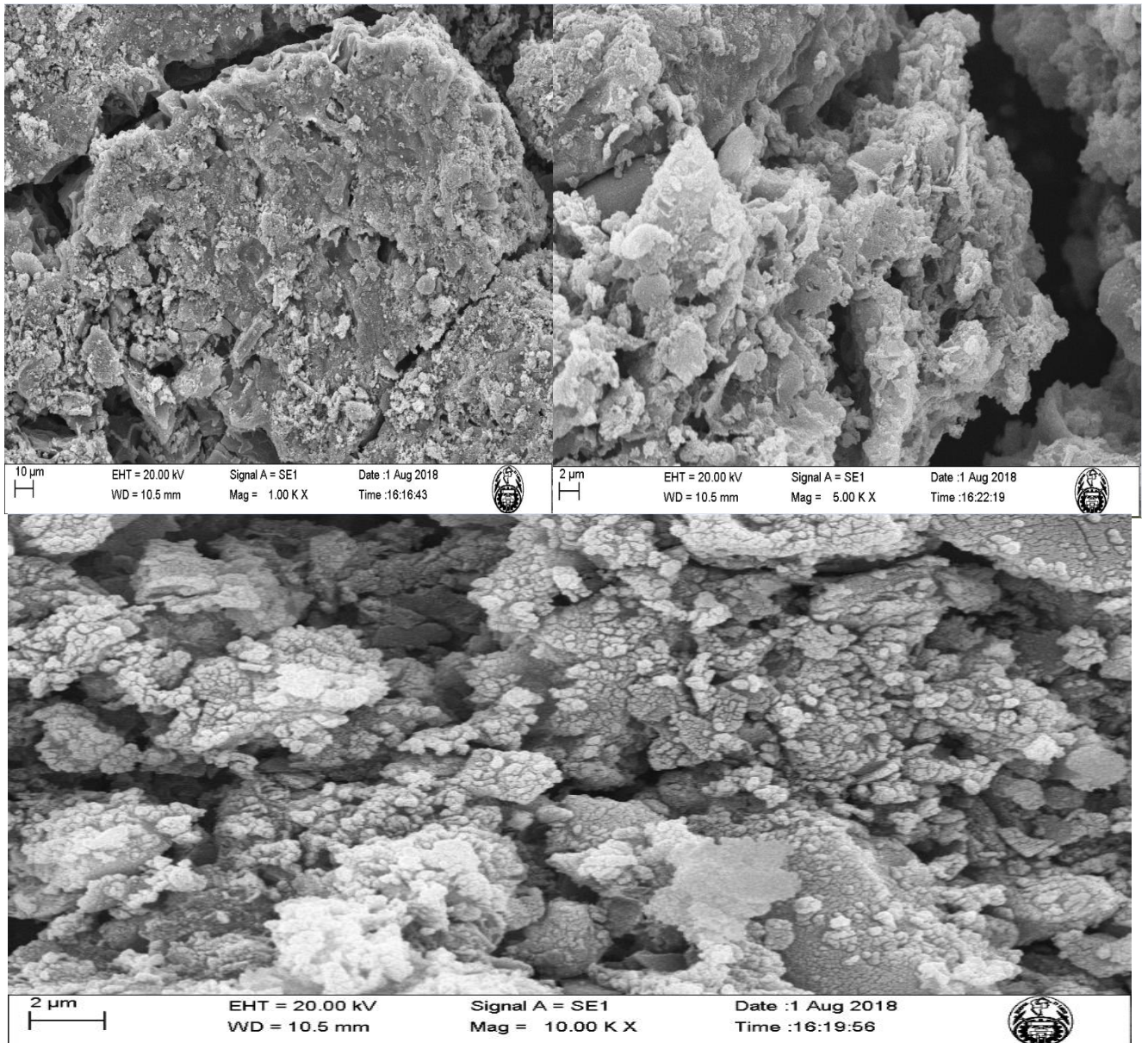


Figura 33. Superficie del C.A TP 600 °C y A.A 2.5 M KOH a 1000 x, 5000 x y 10 000 x

La figura 33, 34 presentan los carbones activos a las condiciones mostradas en el título de las figuras, las porosidades aproximadas que presentan son 5 nm-30 nm.

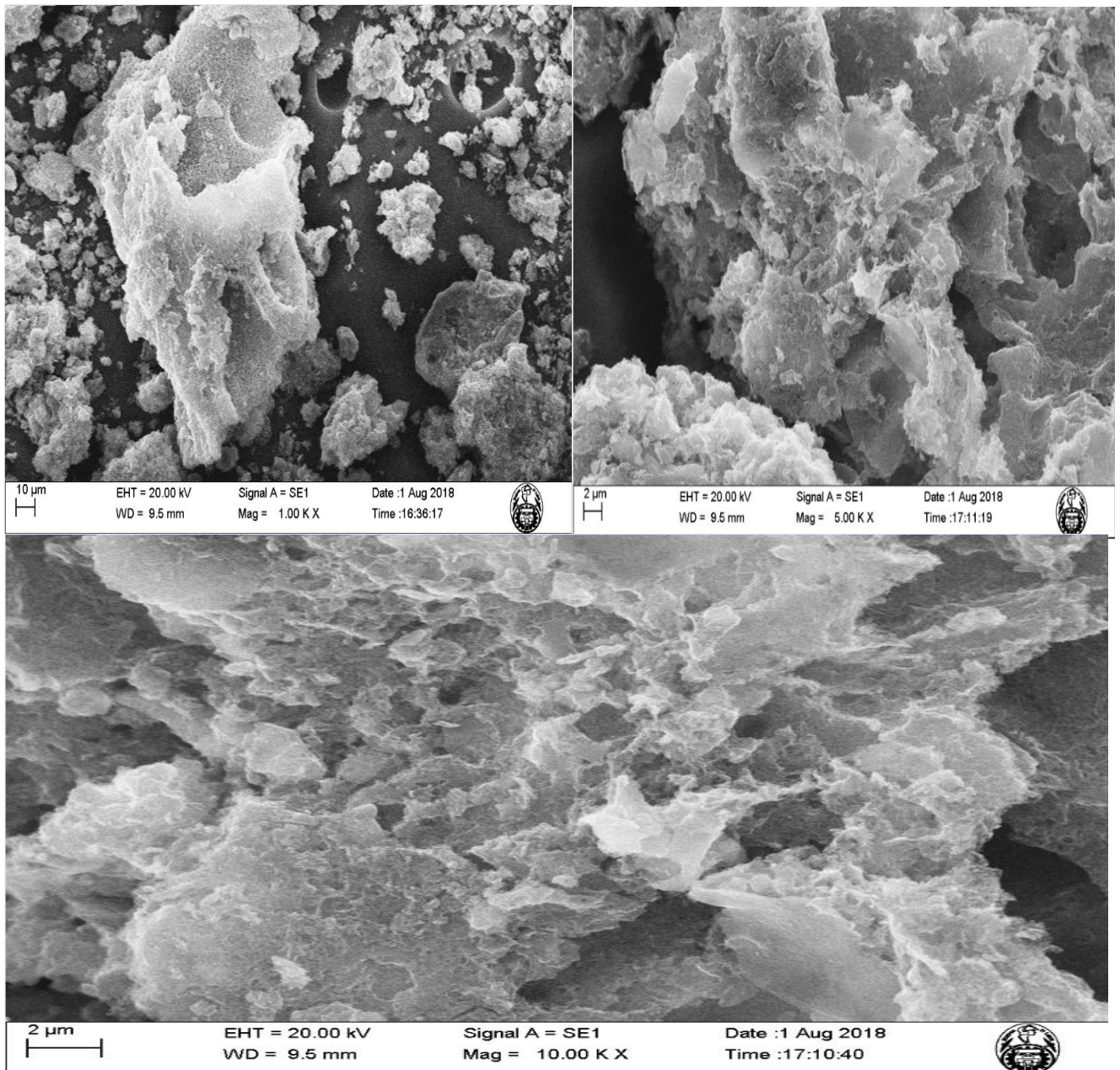


Figura 34. Superficie del C.A TP 600 °C y A.A 2.5 M KOH a 1000 x, 5000 x y 10 000 x

***b) Morfología del Carbón Activo Comercial***

A 400X, 5000X y 10000X se observa claramente la morfología interna de la porosidad del carbón activo, posee poros circulares con bordes indefinidos, denota la presencia de numerosas porosidades.



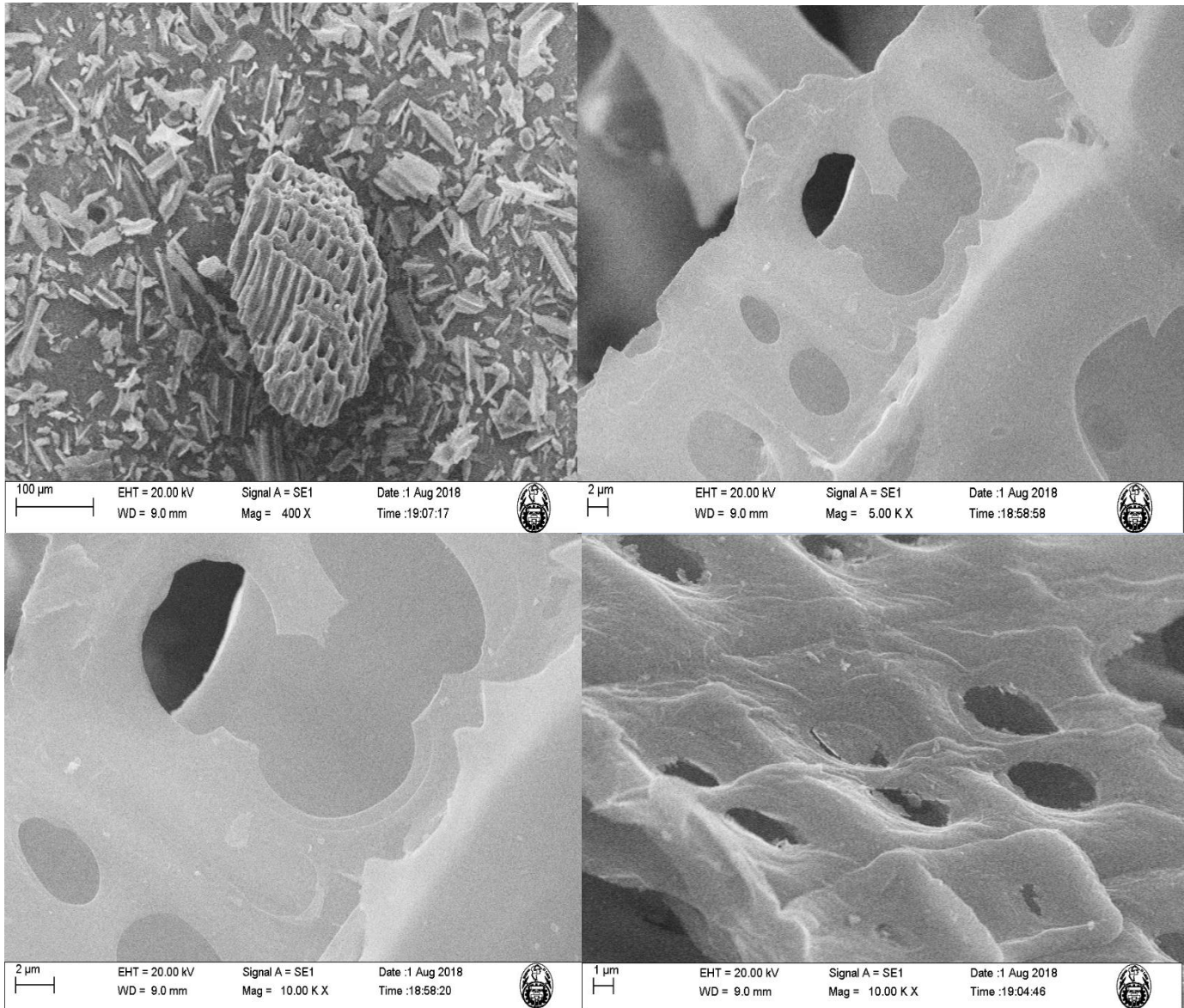
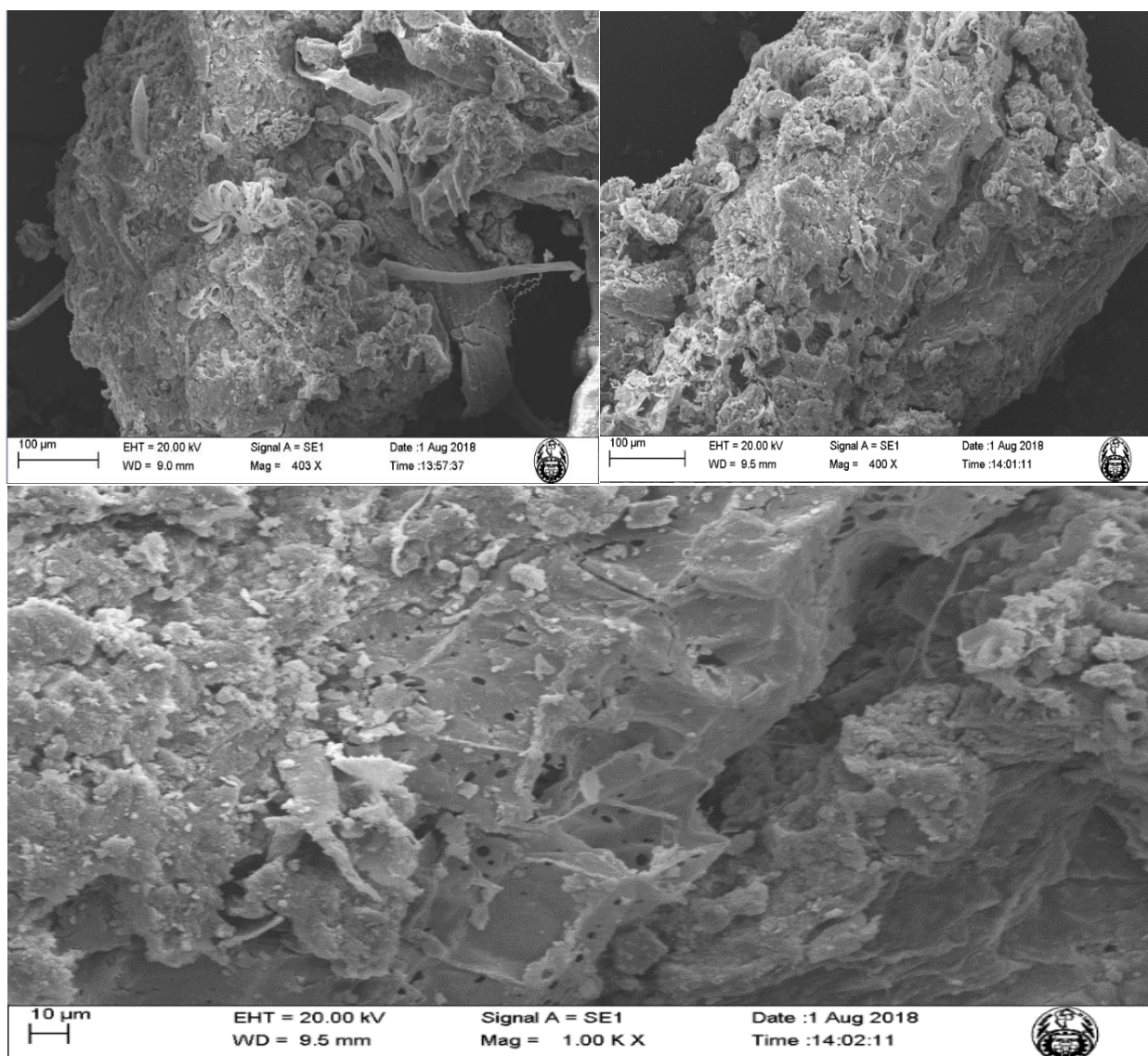


Figura 35. Superficie del Carbón Activo Comercial a 400 x, 5000 x y 10 000 x

El software del análisis SEM permite catalogar en rangos de porosidad aproximadas, en este caso presenta porosidades definidas mayores y/o iguales a 50 nm como muestra la figura 35.



*Figura 36.* Superficie del Lodo residual seco proveniente de un Reactor UASB

***c) Morfología de Lodo seco residual***

A 400X se afirma que es lodo residual de una PTAR por la presencia de microorganismos, asimismo presenta porosidades pequeñas no definidas, a 1000X presenta porosidades diminutas 1nm-2nm, efectivamente corrobora a la capacidad de adsorción del H<sub>2</sub>S mostrado en la tabla 30.

Los mesoporos y los macroporos constituyen la superficie externa del material (responsable de menos del 10 % de la superficie específica), y juegan un papel importante en los procesos de adsorción, son el medio de transporte hacia la porosidad más estrecha. Los microporos constituyen la parte principal de la superficie interna de un carbón activo (responsables del 90 % restante de la superficie específica), y contribuyen de forma fundamental en la capacidad de adsorción (Fierro, 2012).

El mecanismo mencionado por el autor se pudo demostrar en los carbones activos obtenidos por los resultados obtenidos de la eficiencia de adsorción del adsorbato ( $H_2S$ ), según la IUPAC (Internacional Union of Pure and Applied Cheminists), que se basa en la clasificación en el diámetro como sigue: microporo: menores a 2 nm, mesoporos: 2-50 nm y macroporos mayores a 50 nm, se obtuvo que el CA TP 700 °C/ A.A de [1M] KOH resultó con diámetros de la categoría de mesoporos (20nm-40 nm), y el carbón activo comercial mayores a 50 nm. Una elevada superficie específica, con una buena distribución de tamaños de poros que le hagan fácilmente accesible al adsorbato, es una condición necesaria, pero no suficiente, para optimizar la preparación de un carbón activado. Sin embargo, es necesario tener en cuenta otros factores como la adición de agentes oxidantes ya que estos dan lugar a centros primarios de adsorción de moléculas de agua, de esta forma se aumenta el carácter hidrofóbico de los carbones activos. En el caso de la adsorción de compuestos inorgánicos en fase acuosa esto podría resultar beneficioso, motivo por el cual se empleó el agente activante (KOH).

