

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DE MATERIALES COMO EL ASERRÍN, CASCARILLA DE ARROZ Y ESTROPAJO NATURAL, EN DIFERENTES TAMAÑOS DE GRANO, PARA LA CONTINGENCIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN AMBIENTES ACUÁTICOS.

KARLA JINETH CORREDOR MARÍN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DE MATERIALES COMO EL ASERRÍN, CASCARILLA DE ARROZ Y ESTROPAJO NATURAL, EN DIFERENTES TAMAÑOS DE GRANO, PARA LA CONTINGENCIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN AMBIENTES ACUÁTICOS.

KARLA JINETH CORREDOR MARÍN

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniera Química**

Director

CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA

M.Sc. Ingeniería Química

Codirectora:

DIANA MARCELA IBARRA MOJICA

Ingeniera Sanitaria y Ambiental

M.Sc. Ingeniería Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA
2018**

DEDICATORIA

***A Dios.** Por haberme dado la vida, la salud y fortaleza para llegar a este punto y lograr mis metas, ya que con su infinito amor y bondad me apoyo para no desfallecer cuando sentí que ya no podía más.*

***A mi madre.** Por haberme dado su incomparable amor, por apoyarme en todo momento, por sus consejos, sus valores, y por sus valiosas palabras de aliento.*

***A mi padre.** Por sus consejos y su apoyo incondicional que me ha brindado hasta el día de hoy.*

***A mi esposo.** Porque ha estado a mi lado, incluso en los momentos más difíciles, porque estuvo animando y apoyándome hasta donde sus esfuerzos lo permitían.*

***A mi hija.** Por ser la motivación para superarme día a día, gracias a ella, que, con su afecto y su cariño, encontré mi felicidad y mis ganas de buscar lo mejor para ella.*

***A toda mi familia** ya que con cada una de sus palabras de apoyo hicieron posible este día.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por transmitirme todos los conocimientos necesarios para convertirme en ingeniera Química.

Al profesor Crisóstomo Barajas Ferreira por dirigirme en este proyecto de grado, brindando me su confianza y apoyo.

A mi codirectora Diana Ibarra Mojica, por guiarme y corregirme durante el desarrollo del presente trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1 OBJETIVOS.....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2 MARCO TEÓRICO	16
2.1 COMPORTAMIENTO DE UN DERRAME DE PETRÓLEO EN AGUA..	16
2.2 ADSORBENTES.....	17
2.2.1 Materiales adsorbentes:.....	19
3 DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	21
3.1 PRUEBA EN CONDICIONES DINÁMICAS.	22
3.2 PRUEBAS PARA EL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DE HIDROCARBURO DE CORTA DURACIÓN 15 MINUTOS Y LARGA DURACIÓN 24 HORAS.	23
3.3 BALANCES DE MASA GLOBALES.....	25
4 RESULTADOS Y ANÁLISIS	25
4.1 PRETRATAMIENTO DE LOS MATERIALES SELECCIONADOS.	25
4.2 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DE LOS MATERIALES USANDO GASOLINA SEGÚN LA NORMA ASTM-F726-06.....	26
4.2.1 Balances de masa de las pruebas realizadas con gasolina.....	29
4.3 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DE LOS MATERIALES USANDO DIESEL SEGÚN LA NORMA ASTM-F726-06	30
4.3.1 Balances de masa de las pruebas realizadas con diesel.....	32
4.4 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN CONDICIONES HIDROFÍLICAS.....	33
4.4.1 Flotabilidad.	33
4.4.2 Capacidad de adsorción de agua de los tres materiales adsorbentes...34	
5 CONCLUSIONES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
6 RECOMENDACIONES.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
BIBLIOGRAFÍA.....	39
ANEXOS	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento de derrames de hidrocarburos en agua.....	17
Figura 2. Esquema de la metodología desarrollada para la investigación.	21
Figura 3. Procedimiento experimental de las pruebas dinámicas.	22
Figura 4. Procedimiento experimental de las pruebas de rendimiento de adsorción de los tres materiales.....	24
Figura 5. Evaluación del rendimiento de adsorción de gasolina en diferentes tamaños de grano.	28
Figura 6. Curva de Volatilidad de la gasolina.....	30
Figura 7. Evaluación del rendimiento de adsorción de diesel en diferentes tamaños de grano.....	31
Figura 8. Curva de volatilidad del diesel.	33

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los tipos de materiales adsorbentes.	18
Tabla 2. Tamaños de grano usados en las pruebas.	26
Tabla 3. Pérdidas de gasolina encontradas en las pruebas de adsorción.	29
Tabla 4. Pérdidas de diesel encontradas en las pruebas de adsorción.	32
Tabla 5. Flotabilidad de los materiales adsorbentes en diferentes tamaños de grano.....	34
Tabla 6. Rendimiento de adsorción en agua de los tres materiales en diferentes tamaños de grano	34