Asimismo es necesario tener en cuenta el pH, dado que el modificar el pH de los adsorbatos no siempre resulta sencillo es preferible optimizar la química superficial del carbón activado, se debe tener en cuenta los criterios anteriores para que la adsorción sea máxima. Afirman Fuente, Ros y Martí (2006) que el KOH generan altas porosidades, lo que efectivamente se obtuvo como muestra la figura 32.



#### 4.3.4. Análisis Estadístico descriptivo

En los ensayos realizados se obtuvo los datos del afluente y efluente de la concentración en ppm del H<sub>2</sub>S de cada torre de lecho fijo con medios de adsorción trabajados para esta investigación (ver anexo IV), a los datos mencionados se aplicó la estadística descriptiva test-dependientes; para ello se analizó la normalidad de cada medio de adsorción obtenido a diferentes condiciones tanto para los datos del afluente y efluente. Todos los resultados de las 11 pruebas realizadas siguen una distribución normal como se muestran en el (anexo IV) todos son significativos ya que son menores que  $p < 0.05$  para corroborar ver el mismo anexo “apartado 6.4.3”, por otro lado las gráficas de box-plot muestran claramente la diferencia de concentración del H<sub>2</sub>S del afluente y la disminución del H<sub>2</sub>S luego del tratamiento reflejado en los datos del efluente.

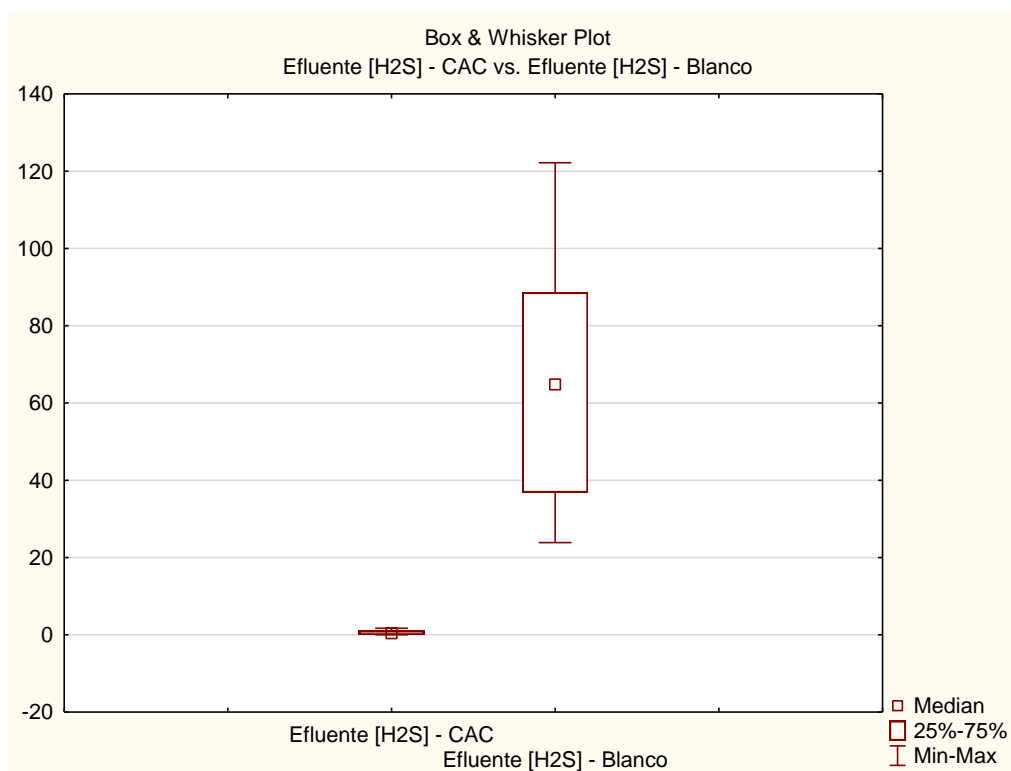


Figura 37. Comparativa de la eficiencia de remoción del H<sub>2</sub>S del C.A.C y el blanco

El carbón activo a las condiciones mostradas en la figura 37 la segunda gráfica de cajas para ser específicos, permite deducir que tuvo una concentración media de 67 H<sub>2</sub>S en ppm, valor que según *Ambient Air Quality Guidelines*(2002) es tóxico para la salud rangos de toxicidad del H<sub>2</sub>S, en cambio la remoción del carbón activo comercial fue marcante como era de esperarse, por ello en la presente investigación se regenera el material precursor lodos (blanco).

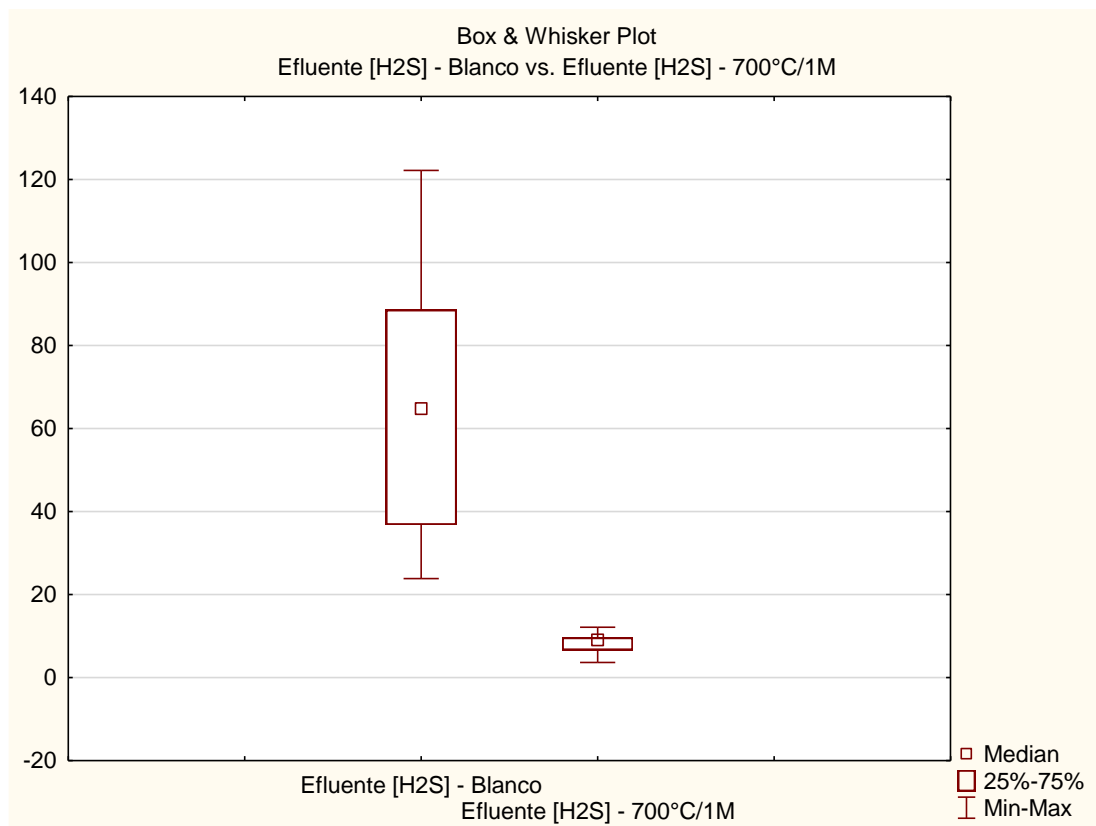


Figura 38. Comparativa de la eficiencia de remoción del H<sub>2</sub>S del Lodo Residual Seco y carbón Activo de 700 °C/1M

La figura 38 para los datos del efluente del gas H<sub>2</sub>S de medio de adsorción carbón activo a una TP 700°C/1M posee una distribución normal, ya que la media se encuentra en la parte central y los bigotes son simétricos, la mediana del efluente del blanco es mayor (67 ppm) a comparación de los datos del segundo es de 8.2 ppm tomado de la tabla de significancias (anexo

IV), lo que implica que la concentración del H<sub>2</sub>S en ppm luego del tratamiento con el lodo seco no es eficiente siendo que se tiene aún una concentración alta de H<sub>2</sub>S.

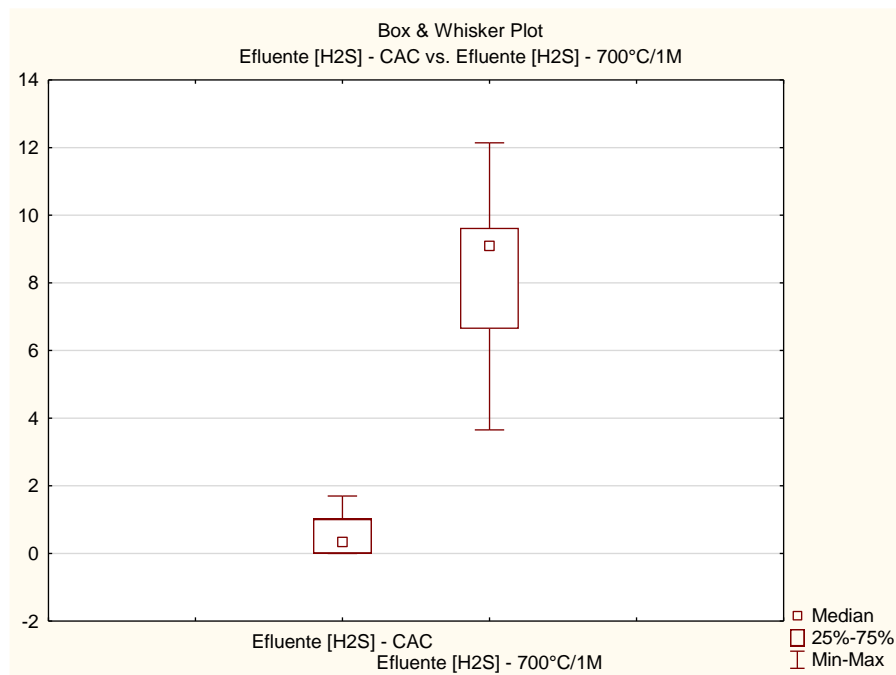


Figura 39. Comparativa de la eficiencia de remoción del H<sub>2</sub>S del Carbón Activo Comercial y Carbón Activo de 700 °C/1M

Se puede afirmar que el H<sub>2</sub>S tratado con el carbón activo comercial tiene una eficiencia mayor ya que la mediana obtenida es 0.6 a comparación del carbón activo regenerado a las condiciones mostradas en la figura 25, sin embargo la diferencia no es marcante ya que este tiene una mediana de 8.2 ppm de H<sub>2</sub>S en el efluente de concentración, valor que según la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) afirma que no es tan perjudicial para la salud ya que el LMP es de 20-50 ppm de H<sub>2</sub>S.

#### 4.4. Conclusión

Se demostró que los carbones activos regenerados a partir de lodos de una PTAR presentan una capacidad de adsorción del H<sub>2</sub>S óptimas obteniéndose 0.452 mg H<sub>2</sub>S/g de

adsorción a comparación del blanco (lodo residual sin tratamiento) 0.161 mg H<sub>2</sub>S/g ads, sin embargo la máxima capacidad de adsorción obtuvo el carbón activo comercial 0.543 mg H<sub>2</sub>S/g ads.

El carbón activo producido a una TP de 700 °C y [1 M] KOH presento porosidad de mayor rango en la categoría de mesoporos (10 nm-40 nm), logrando una eficiencia del 94 % de adsorción del H<sub>2</sub>S, corroborado con el análisis estadístico descriptivo de la significancia de datos en relación a la concentración del efluente del H<sub>2</sub>S a un nivel de confianza del 99 %.

La activación con el hidróxido alcalino es un método viable para la preparación de carbones activos, ya que se logró un 94 % de eficiencia de adsorción, y el desarrollo de porosidades considerables en la categoría de mesoporos (10 nm-40 nm). Lo que esta corroborado con el análisis estadístico descriptivo, anova factorial, y diseños experimentales a un nivel de confianza del 99 %.

## **Referencias Bibliográficas**

- Bárcena, A. (2016). *Agenda 2030 y Los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para America Latina y el Caribe*. Santiago: Naciones Unidas.
- Chernicharo, A. (2013). Principios de tratamiento biológico de aguas residuales reactores anaerobios. *Universidad de Mariño, Volumen 5* (978-958-8609-56-0), 395.
- Enviroment, M. f. (2002). Prepared by the Ministry for the Enviroment and The Ministri of Health. *Wellington*, 66.
- Escandell, M. M., Sabio, M. M., & Reinoso, F. R. (2013). *Preparacion de Carbones Activados con KOH a partir de Residuo de Petroleo. Adsorcion de Hidrogeno*. España: Universidad de Alicante.
- Fierro, M. C. (2012). Preparacion y Caracterizacion de Carbon Activo a partir de Lignina para su Aplicacion en procesos de descontaminacion de aguas. *Universidad Autonoma de Madrid*, 280.

- Fuente, E., Ros, A., & Marti, M. J. (2006). High surface area materials prepared from sewage sludge-based precursors, 65, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.02.017>
- Girona, U. De. (2006). Los lodos deshidratados y Chars basados en lodos para H<sub>2</sub>S Extracción a baja temperatura : Influencia de aguas residuales características del lodo, 40(1), 302–309.
- González A., P. (2016). Estudio de la adsorción de sulfuro de hidrógeno usando lodos secos de depuradora con aplicación al biogás de vertedero. Evaluación experimental, modelado y simulación. Retrieved from <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/52425>
- Grima-Olmedo, C., Ramírez-Gómez, Gómez-Limón, D., & Clemente-Jul, C. (2016). Activated carbon from flash pyrolysis of eucalyptus residue. *Heliyon*, 2(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00155>
- Grisales, A. L., & Rojas Arrieta, M.-W. (2016). Obtencion de carbon activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales. *Universidad Tecnologica de Pereira*.
- Health, N. I. (2005). Safer Healthier People. *DHHS (NIOSH) Publication* , 149.
- Maldonado, M. d. (2010). Evaluacion de procesos para endulzamiento del gas de produccion. *Universidad Nacional de Ingenieria*.
- Milagros, M. C. (2017). *Elaboracion de Carbon Activado a partir de lodos residuales*. Lima: Universidad Nacional de Lima Sur.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingenieria de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid: McGraw-Hill: Revisado por Tchobanoglus y Burton.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y analisis de experimentos*. Mexico: Limusa Wiley.
- Moreno, H. A., Droppelmann, C. V., & Verdejo, M. E. (2006). Evaluacion de Carbon Activo Producido a partir de Lodo Generado en una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas. *SciELO*, 9-14.
- Motato, A. L., & Arrieta, W. R. (2016). *Obtencion de Carbon Activado a partir de Activacion Quimica de pulpa de cafe y su aplicacion en la Remocion de Colorantes en aguas residuales Industriales*. Pereira: Programa de Tecnologia Quimica.
- MSDR. (1996). Material Safety Data Sheet for Hydrogen Sulfide. *Murray Hill, NJ: Boc gases*. Obtenido de <http://www.vngas.com/pdf/g94.pdf>
- Pagura, J. A., Hernandez, L. N., & Dianda, D. F. (2015). Diseño de Experimentos, Diseño factoriales 2k. 27.
- Reinoso, F., & Sabio, M. M. (2004). *Carbon Activado en procesos de descontaminación*. España: Universidad de Alicante.
- Ransal, R., Donnet, J., & Stoeckli, F. (1988). Active Carbon. *Marcel Dekker, New York*, 428.



- Reinoso, F., & Sabio, M. M. (2004). *Carbon Activado en procesos de descontaminación*. España: Universidad de Alicante.
- Ros, A., Lillo-ro, M. A., Fuente, E., Montes-morán, M. A., & Linares-solano, A. (2006). precursores a base de lodos, 65, 132–140.
- Rodarte, M. A. (2017). *Ecodiseño de un sistema de remocion de sulfuro de hidrogeno en un biodigestor pecuario*. Chihuahua: Cimav.
- Richard, K. (1995). Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials, 5 Volume Set, 12th Edition. *Jurnal of alieth adia, escobas y duana*, 1-6.
- Sampaio, C. D. (2015). *Uso del adsorbente a base de lodo biologico en la remocion del sulfuro de hidrogeno*. San Carlos: Universidad de San Pablo.
- Sandoval, A. C., Garcia, P. R., & Lopez, J. M. (2004). *Estadistica practica para el analisis de datos*. Mexico: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Sevilla, U. d. (19 de Julio de 2016). *Centro de Investigacion, Tecnologia e Innovacion*. Obtenido de Centro de Investigacion, Tecnologia e Innovacion: <https://investigacion.us.es/scisi/sgi/servicios/espectrometria-de-masas/normas>
- TACLA, R. (2004). *Aproveitamento de residuos industriales para a biofiltracao do sulfeto de hidrogenio*. Curitiba: Departamento de Engenharia Quimica.
- Vásquez, M. M. (2010). *Reactores Anaerobio de Flujo ascendete* . Mexico .

## CAPITULO V

### 5.1. CONCLUSIONES GENERALES

Se determinó que la eficiencia de adsorción del sulfuro de hidrógeno mediante carbón activo obtenido de la regeneración de lodos provenientes de un *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) es eficiente obteniendo un rendimiento del 94 % de adsorción del H<sub>2</sub>S.

Para la producción de adsorbentes a partir de lodos generados de un reactor UASB a diferentes condiciones de temperatura de pirolización y concentración molar del agente activante hidróxido de potasio (KOH) en la adsorción del H<sub>2</sub>S se determinó mediante el diagrama de pareto que el parámetro de mayor significancia fue la temperatura de pirolización y menor proporción la concentración molar del agente activante.

Por simulación de predicción por superficie de respuesta, se optimizó que un medio adsorbente producido a una TP de 635°C y [2.6 M] de KOH se logra una eficiencia del 96 % aprox. del gas tóxico H<sub>2</sub>S.

Asimismo de la comparación de las eficiencias de adsorción del carbón activo comercial, blanco (lodo residual seco) y medios adsorbentes preparados se demostró que el blanco posee una baja capacidad de adsorción, el carbón activo comercial obtuvo la eficiencia mayor, sin embargo el carbón activo regenerado de lodos alcanzó una capacidad de adsorción considerable ya que no hay diferencia significativa entre el comercial y el regenerado 0.465 mgH<sub>2</sub>S/g ads y 0.543 mgH<sub>2</sub>S/g ads.

La porosidad que desarrollaron los carbones activos preparados alcanzó hasta la categoría de mesoporos en caso de C.A TP °600°C, 700°C y [1, 2.5 M] del reactivo activante catalogadas por la IUPAC, presentando una eficiencia de 93-94 % de adsorción del H<sub>2</sub>S. La eficiencia de la adsorción del H<sub>2</sub>S está directamente relacionada, con las capacidades de

adsorción, pH, porosidad de los carbones activos además de las condiciones de TP °C y concentración molar del reactivo activante.

## **5.2. RECOMENDACIONES GENERALES**

Efectuar las mediciones a tiempos variables ya que en este caso se trabajó a 20 min de tiempo de retención, según bibliografía recomiendan 1 a 2 horas sin embargo se obtuvieron resultados óptimos a pesar de la menor cantidad de tiempo lo que implica menor costo de operaciones cuando se llegue a aplicar a gran escala.

Realizar el análisis químico inmediatamente realizado el muestreo del H<sub>2</sub>S para evitar variaciones en los resultados siendo que el comportamiento de este gas es complejo.

En cuanto a la concentración molar del agente activante, se recomienda realizar más estudios con menor concentración molar y mayor temperatura de pirolización de las estudiadas en esta investigación.

Se recomienda el estudio sobre la optimización de los residuos generados en el proceso de la preparación de los carbones activos (el agente activante residual (KOH), HCl), asimismo los generados en el efluente, el ácido sulfhídrico.

Realizar estudios sobre la reutilización de los medios adsorbentes utilizados en la adsorción del H<sub>2</sub>S.

Para posteriores investigaciones se recomienda además realizar el estudio económico de la implementación del sistema de adsorción del H<sub>2</sub>S y del proceso de preparación de los medios adsorbentes para la descontaminación del H<sub>2</sub>S.

Realizar estudios sobre la influencia del pH y dimensiones de poro de los carbones activos elaborados será importante para optimizar mejor el rendimiento de los medios adsorbentes, asimismo las características específicas del adsorbato.

## ANEXOS

### 6.1. ANEXO I- Implementación del proyecto de Investigación

#### Sistema de Adsorción del H<sub>2</sub>S



*Figura 40.* Proceso de Adaptación del Sistema de Adsorción del H<sub>2</sub>S



*Figura 41.* Tapones de las torres de lecho fijo



Figura 42. Medios Adsorbentes a TP 500 y 600 °C /1,4 y 2.5 M KOH



Figura 43. C.A obtenidos a TP 700, 600 °C y [M] 1, 4 y 2.5 M KOH



Figura 44. Torres de Lecho fijo para la adsorción del  $H_2S$  mediante C.A.C y Lodo Residual



Figura 45. Sistema de Adsorción del  $H_2S$  a escala Piloto



**-Preparación de los Reactivos a Utilizar**



*Figura 46.* Preparación del KOH y la dilución del HCL al 5 %

**-Preparación de los medios adsorbentes**



*Figura 47.* Recolección del material Precursor



*Figura 48.* Molienda, Tamizado y pesado del material precursor



*Figura 49.* Impregnación y filtración del Agente Activante





*Figura 50.* Muestra impregnada con KOH para ser sometida a la estufa



*Figura 51.* Lodo seco residual con agente activante sometido a la estufa



*Figura 52.* Lavado de la muestra con HCl, luego de la pirólisis



*Figura 53.* Equipo de conservación de las muestras (desecador)



*Figura 54.* Equipo para la pirolización de los carbones activos en regeneración, mufla.



*Figura 55.* Medición de pH de la muestra del proceso de obtención de C.A



*Figura 56.* El secado del material precursor lavado con HCl y en la estufa



Figura 57. Cantidad en gramos de los carbones activos obtenidos



Figura 58. Carbones Activos Producidos

## Monitoreo de la concentración del H<sub>2</sub>S



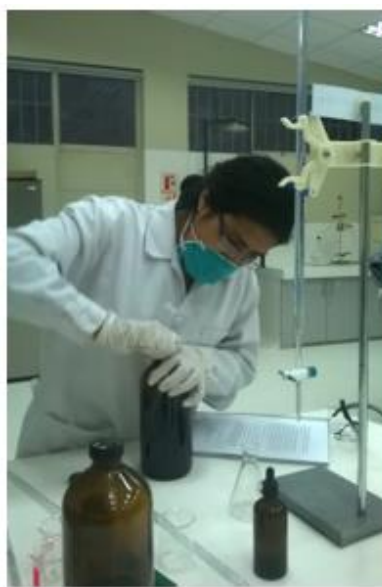
**Muestras Afluente**



**Muestras Efluente**



*Figura 59.* Toma de muestras de la concentración de ácido sulfhídrico



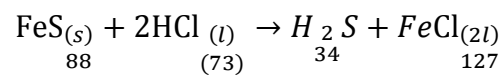
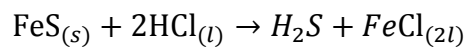
*Figura 60.* Reactivos y Materiales para la determinación del Ácido sulfhídrico



Figura 61. Procedimiento para la determinación del H<sub>2</sub>S

## 6.2. ANEXO II- Cálculos

### 6.2.1 Cálculos del sistema de Generación y almacén de gases



$$\text{H}_2\text{S} = \frac{100\text{gFeS} \times 34 \text{H}_2\text{S}}{88\text{gFeS}} = 38.64 \text{ g}$$

Pureza 95 % del FeS

$$\text{Peso real} = 100\text{g} \times (0.95) = 95.26\text{g FeS}$$

$$H_2S_{real} = 38.64 \times (0.95) = 40.67 \text{ g de } H_2S$$

$$volumen_{real} H_2S = 40.67(80\%) \text{ g de } H_2S = 32.54 \text{ g de } H_2S$$

$$volumen_{real} \text{ del } H_2S = V = \frac{nRT}{P}$$

$$V_{real} \text{ de } H_2S = \frac{0.96 \text{ mol} \times (0.082 \frac{\text{lxatm}}{\text{molxk}}) \times 298 \text{ k}}{1 \text{ atm}} = 23.46 \text{ l}$$

$$ml_{HCl} = \frac{1.18 \text{ s} \times 0.07}{1 \text{ ml de solución}}$$

$$HCl = \frac{0.083 \text{ g HCl}}{1 \text{ ml de solución}}$$

$$ml_{HCl} = \frac{91.71 \text{ HCl}}{0.083 \text{ ml de solución}} = 1104.94 \text{ ml de solución de HCl}$$

### 6.2.2 Preparación de las concentraciones molares del agente activante requeridas (KOH)

$$m(\text{solute}) = M \times V \times \bar{M}$$

Donde:  $M$  = Concentración molar del reactivo

$V$  = Cantidad de solución que se desea preparar

$\bar{M}$  = Peso molecular del reactivo

Ecuación 1. Cantidad de soluto de KOH a emplear para la preparación del mismo a diferentes concentraciones molares.

#### a) Agente Activante KOH concentración molar de 1 M

600 ml de KOH a una concentración molar de 4 M

-Fiola de 500 ml

$$m_{sto} = M \times V \times m$$

$$m_{sto} = 4 \times 0.5 \times (56.11)$$

$$m_{sto} = 112.22 \text{ gr.}$$

-Fiola de 250 ml

$$m_{sto} = MxVxm$$

$$m_{sto} = 4x0.25x(56.11)$$

$$m_{sto} = 56.11 \text{ gr.}$$

**b) 600 ml de KOH a una concentración molar de 2.5 M**

-Fiola de 500 ml

$$m_{sto} = MxVxm$$

$$m_{sto} = 2.5x1x(56.11)$$

$$m_{sto} = 140.275 \text{ gr.}$$

-Fiola de 250 ml

$$m_{sto} = MxVxm$$

$$m_{sto} = 2.5x0.25x(56.11)$$

$$m_{sto} = 35.069 \text{ gr.}$$

**c) 600 ml de KOH a una concentración molar de 1 M**

-Fiola de 500 ml

$$m_{sto} = MxVxm$$

$$m_{sto} = 1x0.25x(56.11)$$

$$m_{sto} = 64.53 \text{ gr.}$$

-Fiola de 250 ml

$$m_{sto} = MxVxm$$

$$m_{sto} = 1x0.25x(56.11)$$



$$msto = 64.53 \text{ gr.}$$

### 6.2.3 Dilución del HCL de 37 % de solución para 500 ml de HCL al 5 %

$$p = \%xVx(PM)$$

$$p = 5\%x0.5x(36.5)$$

$$p = 91.25$$

$$x(ml) = \frac{91.25}{0.4218} = 216.334 \text{ ml}$$

### 6.3. ANEXO III-Resultados del Monitoreo

Tabla 31

Resultados C.A a TP: 500 °C y [ ] A.A de KOH 1 M en la adsorción del H<sub>2</sub>S

TP °C	[ ] A.A	Ensayo	Fecha	Hora	TR (min )	T Amb. °C	T Muestra °C	Caudal (l/min)	Afluente [ ] H <sub>2</sub> S	Efluente [ ] H <sub>2</sub> S	% Eficiencia
500	1 M	1	14/02/2018	10:10	20	28	24	4	54.53	17.04	68.75
		2	14/02/2018	02:32	20	31	27	4	119.28	37.49	68.57
		3	15/02/2018	09:40	20	29	25	6	235.16	51.12	78.26
		4	16/02/2018	12:14	20	27	25	4	64.75	23.86	63.16
		5	19/02/2018	11:06	20	25.1	24	4	119.28	37.49	68.57
		6	19/02/2018	03:12	20	25	24.5	4	211.30	68.16	67.74
		7	20/19/2018	10:00	20	28	25.5	4	168.00	57.40	65.83
		8	23/02/2018	02:42	20	30	28.1	4	169.51	67.34	60.27
		9	25/02/2018	10:30	20	27.9	25.5	4	180.20	69.50	61.43
		10	25/02/2018	12:00	20	29.5	26.9	4	60.85	22.46	63.09
		11	25/02/2018	01:30	20	31	28.9	4	60.86	22.84	62.47

Tabla 32

Resultados C.A a TP: 500 °C y [] A.A de KOH 4 M en la adsorción del H<sub>2</sub>S

TP °C	[] A.A	Ensayo	Fecha	Hora	TR (min )	T Amb. °C	T Muestra °C	Caudal (l/min)	Afluyente [] H2S	Efluente [] H2S	% Eficiencia
500	4 M	1	14/02/2018	10:06	20	26	25	4	112.47	17.04	84.85
		2	14/02/2018	02:51	20	29	24	4	54.53	6.82	87.50
		3	15/02/2018	09:51	20	27	25	6	194.26	57.94	70.18
		4	16/02/2018	12:22	20	27.9	25	4	54.53	6.82	87.50
		5	19/02/2018	11:00	20	27.6	25	4	119.28	10.22	91.43
		6	19/02/2018	03:19	20	26	25.2	4	289.69	58.00	79.98
		7	20/02/2018	10:19	20	26.9	25.5	4	174.00	47.60	72.64
		8	23/02/2018	03:36	20	28.1	30	4	173.00	20.45	88.18
		9	25/02/2018	10:33	20	27	25.5	4	183.63	26.00	85.84
		10	25/02/2018	12:00	20	29.9	27	4	173.00	34.88	79.84
		11	25/02/2018	01:35	20	30	27.8	4	60.89	17.04	72.01

Tabla 33

Resultados C.A a TP: 700 °C y [] A.A de KOH 4M en la adsorción del H<sub>2</sub>S

TP °C	[] A.A	Ensayo	Fecha	Hora	TR (min )	T Amb. °C	T Muestra °C	Caudal (l/min)	Afluyente [] H <sub>2</sub> S	Efluyente [] H <sub>2</sub> S	% Eficiencia
700	4 M	1	27/02/2018	10:03	20	26.5	25	4	166.31	14.11	91.51
		2	27/02/2018	11:45	20	30	28	4	166.31	24.98	84.98
		3	27/02/2018	02:41	20	29.5	27.5	4	145.52	17.78	87.78
		4	28/02/2018	10:08	20	27.5	25.5	4	128.19	24.92	80.56
		5	28/02/2018	11:46	20	28.9	25	4	117.80	21.59	81.67
		6	28/02/2018	01:04	20	29	26	4	103.94	11.54	88.90
		7	28/02/2018	02:40	20	29	27	4	114.34	5.63	95.08
		8	28/02/2018	03:59	20	30	27	4	124.73	5.15	95.87
		9	28/02/2018	05:32	20	28.2	27	4	131.66	6.64	94.95
		10	28/02/2018	10:43	20	27	26	4	128.19	22.20	82.68
		11	28/02/2018	11:45	20	26	25.5	4	128.19	19.48	84.80

Tabla 34

Resultados C.A a TP: 700 °C y [ ] A.A de KOH IM en la adsorción del H<sub>2</sub>S

TP °C	[ ] A.A	Ensayo	Fecha	Hora	TR (min )	T Amb. °C	T Muestra °C	Caudal (l/min)	Afluyente [ ] H <sub>2</sub> S	Efluente [ ] H <sub>2</sub> S	% Eficiencia
700	1 M	1	27/02/2018	10:07	20	27.1	25	4	169.77	10.00	94.11
		2	27/02/2018	11:49	20	29	27.2	4	166.31	8.68	94.78
		3	27/02/2018	02:45	20	29.9	27.5	4	145.52	9.63	93.38
		4	28/02/2018	10:11	20	27.5	24.9	4	117.80	9.09	92.28
		5	28/02/2018	11:48	20	29	26	4	102.56	4.72	95.40
		6	28/02/2018	01:07	20	29	26	4	117.80	9.09	92.28
		7	28/02/2018	02:44	20	30	27.5	4	117.80	9.09	92.28
		8	28/02/2018	04:02	20	29	26	4	117.80	3.65	96.90
		9	28/02/2018	05:36	20	29	27	4	131.66	6.64	94.95
		10	28/02/2018	10:46	20	27	26.5	4	138.59	8.14	94.13
		11	28/02/2018	11:48	20	26	25.5	4	145.52	9.00	93.82

Tabla 35

Resultados C.A a TP: 600 °C y [] A.A de KOH 2.5 M en la adsorción del H<sub>2</sub>S

TP °C	[] A.A	Ensayo	Fecha	Hora	TR (min )	T Amb. °C	T Muestra °C	Caudal (l/min)	Afluyente [] H2S	Efluente [] H2S	% Eficiencia
600	2.5 M	1	27/02/2018	10:12	20	27.9	26	4	159.38	9.90	93.79
		2	27/02/2018	11:53	20	29	27.5	4	159.38	18.05	88.67
		3	27/02/2018	02:48	20	30.1	28.5	4	145.52	20.50	85.91
		4	28/02/2018	10:13	20	28.1	25.8	4	110.87	7.60	93.15
		5	28/02/2018	11:51	20	29	27	4	103.94	6.10	94.13
		6	28/02/2018	01:10	20	29.5	27	4	110.87	8.00	92.78
		7	28/02/2018	02:48	20	29.1	27	4	117.80	(4.02)	96.59
		8	28/02/2018	04:06	20	28.9	27	4	128.19	3.18	97.52
		9	28/02/2018	05:39	20	28	26	4	128.19	6.20	95.40
		10	28/02/2018	10:50	20	26	25.9	4	131.66	2.50	98.10
		11	28/02/2018	11:51	20	27	26.5	4	117.80	3.65	96.90

Tabla 36

Resultados C.A a TP: 600 °C y [] A.A de KOH 2.5 M en la adsorción del H<sub>2</sub>S

TP °C	[] A.A	Ensayo	Fecha	Hora	TR (min)	T Amb. °C	T Muestra °C	Caudal (l/min)	Afluente [] H <sub>2</sub> S	Efluente [] H <sub>2</sub> S	% Eficiencia
600	2.5 M	1	01/03/2018	01:51	20	26	25.1	4	138.59	13.05	90.58
		2	01/03/2018	02:49	20	25.9	25	4	161.69	12.00	92.58
		3	01/03/2018	03:30	20	25	23.2	4	173.24	10.78	93.78
		4	01/03/2018	04:56	20	25	24.5	4	179.01	10.21	94.29
		5	01/03/2018	05:38	20	25	24	4	196.34	10.21	94.80
		6	01/03/2018	07:21	20	25	25	4	179.01	10.00	94.41
		7	01/03/2018	08:05	20	25.5	25	4	138.59	9.08	93.45
		8	01/03/2018	08:43	20	26	25.4	4	173.24	10.50	94.43
		9	01/03/2018	09:17	20	26	25	4	127.04	10.21	93.94
		10	02/03/2018	10:30	20	27	26	4	184.79	9.93	94.63
		11	03/03/2018	11:30	20	26	25.3	4	173.24	9.36	94.60

Tabla 37

Monitoreo realizado del carbón activo comercial en la adsorción del H<sub>2</sub>S

Carbón Activo Comercial	Ensayo	Fecha	Hora	TR (min )	T Amb. °C	T Muestra °C	Caudal (l/min)	Afluente [ ] H <sub>2</sub> S	Efluente [ ] H <sub>2</sub> S	% Eficiencia
<b>C.A. Comercial</b>	1	01/03/2018	01:48	20	26.5	24.5	4	138.59	0.00	100.00
	2	01/03/2018	02:50	20	26.9	25	4	161.69	1.02	99.37
	3	01/03/2018	03:32	20	25.4	25	4	184.79	0.34	99.82
	4	01/03/2018	04:58	20	25	24.8	4	196.34	0.00	100.00
	5	01/03/2018	05:40	20	25	24.5	4	173.24	1.02	99.41
	6	01/03/2018	07:23	20	25	24.8	4	184.79	1.36	99.26
	7	02/03/2018	08:06	20	25.5	24.6	4	138.59	1.70	98.77
	8	02/03/2018	08:45	20	26	25.8	4	161.69	0.34	99.79
	9	02/03/2018	11:00	20	26	25.8	4	167.46	0.00	100.00
	10	03/03/2018	09:02	20	26	25.5	4	179.01	0.68	99.62
	11	03/03/2018	10:00	20	25.5	25	4	190.56	0.34	99.82