LISTA ANEXOS

ANEXO A. Registro de pruebas por triplicado de adsorción en condiciones oleofílicas.....	41
ANEXO B Balance de masa de las pruebas hechas con gasolina.....	51
ANEXO C. Balance de masa sobre el diesel.....	54

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DE MATERIALES COMO EL ASERRÍN, CASCARILLA DE ARROZ Y ESTROPAJO NATURAL, EN DIFERENTES TAMAÑOS DE GRANO, PARA LA CONTINGENCIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN AMBIENTES ACUÁTICOS.*

AUTOR: Karla Jineth Corredor Marín**

PALABRAS CLAVE: Adsorción, Hidrocarburos, Gasolina, Diesel, Aserrín, Cascarilla De Arroz, Estropajo Natural.

DESCRIPCIÓN:

Históricamente la contaminación a causa de los derrames de hidrocarburos en medios acuáticos ha generado problemáticas ambientales recurrentes, esto se debe a que se afecta directamente al ecosistema, tanto la flora, como la fauna, la salud humana, en otros. Lo anterior hace que el tratamiento de aguas contaminadas sea un tema de gran interés, uno de los métodos para contrarrestar los efectos negativos, es la biorremediación, mediante el uso de adsorbentes naturales, ya que éstos logran disminuir los niveles de crudo derramado, permitiendo minimizar la degradación del medio. Éste trabajo se enfocó en evaluar la capacidad de adsorción de tres materiales diferentes como: el aserrín, la cascarilla de arroz y el estropajo natural, mediante la metodología de la norma ASTM F726-06, en la cual se determinó que el aserrín es el mejor adsorbente usado para la remoción de gasolina y diesel, además se estableció que no existen una relación directa entre el tamaño de grano y la adsorción del material, ya que este rendimiento depende de las características fisicoquímicas de cada uno de los adsorbentes. Los materiales evaluados en este trabajo pueden usarse como adsorbentes contenidos (Tipo III), debido a que son biodegradables, retienen gran cantidad de hidrocarburo, y son de bajo costo, no obstante, no cumplen con la flotabilidad requerida (al menos 90%) para usarse como adsorbentes sueltos en la contingencia de derrames.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería Química. Director M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirectora M.Sc. Diana Marcela Ibarra Mojica.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF ADSORPTION OF MATERIALS LIKE THE SAWDUST, RICE SHELL AND NATURAL SCRAP, IN DIFFERENT SIZES OF GRAIN, FOR THE CONTINGENCY OF SPILLS OF HYDROCARBONS IN AQUATIC ENVIRONMENTS.*

AUTHOR: Karla Jineth Corredor Marín**

KEYWORDS: Adsorption, Hydrocarbons, Gasoline, Diesel, Sawdust, Rice Cask, Natural Scourer.

DESCRIPTION:

Historically, the pollution caused by spills of hydrocarbons in aquatic environments has generated recurrent environmental problems, this is due to the fact that the ecosystem is directly affected, both the flora, fauna, and human health, in others. The above makes the treatment of contaminated water a subject of great interest, one of the methods to counteract the negative effects, is the bioremediation, by using natural adsorbents, since these manage to reduce the levels of spilled oil, allowing to minimize the degradation of the environment. This work focused on evaluating the adsorption capacity of three different materials such as: sawdust, rice husk and natural scouring pad, using the methodology of ASTM F726-06, in which it was determined that sawdust is the best adsorbent used for the removal of gasoline and diesel, it was also established that there is no direct relationship between the grain size and the adsorption of the material, since this performance depends on the physicochemical characteristics of each of the adsorbents. The materials evaluated in this work can be used as contained adsorbents (Type III), because they are biodegradable, retain a large amount of hydrocarbon, and are inexpensive, however they do not comply with the required buoyancy (at least 90%) to be used as loose adsorbents in the spill contingency.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería Química. Director M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirectora M.Sc. Diana Marcela Ibarra Mojica.

INTRODUCCIÓN

En los últimos 15 años, en Colombia se han presentado cerca de 6300 incidentes de derrames de hidrocarburos, con alrededor de 3.6 millones de barriles vertidos [1]. Este tipo de situaciones generan contaminación de los ríos y zonas adyacentes, pérdida de vegetación, contaminación de los suelos y aire, generación de desechos y problemas en la salud humana, entre otros [2].