Tabla 38

*Resultados del lodo seco de una PTAR en la adsorción del H<sub>2</sub>S*

Lodo de una PTAR	Ensayo	Fecha	Hora	TR (min )	T Amb. °C	T Muestra °C	Caudal (l/min)	Afluente [] H2S	Efluente [] H2S	% Eficiencia
Lodo seco con 7 meses de deshidratación de un reactor UASB	1	14/02/2018	10:12	20	27	25	4	37.49	23.86	36.36
	2	14/02/2018	02:44	20	28	27	4	102.24	64.75	36.67
	3	15/02/2018	10:15	20	25	24	6	177.22	61.35	65.38
	4	16/02/2018	12:20	20	29	26	4	64.75	40.90	36.84
	5	19/02/2018	11:00	20	25	24	4	119.28	74.98	37.14
	6	19/02/2018	03:15	20	25.5	24.5	4	153.36	85.00	44.58
	7	20/02/2018	10:13	20	26.7	25	4	156.77	88.61	43.48
	8	23/02/2018	03:42	20	28.5	29.5	4	180.10	112.86	37.33
	9	25/02/2018	10:30	20	28	25.9	4	176.50	122.19	30.77
	10	25/02/2018	12:00	20	30	28	4	46.50	34.88	25.00
	11	25/02/2018	01:33	20	30.2	27	4	58.60	36.83	37.14

## 6.4. ANEXO IV-Análisis Estadístico

Tabla 39

Anova Factorial

Effect	Univariate Tests of Significance for Eficiecia de Adsorcion de H2S (%) (ANOVA 1)				
	SS	Degr. Of Freedom	MS	F	p
Intercept	299395.7	1	299395.7	10489.87	0.000000
Temperatura de Pirolicacion (°C)	3167.5	1	3167.5	110.98	0.000000
Agente Activante KOH [M]	264.9	1	264.9	9.28	0.004087
Temperatura de Pirolicación (°C)*Agente Activante KOH [M]	1261.9	1	1261.9	44.21	0.000000
Error	1141.7	40	28.5		

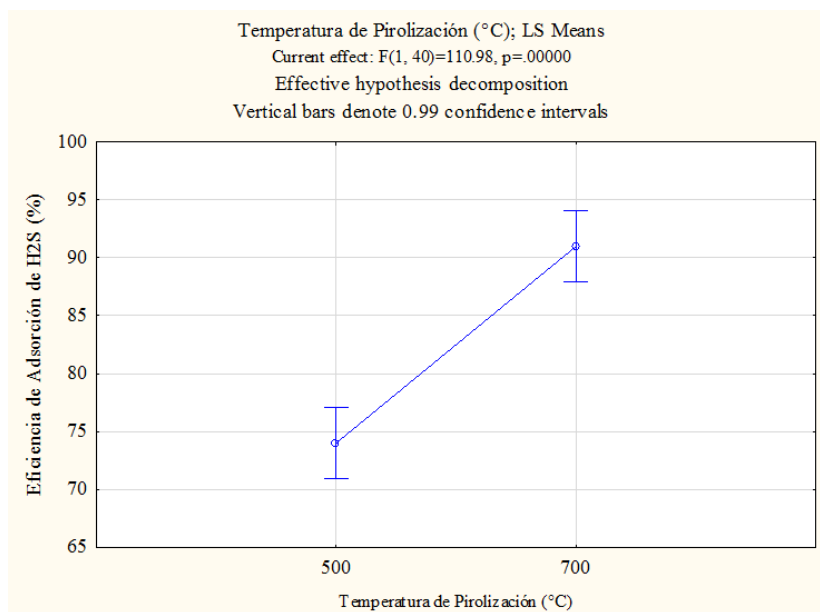


Figura 62. Efectos de la TP para la eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S

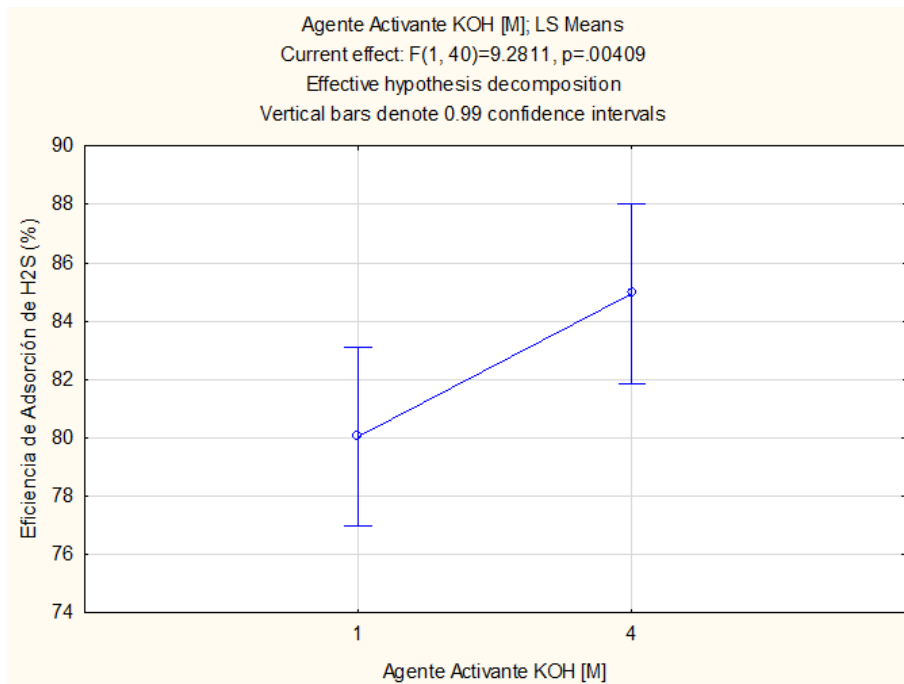


Figura 63. Efectos del Agente Activante para la eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S

#### 6.4.2 Diseño Factorial 2<sup>2</sup>

Tabla 40

Anova Factorial del diseño Factorial 2<sup>2</sup>

Anova: Var:Eficiencia de Adsorción de H2S(%); T-sqr=.63453; Adj:61684 (Design: 2**(2-0) design (Spreadsheet8) in Ensayo DOE Factorial) 2**(2-0) design; MS Residual=46.66458 DV: Eficiencia de Adsorción del H <sub>2</sub> S (%)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1) Temperatura de Pirolicación (°C)	3016.059	1	3016.059	64.63274	0.000000
(2) Agente Activante KOH [M]	388.673	1	388.673	8.32908	0.005362
1 by 2	1618.396	1	1618.396	34.68147	0.000000
Error	2893.204	62	46.665		
Total SS	7916.332	40			

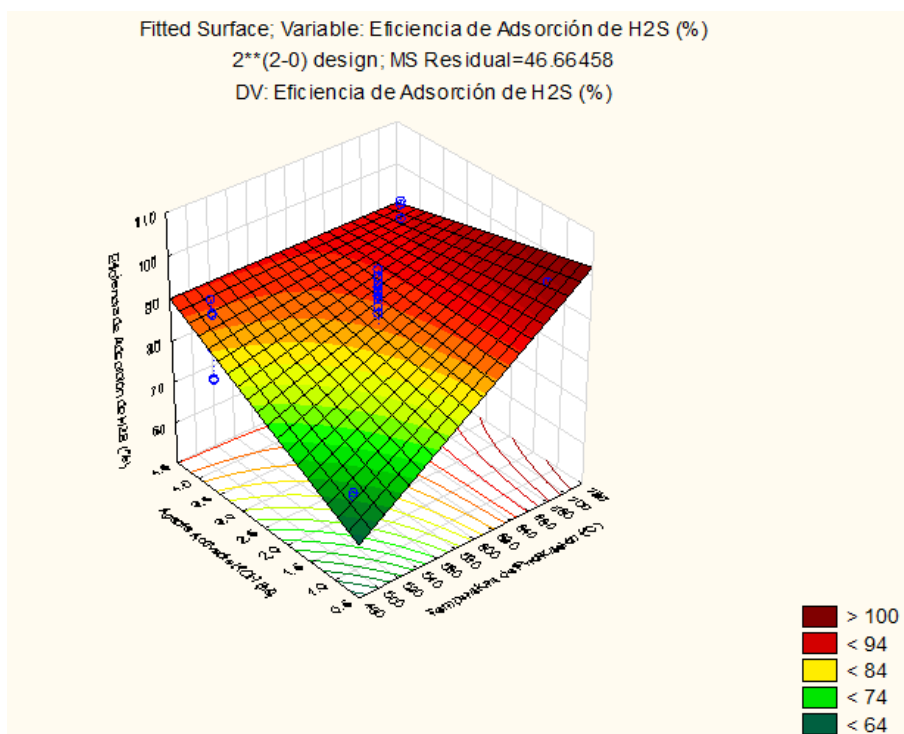


Figura 64. Gráfica de superficie de respuesta del factorial  $2^2$

### 6.4.3 Simulación y Predicción $3^2$

Tabla 41

*Análisis de Varianza para la adsorción del H<sub>2</sub>S*

ANOVA; DV: H2S (ppm); R-sqr=.8916; Adj.:.86902

Factor	SS	dF	MS	F	p
(1)Temperatura (°C)(L)	1411.620	1	1411.620	113.5870	0.000000
Temperatura (°C)(Q)	179.669	1	179.669	14.4572	0.000867
(2)KOH [M](L)	172.412	1	172.412	13.8733	0.001053
KOH [M](Q)	179.669	1	179.669	14.4572	0.000867
1L by 2L	437.993	1	437.993	35.2434	0.000004
Error	298.264	24	12.428		
Total SS	2751.495	29			

Tabla 42

*Coefficiente de regresión para el modelo polinomial*

Regr. Coefficients; R-sqr=.8916; Adj.:.86902 (3\*\*(2-0) full factorial design, 1 block, 9 runs (Spreadsheet5) in Simulacion 3k) 2 3-level factors, 1 Blocks, 30 Runs; MS Residual=12.42765 DV: H2S (ppm)

Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	T(24)	p	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt
(1)Temperatura (°C)(L)	-224.845	48.14957	-4.66973	0.000096	-324.221	-125.470
Temperatura (°C)(Q)	0.797	0.16100	4.95144	0.000047	0.465	1.129
(2)KOH [M](L)	-0.001	0.00013	-3.80227	0.000867	-0.001	-0.000

KOH [M](Q)	37.488	5.06403	7.40271	0.000000	27.036	47.939
1L by 2L	-2.252	0.59219	-3.80227	0.000867	-3.474	-1.029
(1)Temperatura (°C)(L)	-0.040	0.00678	-5.93661	0.000004	-0.054	-0.026

#### 6.4.4 Estadística Descriptiva

##### a) Tablas de Significancia

Diferencia entre el blanco y el C.A elaborado

Tabla 43

*Prueba de Test de la adsorción del H<sub>2</sub>S del lodo residual seco*

Variables	T-test for Dependent Samples (T test dependientes) Marked differences are significant at p < .01000									
	Mean	Stad.Dv	N	Diff	Std. Dv. Diff.	t	df	p	Confidence -99.000 %	Confidence +99.000 %
Afluente [H2S] - Blanco	115.7114	56.29365								
Efluente [H2S] - Blanco	67.8369	32.43184	11	47.8745	31.20487	5.08836	10	0.000472	18.0560	77.6930

Tabla 44

*Adsorción del H<sub>2</sub>S del carbón activo obtenido a TP 500°C Y A.A de 1 M*

Variables	T-test for Dependent Samples (T test dependientes) Marked differences are significant at p < .01000									
	Mean	Stad.Dv	N	Diff	Std. Dv. Diff.	t	df	p	Confidence -99.000 %	Confidence +99.000 %
Afluente [H2S] - 500°C/1M	131.2481	65.51393								
Efluente [H2S] - 500°C/1M	43.1547	20.32327	11	88.0933	48.26633	6.05334	10	0.000123	41.9714	134.2153

Tabla 45

*Adsorción del H<sub>2</sub>S del carbón activo obtenido a TP 500°C Y A.A de 4 M*

Variables	T-test for Dependent Samples (T test dependientes) Marked differences are significant at p < .01000									
	Mean	Stad.Dv	N	Diff	Std. Dv. Diff.	t	df	p	Confidence -99.000 %	Confidence +99.000 %
Afluente [H2S] - 500°C/4M	144.4798	72.40409								
Efluente [H2S] - 500°C/4M	72.40409	19.33910	11	116.9520	56.97050	6.80854	10	0.000047	62.5126	171.3914

Tabla 46

*H<sub>2</sub>S del carbón activo obtenido a TP 700°C Y A.A de 1 M*

Variables	T-test for Dependent Samples (T test dependientes) Marked differences are significant at p < .01000									
	Mean	Stad.Dv	N	Diff	Std. Dv. Diff.	t	df	p	Confidence -99.000 %	Confidence +99.000 %
Afluente [H2S] - 700°C/1M	133.7381	21.57047								
Efluente [H2S] - 700°C/1M	8.2270	2.39680	11	125.5110	20.11208	20.69766	10	0.000000	106.2925	144.7296

Tabla 47

*Adsorción del H<sub>2</sub>S del carbón activo obtenido a TP 700°C y A.A de 4 M*

Variables	T-test for Dependent Samples (T test dependientes) Marked differences are significant at p < .01000									
	Mean	Stad.Dv	N	Diff	Std. Dv. Diff.	t	df	p	Confidence -99.000 %	Confidence +99.000 %
Afluente [H2S] - 700°C/4M	132.2892	19.83188								
Efluente [H2S] - 700°C/4M	15.8209	7.62487	11	116.4683	18.70180	20.65479	10	0.000000	98.5974	134.3392

Tabla 48

*Adsorción del H<sub>2</sub>S del carbón activo obtenido a TP 600°C y A.A de 2.5 M*

Variables	T-test for Dependent Samples (T test dependientes) Marked differences are significant at p < .01000									
	Mean	Stad.Dv	N	Diff	Std. Dv. Diff.	t	df	p	Confidence -99.000 %	Confidence +99.000 %
Afluente [H2S] - 600°C/2.5M	147.1988	11.08793								
Efluente [H2S] - 600°C/2.5M	9.0893	3.38695	11	138.1094	9.87522	46.38448	10	0.000000	128.6729	147.5459

Tabla 49

*Adsorción del H<sub>2</sub>S del carbón activo Comercial*

Variables	T-test for Dependent Samples (T test dependientes) Marked differences are significant at p < .01000									
	Mean	Stad.Dv	N	Diff	Std. Dv. Diff.	t	df	p	Confidence -99.000 %	Confidence +99.000 %
Afluente [H2S] - CAC	170.6127	19.38810								
Efluente [H2S] - CAC	0.6182	0.58532	11	169.9945	19.53721	28.85816	10	0.000000	151.3253	188.6637

## b) Pruebas de Normalidad y Diagrama de cajas

Para afirmar la eficiencia de adsorción del gas tóxico  $H_2S$  de los carbones activos elaborados, se aplicó las pruebas de normalidad, la significancia y el gráfico de cajas, se detalla a continuación.

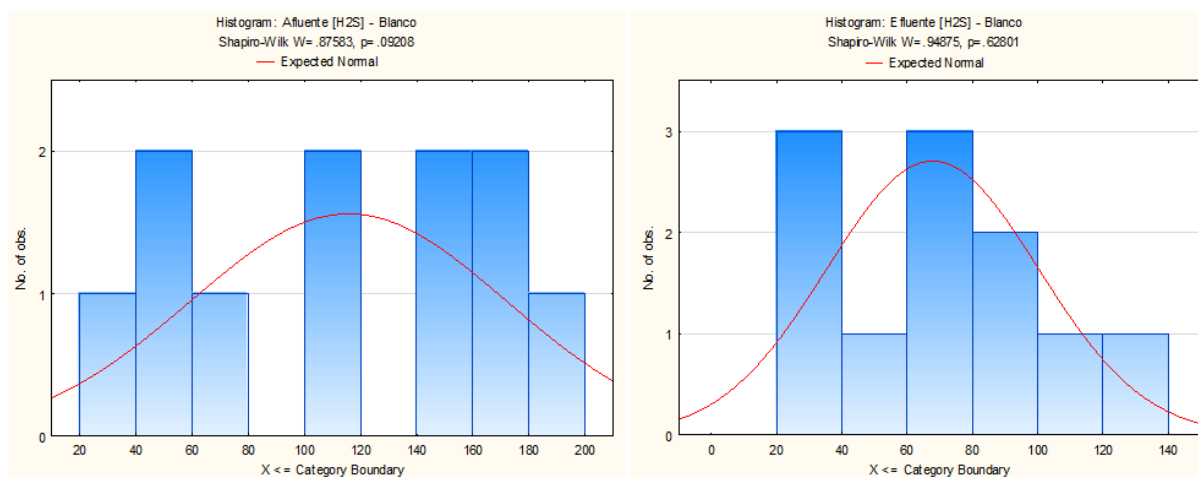


Figura 65. Pruebas de normalidad de la aplicación del blanco para la adsorción del  $H_2S$

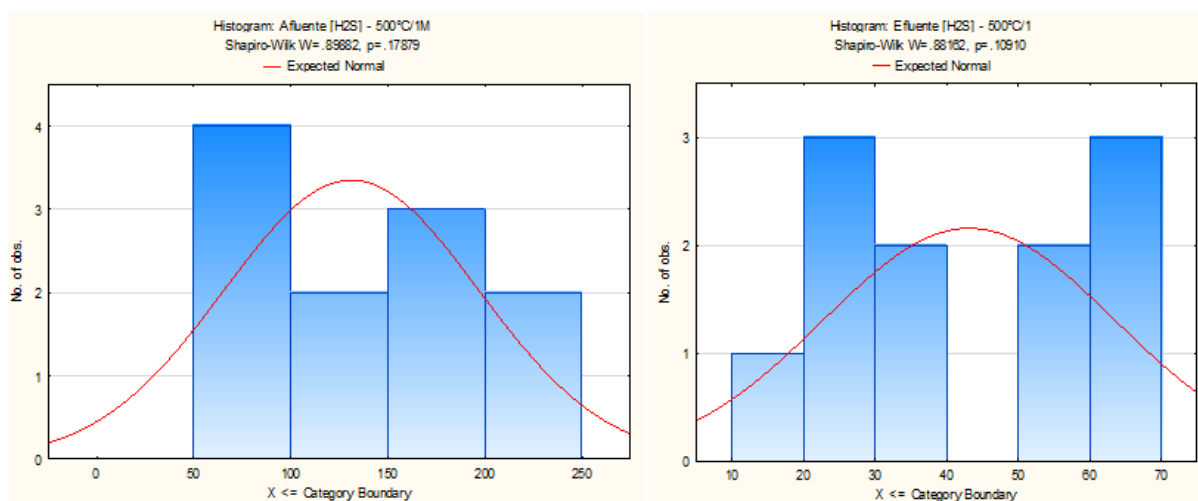


Figura 66. Pruebas de normalidad del C.A TP 500 °C/1M KOH para la adsorción del  $H_2S$

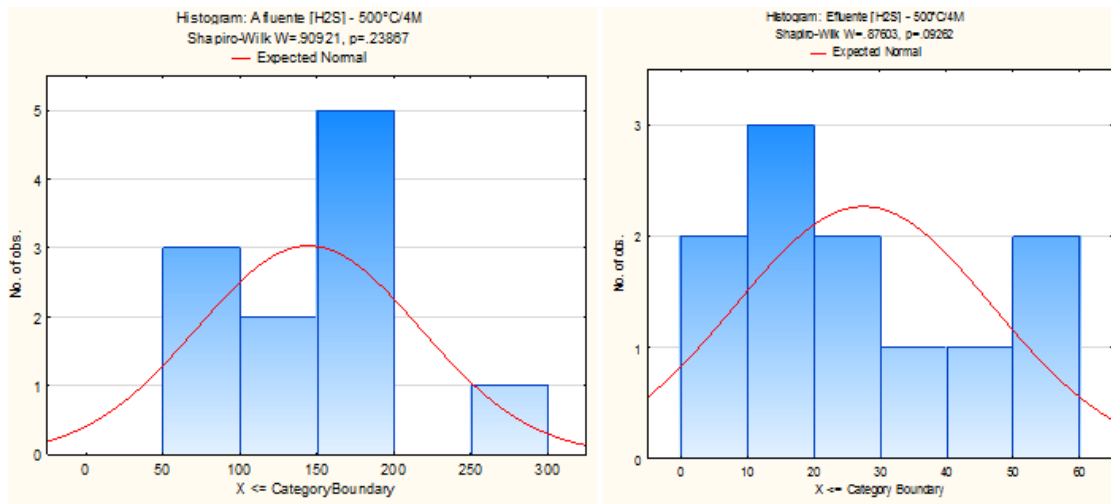


Figura 67. Pruebas de normalidad de la aplicación del C.A TP 500 °C/4M KOH para la adsorción del H<sub>2</sub>S

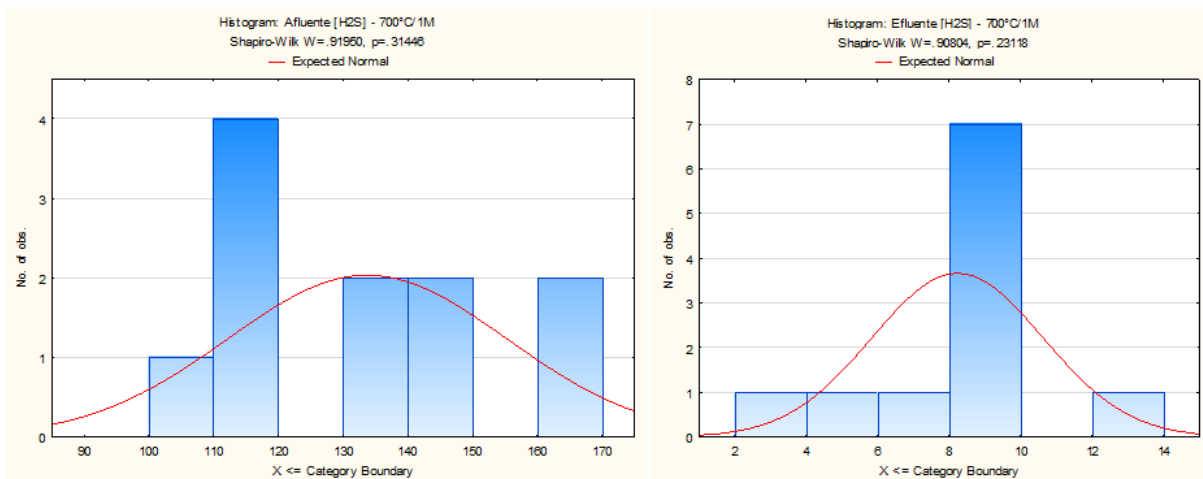


Figura 68. Pruebas de normalidad de la aplicación del C.A TP 500 °C/4M KOH



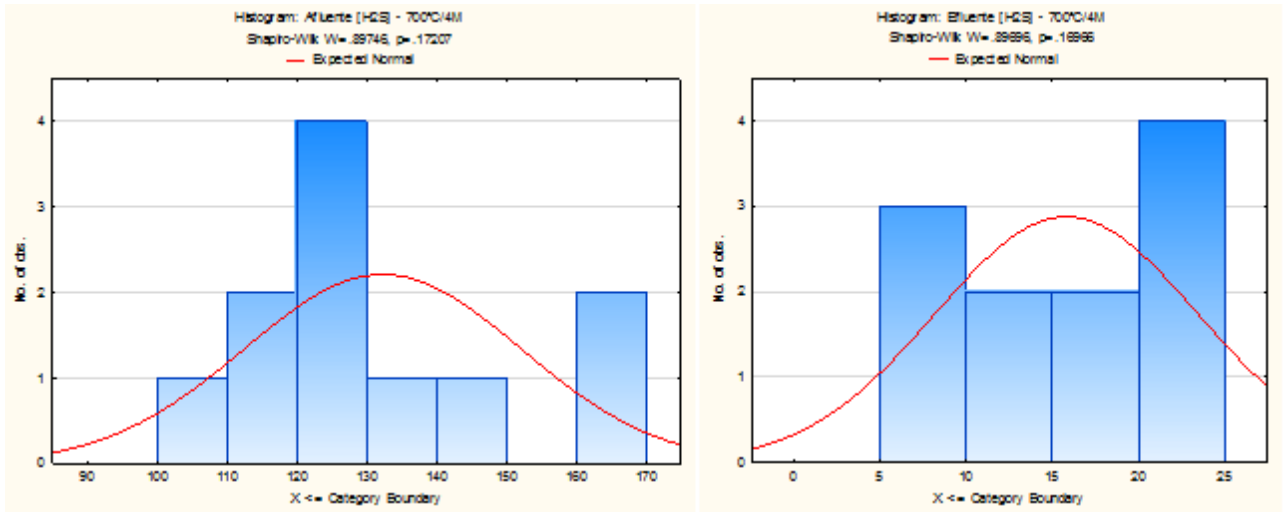


Figura 69. Pruebas de normalidad de la aplicación del C.A TP 500 °C/4M KOH

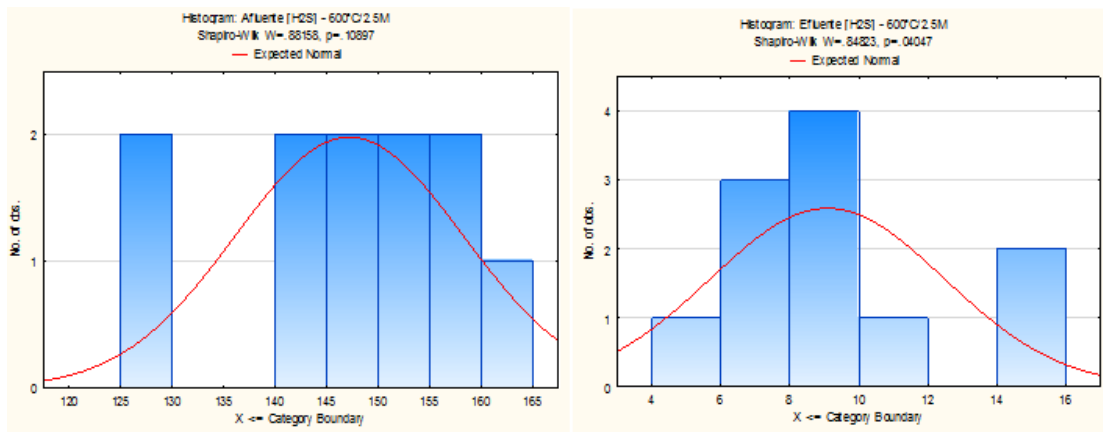


Figura 70. Pruebas de normalidad de la aplicación del C.A TP 600 °C/ 2.5M KOH

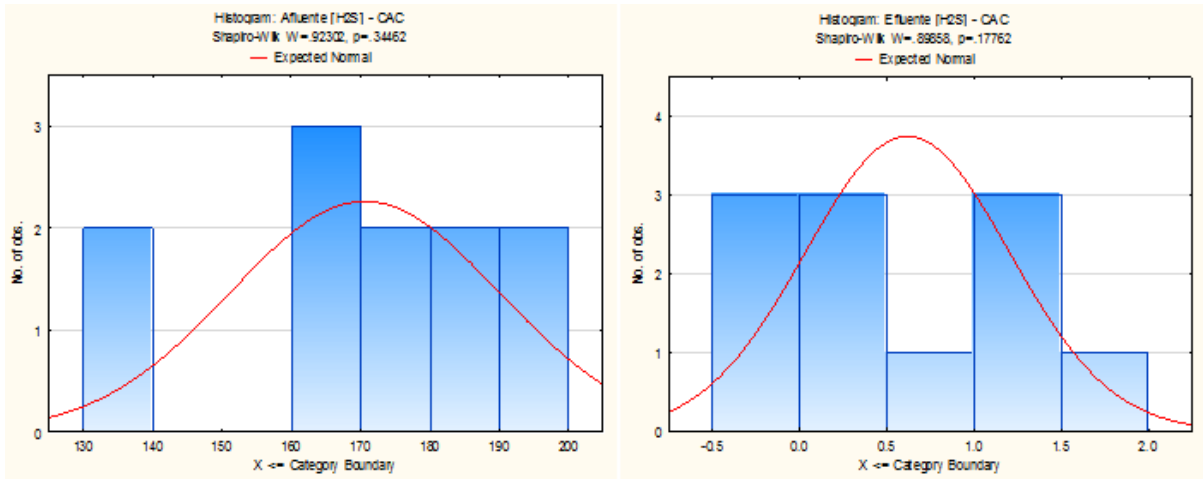


Figura 71. Pruebas de normalidad de la aplicación del C.A.C

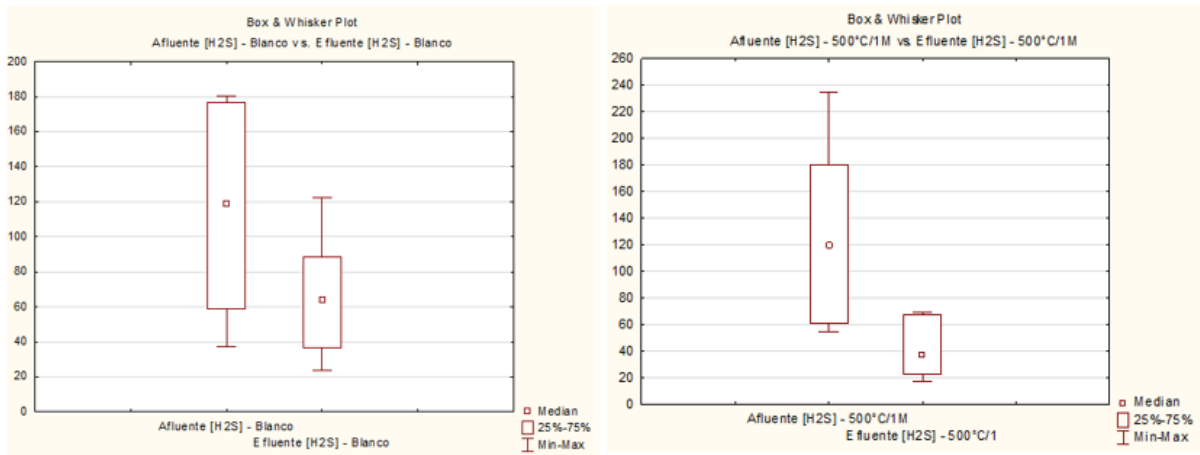


Figura 72. Diagrama de cajas de la remoción del H<sub>2</sub>S, del blanco y C.A TP 500

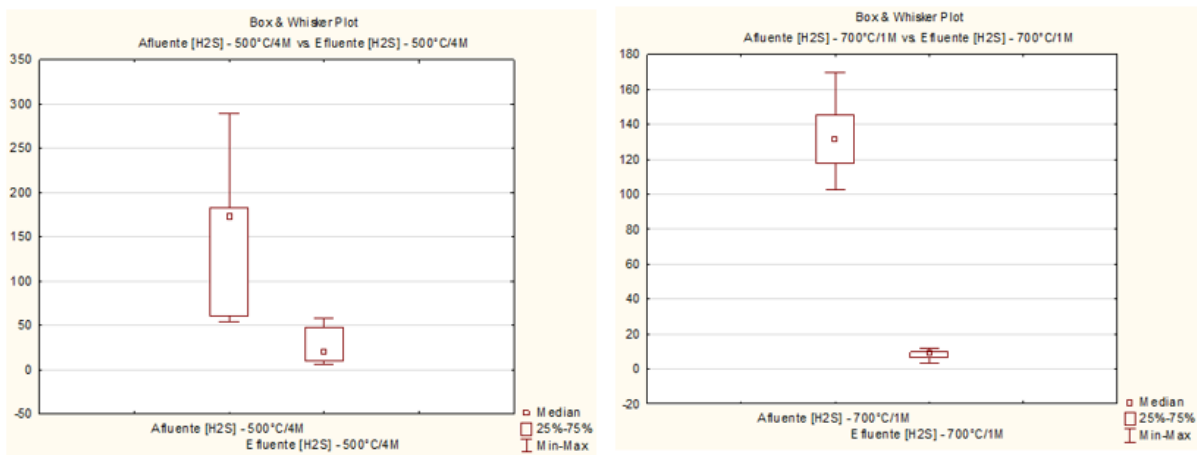


Figura 73. Diagrama de cajas de la remoción del H<sub>2</sub>S, del C.A TP 500 °C/ 4M KOH y CA TP 700 °C/1M

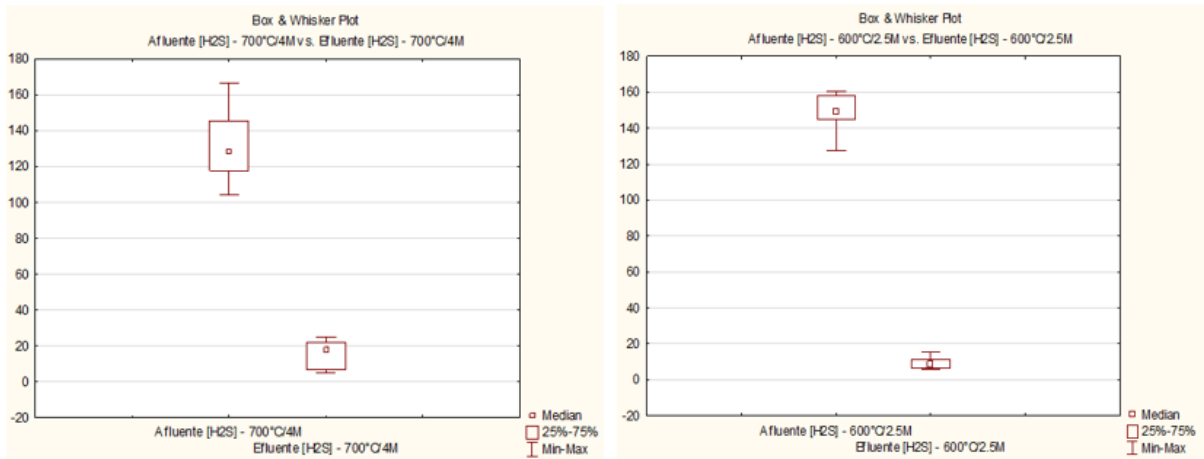


Figura 74. Diagrama de cajas de la remoción del H<sub>2</sub>S, afluente y efluente de cada torre de lecho fijo del C.A TP 700 °C/ 4M KOH y CA TP 600 °C/2.5M KOH

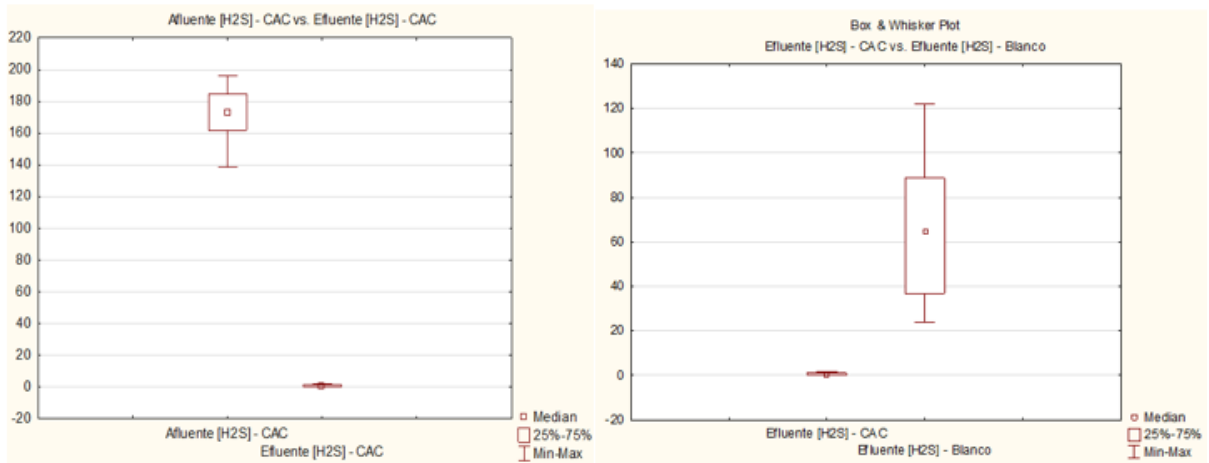


Figura 75. Diagrama de cajas de la remoción del H<sub>2</sub>S, afluente y efluente de cada torre de lecho fijo del Carbón Activo Comercial