En cuerpos de agua, este tipo de compuestos flotan en la superficie formando una película de espesor variable impidiendo la entrada de luz y el intercambio gaseoso, dando comienzo a la solubilización de compuestos hidrosolubles y a la afección de diferentes poblaciones. La primera población afectada por un derrame es el plancton, en segundo lugar, los micro invertebrados, y la última población los bentos o población de macro vertebrados, que viven en los fondos de los ríos y ciénagas [3].

Para reducir la afectación se requiere planes de contingencia apropiados para responder adecuadamente, lo cual incluye implementar técnicas de recolección de los productos derramados, siendo la aplicación de adsorbentes una de los métodos más ampliamente usados. Luego de su aplicación, los adsorbentes deben ser tratados para dar una adecuada disposición para lo cual los materiales naturales presentan ventajas al ser más biodegradables que los materiales sintéticos [4].

Mediante el presente trabajo, se evaluó la capacidad de adsorción del aserrín, cascarilla de arroz y estropajo natural en diferentes tamaños de grano, para la remoción de hidrocarburos (gasolina y diesel) en agua dulce. Con los resultados obtenidos se concluyó que no es posible generalizar que exista una relación directa entre el tamaño y el rendimiento de adsorción, y que los materiales más

adsorbentes no son necesariamente aptos para ser usado en atención de contingencias, puesto que deben tener la flotabilidad suficiente (mayor al 90%) para mantener los productos derramados en la superficie del agua y no transportarlos al lecho de los cuerpos de agua, aumentando el impacto ambiental.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar tres tipos de materiales naturales para la remoción de diesel y gasolina derramados en agua dulce.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Seleccionar tres tipos de materiales naturales para aplicación como adsorbentes de hidrocarburos.
- ✓ Evaluar la capacidad de adsorción de los tres materiales, usando diferentes tamaños de grano.

2 MARCO TEÓRICO

El petróleo es un aceite mineral, cuyo origen es la descomposición de organismos animales y vegetales que se sedimentaron en los fondos de los mares, lagos y pantanos. En la actualidad es el combustible más usado en el mundo [5].

La contaminación por derrames de petróleo afecta los ecosistemas naturales tanto en su aspecto físico como biológico. Dicha contaminación altera las condiciones fisicoquímicas del agua al presentarse una disminución de oxígeno disuelto debido a la reducción de la transferencia de oxígeno entre la fase atmósfera – agua, al igual que la entrada de luz al medio, lo que inhibe el crecimiento de ciertas especies y disminuye la fijación de nutrientes. [6] Uno de los efectos adicionales tanto en agua como suelos es que el petróleo consume oxígeno, aumenta la demanda bioquímica del agua y puede generar condiciones anóxicas (ausencia de oxígeno) [7]

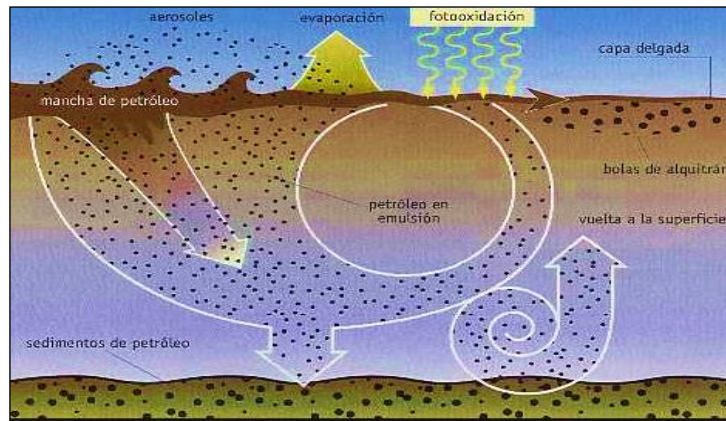
2.1 COMPORTAMIENTO DE UN DERRAME DE PETRÓLEO EN AGUA

Cuando el petróleo es derramado en el agua, sus propiedades físicas y químicas cambian progresivamente. Este proceso se conoce como degradación e incluye la evaporación, disolución, dispersión, oxidación fotoquímica, degradación microbiana, absorción en materiales suspendidos, aglomeración, entre otros (ver figura 1); los cuales dependen de factores como temperatura del aire, temperatura del agua, radiación solar y velocidad de las corrientes [8].

Dependiendo de la estación del año, el impacto ambiental puede variar. El mayor impacto ambiental se produce en la época de transición hacia aguas bajas, ya que los hidrocarburos quedan depositados en las zonas de inundación o en la vegetación de las riberas del río. En aguas bajas los hidrocarburos pueden quedar detenidos en las zonas de remansos y cubrirán poca extensión de terreno. En

transición a aguas altas, se espera que los hidrocarburos han quedado adheridos en las márgenes sean eliminados por el incremento de la corriente. [9]

Figura 1. Comportamiento de derrames de hidrocarburos en agua.