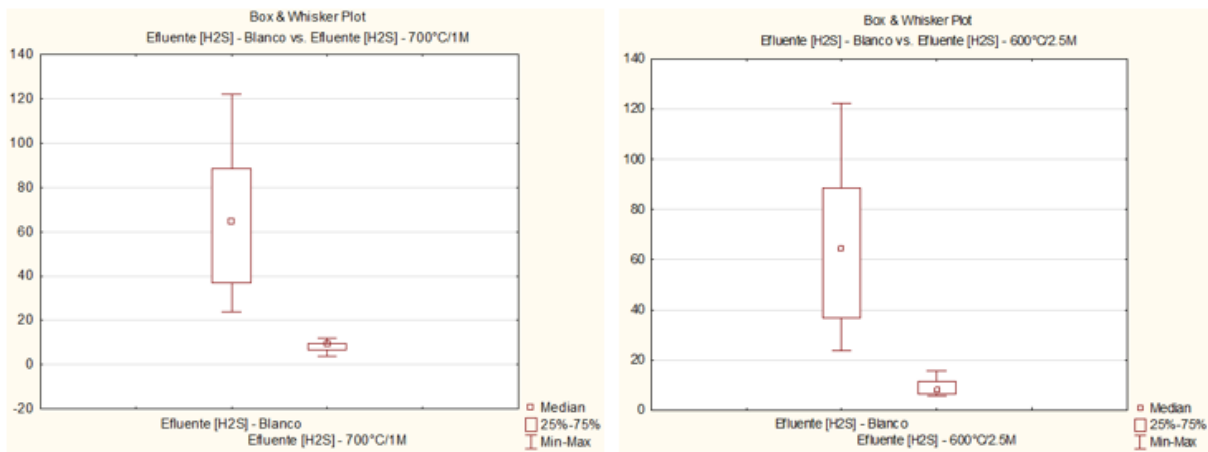


Figura 76. Comparativa de la eficiencia de adsorción del H<sub>2</sub>S del lodo sin tratamiento y C.A elaborado

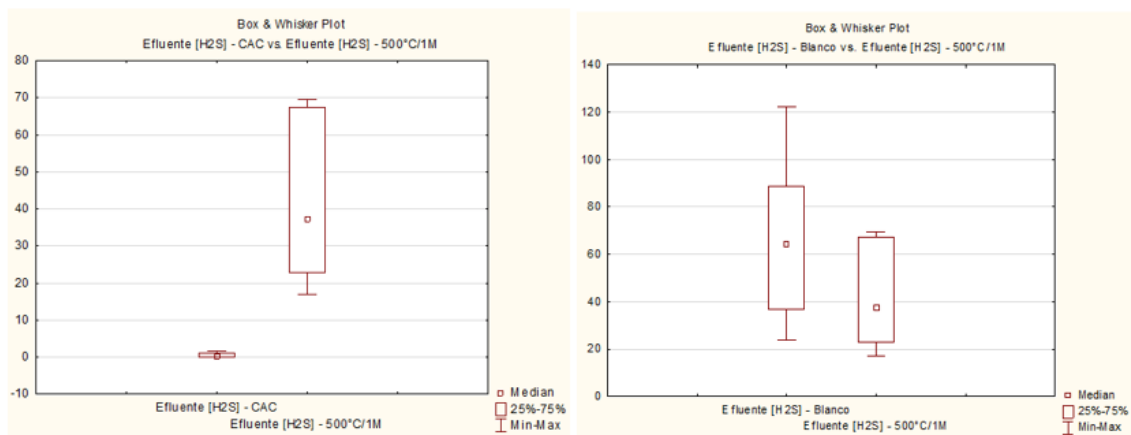


Figura 77. Eficiencias menores de adsorción del H<sub>2</sub>S del Blanco, C.A.C

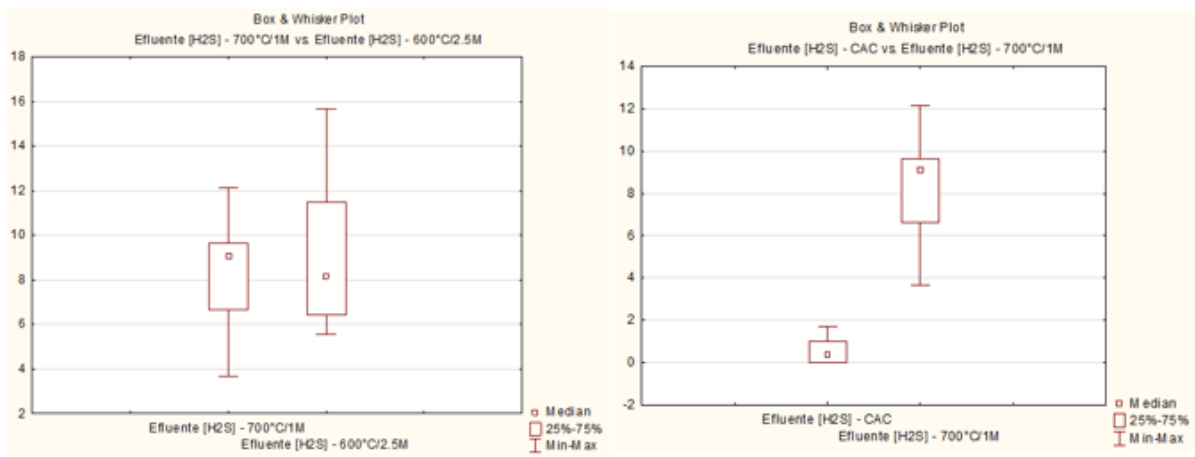


Figura 78. Eficiencias mayores de adsorción del H<sub>2</sub>S C.A comercial y el C.A regenerado

## 6.5. ANEXO V- Aplicación del Software “Matlab”

### APLICACIÓN DE MATLAB

#### 6.5.1 Códigos del Software

%Seudocódigo de MATLAB

```
function soledad
%PROGRAMA SOLEDAD TORRES
%qb= [(Qe.M) / (w.VM)] . [Co.Tb-C(t).Tb]
Co=input('Ingresa el valor de Co=');
Ct=input('Ingresa el valor de Ct=');
%qb= ((6.67*(10.^(-5))*34) ./ (36*22.4)) .* (Co*1200-Ct*1200);
qb= ((34*(6.67*(10.^(-5)))) ./ (36*22.4)) * (1200*Co-1200*Ct);
format long
disp('El resultado de la capacidad de absorción qb es=')
disp(qb)
```

%Seudocódigo de gráficos

```
%GRÁFICOS SOLEDAD
%GRÁFICO 1
E=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
qb=[0.1265,0.2760,0.6211,0.1380,0.2760,0.4831,0.3732,0.3448,0.3736,0.1296,0.1283];
plot(E,qb,'b','LineWidth',3)
grid on
xlabel('PRIMER ENSAYO','FontSize',15,'color','r')
```

```

ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g', 'FontSize', 12, 'color', 'r')
title('Carbón Activo a TP 500°C/1M
KOH', 'FontSize', 12, 'color', 'b')

```

```

X=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
Y=[0.1265,0.2760,0.6211,0.1380,0.2760,0.4831,0.3732,0.3448,0.3
736,0.1296,0.1283];
format long
lagran(X,Y)

```

```

x=1:0.05:11;
p1=-0.000000657214506*x.^10+0.000023789269180*x.^9-
0.000115191798942*x.^8- ...
0.007512358630952*x.^7+0.174961379050926*x.^6-
1.833466918402781*x.^5+...
10.949647162422806*x.^4+38.770219631283112*x.^3+78.72875730753
9581*x.^2-82.103074880952306*x+32.987499999999940;
plot(x,p1, 'b', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('ENSAYO', 'FontSize', 15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g', 'FontSize', 12, 'color', 'r')
title('Carbón Activo a TP 500°C/1M
KOH', 'FontSize', 12, 'color', 'b')

```

%GRÁFICO 2

```

E=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
qb=[0.322047848,0.161007051,0.460039429,0.161007051,0.36804504
2,0.781884795,0.426562381,0.514810848,0.531954336,0.466113893,
0.147980699];
plot(E,qb, 'm', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('SEGUNDO ENSAYO', 'FontSize', 15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g', 'FontSize', 12, 'color', 'r')
title('Carbón Activo a TP 500°C/4M
KOH', 'FontSize', 12, 'color', 'b')

```

```

X=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
Y=[0.322047848,0.161007051,0.460039429,0.161007051,0.368045042
,0.781884795,0.426562381,0.514810848,0.531954336,0.466113893,0
.147980699];
format long
lagran(X,Y)

```

```

x=1:0.05:11;
p2=1.0e+02*(-0.000000199589448*x.^10+0.000011765957794*x.^9-
0.000300620483042*x.^8+0.004364718468053*x.^7-...

```

```

0.039678539306294*x.^6+0.234621063992327*x.^5-
0.907863574449915*x.^4+2.253238989516739*x.^3-...
3.404228604396307*x.^2+2.799381841190089*x-
0.936326362420001);
plot(x,p2,'m','LineWidth',3)
grid on
xlabel('ENSAYOS','FontSize',15,'color','r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g','FontSize',12,'color','r')
title('Carbón Activo a TP 500°C/4M
KOH','FontSize',12,'color','b')

```

### %GRÁFICO 3

```

E=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
qb=[0.539176199,0.531954336,0.458588307,0.366863896,0.33018088
1,0.366863896,0.366863896,0.385222277,0.421905292,0.440229926,
0.460714369];
plot(E,qb,'-r','LineWidth',3)
grid on
xlabel('TERCER ENSAYO','FontSize',15,'color','r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g','FontSize',12,'color','r')
title('Carbón Activo a TP 700°C/1M
KOH','FontSize',12,'color','b')

```

```

X=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
Y=[0.539176199,0.531954336,0.458588307,0.366863896,0.330180881
,0.366863896,0.366863896,0.385222277,0.421905292,0.440229926,0
.460714369];
format long
lagran(X,Y)

```

```

x=1:0.05:11;
p3=-0.000001493711276*x.^10+0.000090069623753*x.^9-
0.002358644670172*x.^8+0.035175584251000*x.^7-...
0.329243540921106*x.^6+2.009792790785973*x.^5-
8.052820611195756*x.^4+20.773762507280139*x.^3-...
32.776668784001913*x.^2+28.227180349559433*x-
9.345732028000100;
plot(x,p3,'-r','LineWidth',3)
grid on
xlabel('ENSAYOS','FontSize',15,'color','r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g','FontSize',12,'color','r')
title('Carbón Activo a TP 700°C/1M
KOH','FontSize',12,'color','b')

```

### %GRÁFICO 4

```

E=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
qb=[0.513629702,0.476946688,0.431084482,0.348505515,0.32468011
6,0.311822500,0.366863896,0.403546911,0.421905292,0.357684705,
0.366863896];
plot(E,qb, '-g', 'LineWidth', 4)
grid on
xlabel('CUARTO ENSAYO', 'FontSize', 15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g', 'FontSize', 12, 'color', 'r')
title('Carbón Activo a TP 700°C/4M
KOH', 'FontSize', 12, 'color', 'b')

```

```

X=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
Y=[0.513629702,0.476946688,0.431084482,0.348505515,0.324680116
,0.311822500,0.366863896,0.403546911,0.421905292,0.357684705,0
.366863896];
format long
lagran(X,Y)

```

```

x=1:0.05:11;
p4=0.000002016479524*x.^10-
0.000121416979575*x.^9+0.003183921204076*x.^8-
0.047714625237467*x.^7+...
0.450655493188971*x.^6-
2.788895884194680*x.^5+11.381445818718333*x.^4-
29.999703954526012*x.^3+...
48.347129864408885*x.^2-
42.429517151062100*x+15.597165619999970;
plot(x,p4, '-g', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('ENSAYOS', 'FontSize', 15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g', 'FontSize', 12, 'color', 'r')
title('Carbón Activo a TP 700°C/4M
KOH', 'FontSize', 12, 'color', 'b')

```

### %GRÁFICO 5

```

E=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
qb=[0.464055324,0.491052943,0.48507972,0.459077638,0.479157118
,0.458757042,0.410515671,0.485535305,0.402973211,0.512988509,0
.469134251];
plot(E,qb, '-c', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('QUINTO ENSAYO', 'FontSize', 15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g', 'FontSize', 12, 'color', 'r')

```



```
title('Carbón Activo a TP 600°C/2.5M
KOH', 'FontSize', 12, 'color', 'b')
```

```
X=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
Y=[0.464055324,0.491052943,0.48507972,0.459077638,0.479157118,
0.458757042,0.410515671,0.485535305,0.402973211,0.512988509,0.
469134251];
format long
lagran(X,Y)
```

```
x=1:0.05:11;
p5=-0.000003106780507*x.^10+0.000177395325058*x.^9-
0.004387681116187*x.^8+0.061685579378026*x.^7-...
0.543742784365232*x.^6+3.126546885178314*x.^5-
11.820285266849169*x.^4+28.857294105456674*x.^3-...
43.257846288889255*x.^2+35.633918053662228*x-
11.589301567000035;
plot(x,p5, '-c', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('ENSAYOS', 'FontSize', 15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g', 'FontSize', 12, 'color', 'r')
title('Carbón Activo a TP 600°C/2.5M
KOH', 'FontSize', 12, 'color', 'b')
```

#### %GRÁFICO 6

```
E=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
qb=[0.4677000029762,0.5422134315476,0.2849936160714,0.66258906
54762,0.5811912440476,0.6190216577381,0.4619630089286,0.544508
2291667,0.5651276607143,0.6018106755952,0.6419358869048];
plot(E,qb, '-k', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('SEXTO ENSAYO', 'FontSize', 15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g', 'FontSize', 12, 'color', 'r')
title('Carbón Activo Comercial', 'FontSize', 12, 'color', 'b')
```

```
X=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
Y=[0.4677000029762,0.5422134315476,0.2849936160714,0.662589065
4762,0.5811912440476,0.6190216577381,0.4619630089286,0.5445082
291667,0.5651276607143,0.6018106755952,0.6419358869048];
format long
lagran(X,Y)
```

```
x=1:0.05:11;
p6=1.0e+02*(-0.000000148417900*x.^10+0.000009014219906*x.^9-
0.000238640081277*x.^8+...
```

```

0.003614420101567*x.^7-
0.034546297090190*x.^6+0.216660665092544*x.^5-
0.897351320482995*x.^4+...
2.403691647413100*x.^3-
3.940566158198950*x.^2+3.514175416015752*x-1.260771598541793);
plot(x,p6,'-k','LineWidth',3)
grid on
xlabel('ENSAYOS','FontSize',15,'color','r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g','FontSize',12,'color','r')
title('Carbón Activo Comercial','FontSize',12,'color','b')

```

### %GRÁFICO 7

```

E=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
qb=[0.045997193,0.126517592,0.391026765,0.080486652,0.14949931
5,0.230694655,0.230019714,0.226914988,0.183280086,0.039214042,
0.073467271];
plot(E,qb,'-y','LineWidth',3)
grid on
xlabel('SÉPTIMO ENSAYO','FontSize',15,'color','r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g','FontSize',12,'color','r')
title('Lodo Seco Residual proveniente de un
reactor','FontSize',12,'color','b')

```

```

X=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11];
Y=[0.045997193,0.126517592,0.391026765,0.080486652,0.149499315
,0.230694655,0.230019714,0.226914988,0.183280086,0.039214042,0
.073467271];
format long
lagran(X,Y)

```

```

x7=1:0.05:11;
p7=1.0e+02*(0.000000024751165*x.^10-
0.000001602601370*x.^9+0.000045471410081*x.^8-
0.000741615188519*x.^7+...
0.007661295176906*x.^6-
0.052047808165130*x.^5+0.233517759281855*x.^4-
0.675564620633192*x.^3+...
1.187712666684992*x.^2-
1.121942855656788*x+0.421821256869999);
plot(x7,p7,'-y','LineWidth',3)
grid on
xlabel('ENSAYOS','FontSize',15,'color','r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g','FontSize',12,'color','r')

```

```
title('Lodo Seco Residual proveniente de un reactor', 'FontSize',12, 'color', 'b')
```

```
%USANDO COMANDO SUBPLOT
```

```
subplot(2,3,1)
x=1:0.05:11;
p1=-0.000000657214506*x.^10+0.000023789269180*x.^9-
0.000115191798942*x.^8- ...
0.0007512358630952*x.^7+0.174961379050926*x.^6-
1.833466918402781*x.^5+...
10.949647162422806*x.^4+38.770219631283112*x.^3+78.72875730753
9581*x.^2-82.103074880952306*x+32.987499999999940;
plot(x,p1, 'b', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('ENSAYOS', 'FontSize',15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg H2S/g', 'FontSize',6, 'color', 'r')
title('Carbón Activo a TP 500°C/1M KOH', 'FontSize',12, 'color', 'b')
```

```
subplot(2,3,1)
x=1:0.05:11;
p2=1.0e+02*(-0.000000199589448*x.^10+0.000011765957794*x.^9-
0.000300620483042*x.^8+0.004364718468053*x.^7-...
0.039678539306294*x.^6+0.234621063992327*x.^5-
0.907863574449915*x.^4+2.253238989516739*x.^3-...
3.404228604396307*x.^2+2.799381841190089*x-
0.936326362420001);
plot(x,p2, 'm', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('ENSAYOS', 'FontSize',15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg H2S/g', 'FontSize',8, 'color', 'r')
title('Carbón Activo a TP 500°C/4M KOH', 'FontSize',12, 'color', 'b')
```

```
subplot(2,3,2)
x=1:0.05:11;
p3=-0.000001493711276*x.^10+0.000090069623753*x.^9-
0.002358644670172*x.^8+0.035175584251000*x.^7-...
0.329243540921106*x.^6+2.009792790785973*x.^5-
8.052820611195756*x.^4+20.773762507280139*x.^3-...
32.776668784001913*x.^2+28.227180349559433*x-
9.345732028000100;
plot(x,p3, '-r', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('ENSAYOS', 'FontSize',15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg H2S/g', 'FontSize',8, 'color', 'r')
```

```

title('Carbón Activo a TP 700°C/1M
KOH', 'FontSize', 12, 'color', 'b')
subplot(2,3,3)
x=1:0.05:11;
p4=0.000002016479524*x.^10-
0.000121416979575*x.^9+0.003183921204076*x.^8-
0.047714625237467*x.^7+...
0.450655493188971*x.^6-
2.788895884194680*x.^5+11.381445818718333*x.^4-
29.999703954526012*x.^3+...
48.347129864408885*x.^2-
42.429517151062100*x+15.597165619999970;
plot(x,p4, '-g', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('ENSAYOS', 'FontSize', 15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g', 'FontSize', 8, 'color', 'r')
title('Carbón Activo a TP 700°C/4M
KOH', 'FontSize', 12, 'color', 'b')
subplot(2,3,4)
x=1:0.05:11;
p5=-0.000003106780507*x.^10+0.000177395325058*x.^9-
0.004387681116187*x.^8+0.061685579378026*x.^7-...
0.543742784365232*x.^6+3.126546885178314*x.^5-
11.820285266849169*x.^4+28.857294105456674*x.^3-...
43.257846288889255*x.^2+35.633918053662228*x-
11.589301567000035;
plot(x,p5, '-c', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('ENSAYOS', 'FontSize', 15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g', 'FontSize', 8, 'color', 'r')
title('Carbón Activo a TP 600°C/2.5M
KOH', 'FontSize', 12, 'color', 'b')
subplot(2,3,5)
x=1:0.05:11;
p6=1.0e+02*(-0.000000148417900*x.^10+0.000009014219906*x.^9-
0.000238640081277*x.^8+...
0.003614420101567*x.^7-
0.034546297090190*x.^6+0.216660665092544*x.^5-
0.897351320482995*x.^4+...
2.403691647413100*x.^3-
3.940566158198950*x.^2+3.514175416015752*x-1.260771598541793);
plot(x,p6, '-k', 'LineWidth', 3)
grid on
xlabel('ENSAYOS', 'FontSize', 15, 'color', 'r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g', 'FontSize', 8, 'color', 'r')
title('Carbón Activo Comercial', 'FontSize', 12, 'color', 'b')

```

```

subplot(2,3,6)
x7=1:0.05:11;
p7=1.0e+02*(0.000000024751165*x.^10-
0.000001602601370*x.^9+0.000045471410081*x.^8-
0.000741615188519*x.^7+...
    0.007661295176906*x.^6-
0.052047808165130*x.^5+0.233517759281855*x.^4-
0.675564620633192*x.^3+...
    1.187712666684992*x.^2-
1.121942855656788*x+0.421821256869999);
plot(x7,p7,'-y','LineWidth',3)
grid on
xlabel('ENSAYOS','FontSize',15,'color','r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g','FontSize',8,'color','r')
title('Lodo Seco Residual proveniente de un
reactor','FontSize',12,'color','b')

```

%TODOS EN UNO 1,2,4 y 5

```

x=1:0.05:11;
p1=-0.000000657214506*x.^10+0.000023789269180*x.^9-
0.000115191798942*x.^8- ...
0.0007512358630952*x.^7+0.174961379050926*x.^6-
1.833466918402781*x.^5+...
10.949647162422806*x.^4+38.770219631283112*x.^3+78.72875730753
9581*x.^2-82.103074880952306*x+32.987499999999940;
plot(x,p1,'b','LineWidth',3)
hold on
p2=1.0e+02*(-0.000000199589448*x.^10+0.000011765957794*x.^9-
0.000300620483042*x.^8+0.004364718468053*x.^7-...
    0.039678539306294*x.^6+0.234621063992327*x.^5-
0.907863574449915*x.^4+2.253238989516739*x.^3-...
    3.404228604396307*x.^2+2.799381841190089*x-
0.936326362420001);
p3=-0.000001493711276*x.^10+0.000090069623753*x.^9-
0.002358644670172*x.^8+0.035175584251000*x.^7-...
    0.329243540921106*x.^6+2.009792790785973*x.^5-
8.052820611195756*x.^4+20.773762507280139*x.^3-...
    32.776668784001913*x.^2+28.227180349559433*x-
9.345732028000100;
p4=0.000002016479524*x.^10-
0.000121416979575*x.^9+0.003183921204076*x.^8-
0.047714625237467*x.^7+...
    0.450655493188971*x.^6-
2.788895884194680*x.^5+11.381445818718333*x.^4-
29.999703954526012*x.^3+...

```

```

48.347129864408885*x.^2-
42.429517151062100*x+15.597165619999970;
p5=-0.000003106780507*x.^10+0.000177395325058*x.^9-
0.004387681116187*x.^8+0.061685579378026*x.^7-...
0.543742784365232*x.^6+3.126546885178314*x.^5-
11.820285266849169*x.^4+28.857294105456674*x.^3-...
43.257846288889255*x.^2+35.633918053662228*x-
11.589301567000035;
plot(x,p2,'m','LineWidth',3)
plot(x,p3,'-r','LineWidth',3)
plot(x,p4,'-g','LineWidth',3)
plot(x,p5,'-c','LineWidth',3)
grid on
xlabel('ENSAYOS','FontSize',15,'color','r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN mg
H2S/g','FontSize',12,'color','r')
title('Carbón Activos obtenidos','FontSize',12,'color','b')

```

% ACA SIN EL NUNO

```

x=1:0.05:11;
p2=1.0e+02*(-0.000000199589448*x.^10+0.000011765957794*x.^9-
0.000300620483042*x.^8+0.004364718468053*x.^7-...
0.039678539306294*x.^6+0.234621063992327*x.^5-
0.907863574449915*x.^4+2.253238989516739*x.^3-...
3.404228604396307*x.^2+2.799381841190089*x-
0.936326362420001);
plot(x,p2,'m','LineWidth',3)
hold on
p3=-0.000001493711276*x.^10+0.000090069623753*x.^9-
0.002358644670172*x.^8+0.035175584251000*x.^7-...
0.329243540921106*x.^6+2.009792790785973*x.^5-
8.052820611195756*x.^4+20.773762507280139*x.^3-...
32.776668784001913*x.^2+28.227180349559433*x-
9.345732028000100;
p4=0.000002016479524*x.^10-
0.000121416979575*x.^9+0.003183921204076*x.^8-
0.047714625237467*x.^7+...
0.450655493188971*x.^6-
2.788895884194680*x.^5+11.381445818718333*x.^4-
29.999703954526012*x.^3+...
48.347129864408885*x.^2-
42.429517151062100*x+15.597165619999970;
p5=-0.000003106780507*x.^10+0.000177395325058*x.^9-
0.004387681116187*x.^8+0.061685579378026*x.^7-...
0.543742784365232*x.^6+3.126546885178314*x.^5-
11.820285266849169*x.^4+28.857294105456674*x.^3-...

```

```

43.257846288889255*x.^2+35.633918053662228*x-
11.589301567000035;
plot(x,p3,'-r','LineWidth',3)
plot(x,p4,'-g','LineWidth',3)
plot(x,p5,'-c','LineWidth',3)
grid on
xlabel('ENSAYOS','FontSize',15,'color','r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN DE H2S/g','FontSize',12,'color','r')
title('Carbón Activos obtenidos','FontSize',12,'color','b')

```

```
%GRÁFICO 6 y 7 y 3
```

```

x=1:0.05:11;
p6=1.0e+02*(-0.000000148417900*x.^10+0.000009014219906*x.^9-
0.000238640081277*x.^8+...
0.003614420101567*x.^7-
0.034546297090190*x.^6+0.216660665092544*x.^5-
0.897351320482995*x.^4+...
2.403691647413100*x.^3-
3.940566158198950*x.^2+3.514175416015752*x-1.260771598541793);
plot(x,p6,'-k','LineWidth',3)
hold on
p7=1.0e+02*(0.000000024751165*x.^10-
0.000001602601370*x.^9+0.000045471410081*x.^8-
0.000741615188519*x.^7+...
0.007661295176906*x.^6-
0.052047808165130*x.^5+0.233517759281855*x.^4-
0.675564620633192*x.^3+...
1.187712666684992*x.^2-
1.121942855656788*x+0.421821256869999);
p3=-0.000001493711276*x.^10+0.000090069623753*x.^9-
0.002358644670172*x.^8+0.035175584251000*x.^7-...
0.329243540921106*x.^6+2.009792790785973*x.^5-
8.052820611195756*x.^4+20.773762507280139*x.^3-...
32.776668784001913*x.^2+28.227180349559433*x-
9.345732028000100;
plot(x7,p7,'-y','LineWidth',3)
plot(x,p3,'-r','LineWidth',3)
xlabel('ENSAYOS','FontSize',15,'color','r')
ylabel('CAPACIDAD DE ODSORCIÓN DE H2S/g','FontSize',12,'color','r')
title('Carbón Activo Comercial,Lodo Seco y C.A 700°C/1M','FontSize',12,'color','b')
grid on

```

## 6.5.2 Gráficas de la capacidad de adsorción de cada carbón activo

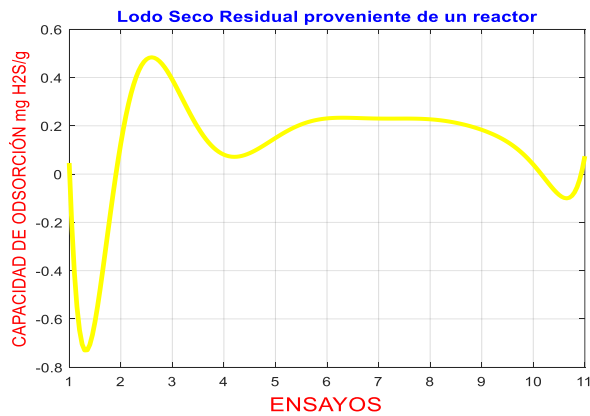
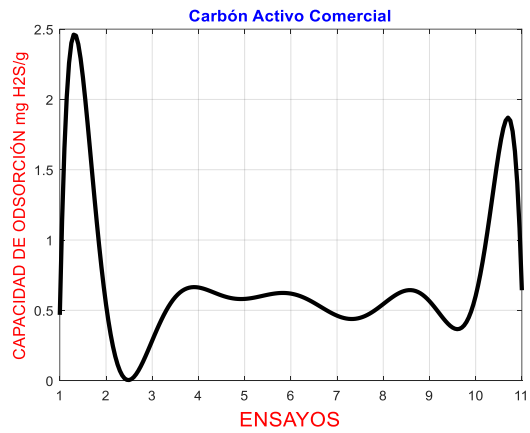
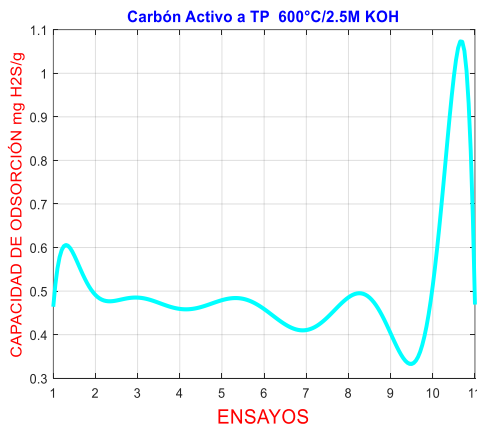
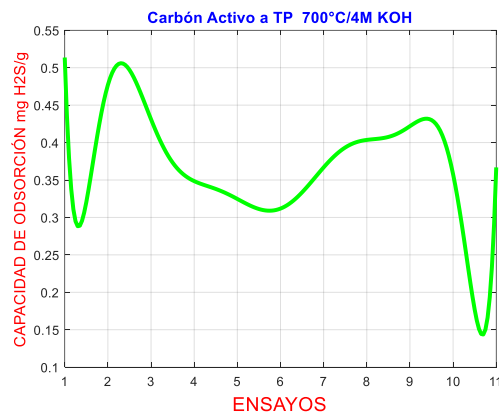
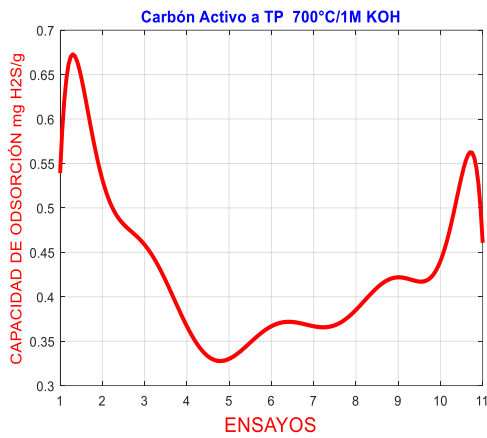
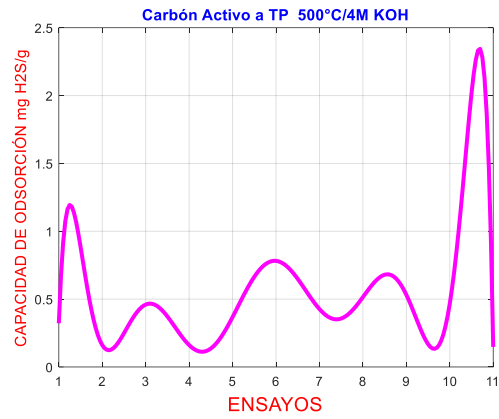
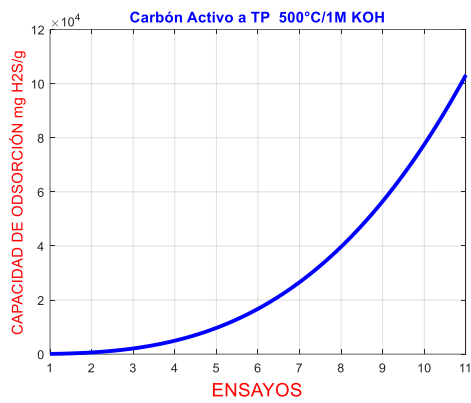




Tabla 50

Capacidad de Adsorción del CA TP 500 °C/ 1M KOH

Temperatura Pirolización (°C)	[ ] Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente(ppm)	Efluente (ppm) (Ct)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)= (Qe)	Tb (s)	M (peso molecular H <sub>2</sub> S)	(volumen molar)	W (peso del material adsorbente) gr.	Capacidad de Adsorción (mgH <sub>2</sub> S/g ads)
500	1 M	1	54.53	17.04	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.12650
		2	119.28	37.49	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.27600
		3	235.16	51.12	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.62110
		4	64.75	23.86	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.13800
		5	119.28	37.49	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.27602
		6	211.30	68.16	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.48305
		7	168.00	57.40	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.37324
		8	169.51	67.34	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.34479
		9	180.20	69.50	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.37358
		10	60.85	22.46	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.12955
		11	60.86	22.84	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.12831
<b>PROMEDIO TOTAL</b>										<b>0.29729</b>

Tabla 51

Capacidad de Adsorción del CA TP 500 °C/ 4 M KOH

Temperatura Pirolizacion (°C)	□ Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente(ppm)	Efluente (ppm) (Ct)	Caudal (m3/s)= (Qe)	Tb (s)	M (peso molecular H2S)	(volumen molar)	W (peso del material adsorbente) gr.	Capacidad de Adsorcion (mgH2S/g ads)
500	4 M	1	112.47	17.04	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.32205
		2	54.53	6.82	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.16101
		3	194.26	57.94	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.46004
		4	54.53	6.82	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.16101
		5	119.28	10.22	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.36805
		6	289.69	58.00	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.78188
		7	174.00	47.60	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.42656
		8	173.00	20.45	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.51481
		9	183.63	26.00	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.53195
		10	173.00	34.88	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.46611
		11	60.89	17.04	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.14798
<b>PROMEDIO TOTAL</b>										<b>0.39468</b>

Tabla 52

Capacidad de Adsorción del CA TP 700 °C/ 1 M KOH

Temperatura Pirolizacion (°C)	Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente (ppm)	Efluente (ppm) (Ct)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)= (Qe)	Tb (s)	M (peso molecular H <sub>2</sub> S)	(volumen molar)	W (peso del material adsorbente) gr.	Capacidad de Adsorción (mgH <sub>2</sub> S/g ads)
700	1 M	1	169.77	10.00	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.53918
		2	166.31	8.68	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.53195
		3	145.52	9.63	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.45859
		4	117.80	9.09	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.36686
		5	102.56	4.72	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.33018
		6	117.80	9.09	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.36686
		7	117.80	9.09	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.36686
		8	117.80	3.65	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.38522
		9	131.66	6.64	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.42191
		10	138.59	8.14	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.44023
		11	145.52	9.00	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.46071
<b>PROMEDIO TOTAL</b>										<b>0.42441</b>

Tabla 53

Capacidad de Adsorción del CA TP 700 °C/ [4M] KOH

Temperatura Pirolización (°C)	[ ] Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente(ppm)	Efluente (ppm) (Ct)	Caudal (m3/s)= (Qe)	Tb (s)	M (peso molecular H2S)	(volumen molar)	W (peso del material adsorbente) gr.	Capacidad de Adsorción (mgH2S/g ads)
700	4 M	1	166.31	14.11	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.51363
		2	166.31	24.98	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.47695
		3	145.52	17.78	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.43108
		4	128.19	24.92	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.34851
		5	117.80	21.59	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.32468
		6	103.94	11.54	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.31182
		7	114.34	5.63	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.36686
		8	124.73	5.15	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.40355
		9	131.66	6.64	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.42191
		10	128.19	22.20	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.35768
		11	128.19	19.48	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.36686
<b>PROMEDIO TOTAL</b>										<b>0.39305</b>

Tabla 54

Capacidad de Adsorción del CA TP 600 °C/ 2.5 M KOH

Temperatura Pirolización (°C)	[ ] Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente(ppm)	Efluente (ppm) (Ct)	Caudal (m3/s)= (Qe)	Tb (s)	M (peso molecular H2S)	(volumen molar)	W (peso del material adsorbente) gr.	Capacidad de Adsorción (mgH2S/g ads)
600	2.5 M	1	159.38	9.90	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.50445
		2	159.38	18.05	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.47695
		3	145.52	20.50	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.42191
		4	110.87	7.60	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.34851
		5	103.94	6.10	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.33018
		6	110.87	8.00	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.34716
		7	117.80	4.02	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.38397
		8	128.19	3.18	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.42187
		9	128.19	6.20	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.41168
		10	131.66	2.50	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.43588
		11	117.80	3.65	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.38522
<b>PROMEDIO TOTAL</b>										<b>0.40616</b>

Tabla 55

Capacidad de Adsorción del CA TP 600 °C/ 2.5 M KOH

Temperatura Pirolización (°C)	□ Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente(ppm)	Efluente (ppm) (Ct)	Caudal (m3/s)= (Qe)	Tb (s)	M (peso molecular H2S)	(volumen molar)	W (peso del material adsorbente) gr.	Capacidad de Adsorción (mgH2S/g ads)
600	2.5 M	1	138.59	13.05	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.42366
		2	161.69	12.00	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.50516
		3	173.24	10.78	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.54825
		4	179.01	10.21	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.56965
		5	196.34	10.21	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.62813
		6	179.01	10.00	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.57036
		7	138.59	9.08	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.43706
		8	173.24	10.50	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.54920
		9	127.04	10.21	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.39427
		10	184.79	9.93	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.59010
		11	173.24	9.36	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.55305
<b>PROMEDIO TOTAL</b>										<b>0.52444</b>

Tabla 56

*Capacidad de Adsorción del Carbón Activo Comercial*

Temperatura Pirolización (°C)	□ Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente(ppm)	Efluente (ppm) (Ct)	Caudal (m3/s)= (Qe)	Tb (s)	M (peso molecular H2S)	(volumen molar)	W (peso del material adsorbente) gr.	Capacidad de Adsorción (mgH2S/g ads)
Carbón Activo Comercial		1	138.59	0	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.4677
		2	161.69	1.02	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.54221
		3	184.79	0.34	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.28499
		4	196.34	0	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.66259
		5	173.24	1.02	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.58119
		6	184.79	1.36	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.61902
		7	138.59	1.7	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.46196
		8	161.69	0.34	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.54451
		9	167.46	0	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.56513
		10	179.01	0.68	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.60181
		11	190.56	0.34	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.64194
<b>PROMEDIO TOTAL</b>										<b>0.543</b>

Tabla 57

Capacidad de Adsorción del Blanco (Lodo seco residual proveniente de un reactor UASB)

Temperatura Pirolización (°C)	□ Agente Activante KOH	Ensayos	Afluente(ppm)	Efluente (ppm) (Ct)	Caudal (m3/s)= (Qe)	Tb (s)	M (peso molecular H2S)	(volumen molar)	W (peso del material adsorbente) gr.	Capacidad de Adsorción (mgH2S/g ads)
<b>Blanco (Lodo seco residual proveniente de un reactor UASB)</b>		1	37.49	23.86	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.04600
		2	102.24	64.75	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.12652
		3	177.22	61.35	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.39103
		4	64.75	40.90	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.08049
		5	119.28	74.98	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.14950
		6	153.36	85.00	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.23069
		7	156.77	88.61	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.23002
		8	180.10	112.86	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.22691
		9	176.50	122.19	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.18328
		10	46.50	34.88	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.03921
		11	58.60	36.83	6.67E-05	1200	34 mg/mmol	22.4 ml/mmol	36	0.07347
<b>PROMEDIO TOTAL</b>										<b>0.16156</b>



## 6.6. ANEXO VI-Operación y Mantenimiento, Documentaciones y Planos

### Materiales y Equipos

Tabla 58

*Materiales y equipos para la generación y almacén del H<sub>2</sub>S*

N°	Material y/o equipos	Cantidad
1	Tanque de 20 l	1
2	Soporte de madera	1
3	Válvula de ½ pulgada	4
4	Matraz de 2 litros	1
5	Caja de guantes (100 unidades)	2
6	Alcohol (botella de litro)	1
7	Probeta de 100 ml	1
8	Probeta de 1000 ml	1
9	Materiales de escritorio	1
10	Tapón horadados	1
11	Agitador manual	1
Reactivos		
1	Sulfuro de hierro	150 g
2	Ácido clorhídrico [ ] 7 %	5 litros

Tabla 59

*Materiales y/o equipos y reactivos para la determinación del H<sub>2</sub>S*

N°	Materiales y/o reactivos	Cantidad
1	Válvulas de ½ pulgada	2
2	Válvulas de apertura	1
3	Soporte Universal	1
4	Pipeta Graduada de 100 ml	1
5	Vasos precipitados de 20 ml	6
6	Embudo de 75 ml	1

7	Papel parafil	
8	Vasos precipitados de 125 ml	3
9	Agua destilada	
Reactivos		
1	Tiosulfato de sodio estandarizado ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) al 0.01 M	1 ½ l
2	Disolución de Iodo Molecular ( $\text{I}_2$ ) 0.0025	1 l
3	Yoduro de potasio (KI)	10 g
4	Iodo molecular ( $\text{I}_2$ )	5 g
5	Disolución de ácido Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 1 M	1 1/2 l
6	Disolución de almidón al 0.4 %	100 ml

Tabla 60

*Implementación de las Torres de lecho fijo*

N°	Materiales y/o equipos	Cantidad
1	Tapones de 3" de material acrílico	10
2	Manguera de ½ pulgada (m)	10
3	Recipiente de acrílico de 3 mm espesor	6
4	Carbón activo (g)	300 g
5	Flujómetro	1
6	Válvulas de ½ pulgada	12
7	Abrazaderas de metal	50
8	Te ¼	6
9	Pegamento para tuberías	1
10	Pizón escamado ¼	6
11	Soporte de las torres de lecho fijo	1

Tabla 61

*Materiales para la obtención del medio adsorbente*

N°	Materiales	Cantidad
1	Manómetro	6
2	Pisetas	2
3	Papel filtro	
4	Tamiz 30 mm	2
5	Embudos 90 ml	6
6	Vasos precipitados 100 ml	6
7	Vagueta	2
8	Agua destilada (litros)	50 l
9	Probetas 100 ml	3
10	Bolsas herméticas	
11	Matraz Erlenmeyer 500 ml	6
12	Papel aluminio	
13	Crisoles 100 g	30
14	Soportes metálicos	3
15	Morteros	3
16	Fiolas de 1000 ml, 250 ml y 500 ml	1
17	Cucharillas	2
18	Espátulas	3
Equipos		
1	Agitador magnético	1
2	Mufla	1
3	Estufa	60
4	pH metro	5
5	Balanza analítica	1
6	Extractor de gases	1
Reactivos		
1	KOH a concentraciones diferentes como muestra la tabla 19 (litros)	1 kg
2	HCl al 5 % (l)	2 litros

### 6.6.1 Operación y Mantenimiento

Se conectará la manguera de conducción de biogás de salida a la válvula del colector de gases, bomba de succión y este a la vez a la conexión de las torres de lecho fijo.

-Seguido a ello se apertura la válvula de paso de la salida del biogás así mismo en la manguera en conexión a las torres de lecho fijo.

-Luego se abrirá la válvula de apertura 2 para el ingreso de biogás a las torres de lecho fijo, asimismo se encenderá el extractor de gases para permitir el paso de biogás con mayor velocidad y flujo.

Tabla 62

*Operación del Sistema de Adsorción del sulfuro de hidrógeno*

<b>DÍA</b>	<b>HORA</b>	<b>ACTIVIDAD</b>
LUNES	9:00 am	Apertura de la válvula del sistema de almacén para cada prueba a realizar
	3:00 pm	Cierre de válvula del sistema de almacén
MARTES	9:00 am	Apertura de la válvula del sistema de almacén para cada prueba a realizar
	3:00 pm	Cierre de válvula del sistema de almacén
MIERCOLES	9:00 am	Apertura de la válvula del sistema de almacén para cada prueba a realizar
	3:00 pm	Cierre de válvula del sistema de almacén
JUEVES	9:00 am	Apertura de la válvula del sistema de almacén para cada prueba a realizar
	3:00 pm	Cierre de válvula del sistema de almacén

Tabla 63

*Frecuencia de Monitoreo*

<b>Parámetro</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Hora</b>	<b>Periodo</b>
Concentración de H <sub>2</sub> S- en el afluente	Lunes-Viernes	9:00 am-4:00 pm	10 ensayos para cada tratamiento
Concentración de H <sub>2</sub> S- en el efluente	Lunes-Viernes	9:00 am-4:00 pm	10 ensayos para cada tratamiento
T° Ambiental	Lunes-Viernes	9:00 am-4:00 pm	10 ensayos para cada tratamiento

## 6.6.2 Documentaciones

### -Certificado del Reactivo Activante (KOH)

# Certificado de Aprobación



**CERPER**  
CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A.

Otorgado a:

**CIMATEC S.A.C.**  
Av. Venezuela N° 2392 – Cercado de Lima  
LIMA-PERÚ

CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A.  
Ha registrado que el Sistema de Gestión de la Calidad de la organización a la que hace referencia este documento, cumple satisfactoriamente con los requisitos de la Norma:

**ISO 9001:2015**

Para el siguiente alcance:

**"Comercialización de equipos, materiales y reactivos no refrigerados para laboratorios, que incluye los servicios de capacitación, entrenamiento y servicio técnico de equipos"**  
Escala(s) aplicable(s): 7.1.5, 8.5 y 8.5.1 (f)

Fecha de aprobación: octubre 19, 2017  
Este certificado es válido desde: octubre 19, 2017  
Hasta: octubre 18, 2020  
Certificado por CERPER desde octubre 19, 2017.



**CERTIFICACIÓN**  
Sistema de Gestión  
ISO 9001



**INACAL**  
DA - Perú  
Certificado de  
Registro de Gestión  
Acreditada  
Registro N°00381 - (02)



Miguel Cailloux Campbell  
Gerente General Adjunto

**Certificado N° 012/2017**  
OCS-B-CR/Versión 07/2016-01-22

Av. Santa Rosa 601, La Perla Callao



Management Service

# CERTIFICATE

The Certification Body  
 of TÜV SÜD Management Service GmbH  
 certifies that

**Scharlab, S.L.**  
 Pol. Ind. Mas d'en Cisa - C/ Gato Pérez, 33  
 08181 Sentmenat (Barcelona)  
 Spain

Scope of application:

Distribution of laboratory chemicals, culture media,  
 reagents, kits and general material for analysis, health & safety  
 and environmental material and equipment,  
 general laboratory equipment

**Ctra. Polinyà-Sentmenat km 8,2**  
 08181 Sentmenat (Barcelona)  
 Spain

Scope of application:

Design and manufacturing  
 of laboratory chemicals

has established and applies  
 a Quality Management System.

An audit was performed, Report No. 70792287.

Proof has been furnished that the requirements  
 according to

## ISO 9001:2015

are fulfilled.

The certificate is valid from 2018-02-09 until 2021-02-08.

Certificate Registration No.: 12 100 42917 TMS.

Product Compliance Management  
 Munich, 2018-01-09





## Scharlab S.L.

Tel. int.: +34-93-7151811

Email: [scharlab@scharlab.com](mailto:scharlab@scharlab.com)

### CERTIFICATE OF ANALYSIS

Product: Potassium hydroxide, pellets, reagent grade, ACS, Batch 16890302  
PO0275 ISO, Reag. Ph Eur Quality release date 15/01/2018  
Expiry date 1/2021

Analysis	Batch value	Specifications
assay (acidimetric)	86,23 %	min. 85 %
identity	passes test	passes test
appearance of solution	passes test	passes test
carbonates (as K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	0,2 %	max. 1,0 %
chlorides (Cl)	< 0,0005 %	max. 0,0005 %
phosphates (as PO <sub>4</sub> )	< 0,0005 %	max. 0,0005 %
silicates (SiO <sub>2</sub> )	< 0,002 %	max. 0,002 %
sulfates (SO <sub>4</sub> ) .....	< 0,0005 %	max. 0,0005 %
ammonium hydroxide precipitate	< 0,02 %	max. 0,02 %
total nitrogen (as N)	< 0,0003 %	max. 0,0003 %
aluminium (Al)	< 0,0002 %	max. 0,0002 %
cadmium (Cd)	< 0,00001 %	max. 0,00001 %
calcium (Ca)	< 0,0005 %	max. 0,0005 %
copper (Cu)	< 0,0001 %	max. 0,0001 %
heavy metals (as Pb)	< 0,001 %	max. 0,001 %
iron (Fe)	< 0,0003 %	max. 0,0005 %
lead (Pb)	< 0,0001 %	max. 0,0001 %
magnesium (Mg)	< 0,0005 %	max. 0,0005 %
manganese (Mn)	< 0,00005 %	max. 0,00005 %
nickel (Ni)	< 0,0001 %	max. 0,0001 %
sodium (Na)	< 0,05 %	max. 0,05 %
zinc (Zn)	< 0,0001 %	max. 0,0001 %

This certificate does not release the user from their control upon receipt of the goods  
You can get a copy of any of our COA from our web site: [www.scharlab.com](http://www.scharlab.com)

M. Canet  
Laboratory Manager

**SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa**

- 1.1 Identificador del producto
- Nombre comercial: Potasio hidróxido, lentejas, para análisis, ACB, ISO, Reag. Ph Eur
- Número del artículo: PQ0275
- Número CAS: 1310-58-3
- Número CE: 215-181-3
- Número de clasificación: 019-002-00-8
- Número de registro 01-2119487136-33-XXXX
- 1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados  
No existen más datos relevantes disponibles.
- Utilización del producto / de la elaboración: Reactivo de laboratorio
- 1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad
- Fabricante/distribuidor:  
Scharlab, S.L.  
C/Gato Pérez, 33. Pol.Ind. Mas d'en Gisa  
08181 Sentmenat (Barcelona) SPAIN  
Tel: (+34) 93 745 64 00 - FAX: (+34) 93 715 27 65  
email: scharlab@scharlab.com  
Internet Web Site: www.scharlab.com
- Representante regional:  
Scharlab, S.L.  
C/Gato Pérez, 33. Pol.Ind. Mas d'en Gisa  
08181 Sentmenat (Barcelona) ESPAÑA.  
Tel: (+34) 93 745 64 00 - FAX: (+34) 93 715 27 65  
email: scharlab@scharlab.com  
Internet Web Site: www.scharlab.com
- Área de información: Departamento técnico
- 1.4 Teléfono de emergencia: Scharlab, S.L. (+34) 93 715 18 11

**SECCIÓN 2: Identificación de los peligros**

- 2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla
- Clasificación con arreglo al Reglamento (CE) n° 1272/2008



GH305 corrosión

Skin Corr. 1A, H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.



GH307

Acute Tox. 4 H302 Nocivo en caso de ingestión.

- 2.2 Elementos de la etiqueta
- Etiquetado con arreglo al Reglamento (CE) n° 1272/2008

La sustancia se ha clasificado y etiquetado de conformidad con el reglamento CLP.

(continúa en la página 2)



fecha de impresión 07.07.2017

Revisión: 07.07.2017

Nombre comercial: Potasio hidróxido, lentejas, para análisis, ACS, ISO, Reag. Ph Eur

( viene de la página 1 )

## - Pictogramas de peligro



GHS05 GHS07

## - Palabra de advertencia Peligro

## - Indicaciones de peligro

H302 Nocivo en caso de ingestión.

H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.

## - Consejos de prudencia

P260 No respirar polvos o nieblas.

P303+P361+P353 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua/ducharse.

P305+P351+P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.

P310 Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA/médico.

P405 Guardar bajo llave.

P501 Eliminar el contenido o el recipiente conforme a la reglamentación local/regional/nacional/internacional.

## - 2.3 Otros peligros

## - Resultados de la valoración PBT y mPmB

- PBT: No aplicable.

- mPmB: No aplicable.

**SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes**

## - 3.1 Caracterización química: Sustancias

## - Denominación N° CAS

1310-58-3 hidróxido de potasio

## - Número(s) de identificación

## - Número CE: 215-181-3

## - Número de clasificación: 019-002-00-8

**SECCIÓN 4: Primeros auxilios**

## - 4.1 Descripción de los primeros auxilios

## - Instrucciones generales:

Quitarse de inmediato toda prenda contaminada con el producto.

Los síntomas de intoxicación pueden presentarse después de muchas horas, por lo que se requiere una supervisión médica durante un mínimo de 48 horas después del accidente.

## - En caso de inhalación del producto:

Las personas desmayadas deben tenderse y transportarse de lado con la suficiente estabilidad.

## - En caso de contacto con la piel: Lavar inmediatamente con agua y jabón y enjuagar bien.

## - En caso de contacto con los ojos:

Limpiar los ojos abiertos durante varios minutos con agua corriente y consultar un médico.

## - En caso de ingestión:

Consultar inmediatamente un médico.

Beber mucha agua o respirar aire fresco. Solicitar asistencia médica inmediatamente.

## - 4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

No existen más datos relevantes disponibles.

( continúa en la página 3 )

**H.W.Kessel S.A.C.**

Departamento de Ingeniería

Desde 1928 al Servicio de la Ciencia y Tecnología  
Equipar Laboratorios es Nuestra Especialidad...  
...Servir al Cliente es Nuestra Meta

**INFORME TECNICO**

Lima, 28 de Junio del 2018

Señores  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
CAMPUS UNIVERSITARIO / AV TUPAC AMARU 210

**Atención** : Dra. Myra E. Flores

**Referencia** : MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO / CARL ZEISS / EVO MA  
10 / S/N: EVO10.33.36 / Id: 15340

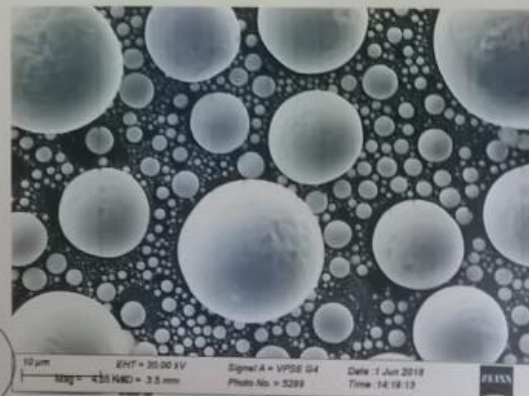
**H.W.Kessel S.A.C.**

Departamento de Ingeniería

Desde 1928 al Servicio de la Ciencia y Tecnología  
Equipar Laboratorios es Nuestra Especialidad...  
...Servir al Cliente es Nuestra Meta



Fotografía del patrón 'Estaño en carbón' a 363 Kx de magnificación.  
Imagen obtenida con el detector de Secundarios.



Fotografía del patrón 'Estaño en carbón' a 4.55 Kx de magnificación.  
Imagen obtenida con el detector de presión variable.

H.W.Kessel S.A.C.  
Ing. Marel Cristina Pizarro León  
Dpto. Ingeniería

Av. Ricardo Palma N° 905, San Antonio - Miraflores, Lima 18  
Teléfono: 219-2800 // Fax: 219-2801  
em@i.ingenieria@hwkessel.com.pe // Web: www.hwkessel.com.pe

Página 9 de 14

### **6.6.3 Planos**

**a) Mapa de Ubicación**

**b) Esquema del diseño de proyecto –Sistema de Adsorción del H<sub>2</sub>S**

**c) Esquema del Monitoreo, Unidad experimental de la Investigación**