Fuente: SILOS RODRÍGUEZ José María, Manual de lucha contra la contaminación por hidrocarburos Universidad de Cádiz, España. 2008 [8].

2.2 ADSORBENTES

Los adsorbentes de hidrocarburos, se componen de una amplia gama de productos orgánicos, inorgánicos y sintéticos diseñados para retirar hidrocarburos en lugar de agua. Los más comunes incluyen: la arcilla, carbón activado, zeolita y gel de sílice y los adsorbentes agrícolas como la cáscara de café, cáscaras de maní, bagazo de caña, cáscara de arroz y aserrín [10]. Los adsorbentes pueden clasificarse según su tipo y pueden usarse de diferentes formas, tal como se muestra en la tabla 1.

Algunos adsorbentes puede ser utilizados como el único método de limpieza de derrames pequeños, que son los más utilizados para eliminar los restos finales del aceite o en áreas que no es posible la aplicación de métodos invasivos como remoción mecánica. Una vez que los adsorbentes se han utilizado para recuperar el petróleo, deben ser retirados del agua y tratados para su correcta disposición

[11]. Los adsorbentes naturales presentan ventajas para realizar procesos de biorremediación a los ambientes acuáticos.

Tipo	Material	Ventajas	Desventajas
Tipo I	-Orgánico: Rollos, hojas, tejidos. -Inorgánico: placas películas, mantas,	Buena resistencia para ser evantados manejados sin romperse cuando se saturan.	-Tienden a saturarse rápidamente.
Tipo II Suelto o granel	- Orgánico:incluidos corteza, turba, aserrín, pulpa de papel, corcho. Plumas de gallina, paja, lana y cabello humano. - Inorgánico: piedra poméz y vermiculita Sintético: principalmente polipropileno.	- A menudo abundante forma natural o disponible como subproducto de residuos de procesos industriales. - Puede ser de bajo costo. - Puede servir para proteger la fauna y flora	- Difícil de controlar, el viento puede esparcirlo. - Difícil de retirar. - Puede resultar difícil de bombear la mezcla de hidrocarburos y adsorbentes. - Más limitaciones para desechar la mezcla de hidrocarburos y adsorbente.
Tipo III Encerrado	Existe la posibilidad de encerrar en mallas o en redes, todos los materiales sueltos mencionados anteriormente.	- Mas fácil de desplegar y retirar que en el caso de los adsorbentes sueltos. - La barrera encerrada presenta mayor area superficial que la barrera continua.	- La resistencia estructura limitada por la resistencia de la malla o la red. - Las barreras orgánicas pueden saturarse y hundirse rápidamente. La retencion de hidrocarburos esta limitada.
Tipo IV Continuo	Sintético: principalmente polipropileno	- Almacenamiento a largo plazo. - Sencillo de desplegar y retirar. - Posibilidad de obtener una alta recolección de hidrocarburos.	- Eficiencia limitada para hidrocarburos metalizados o mas viscosos. - No se descompone con rapidez: esto limita las opciones de desecho.
Tipo IV Fibra	Sintético: pricipalmente polipropileno	- Eficaz sobre hidrocarburos metalizados y mas viscosos.	- Menos eficaz sobre hidrocarburos frescos ligeros e intermedios.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los tipos de materiales adsorbentes.

FUENTE: Adaptado de THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION GENERATION LIMITED. Uso de materiales adsorbentes en la respuesta a derrames de hidrocarburos. Londres, UK, 2011. [4] y de la Norma ASTM F726-06 (Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents) [12].

2.2.1 Materiales adsorbentes:

- **Aserrín:** Es un producto de desecho del procesamiento de la madera compuesto de tres componentes principales: la lignina, celulosa y la hemicelulosa. La lignina, que se produce naturalmente en las capas de recubrimiento de celulosa y hemicelulosa, capas de xilema y paredes de fibra de la célula; es el componente más recalcitrante, y por lo tanto protege a los componentes menos recalcitrantes de polisacáridos contra el ataque microbiano. La lignina es un polímero complejo sobre la base de propano fenilo, un “monómero” con aromáticos (fenil) y residuos de hidrocarburos alifáticos (propano) [13]. Una de las principales ventajas que presenta este material es su bajo costo, ya que requiere un procesamiento mínimo y es abundante como residuo de la industria [14].
- **Cascarilla de arroz:** La planta de arroz, está constituida por cuatro componentes principales: el germen, el endospermo, la cutícula y la cáscara o pajilla, que constituye aproximadamente 20% en peso del grano y que es separado en el proceso de pilado formándose verdaderas montañas de cascarilla al costado de los molinos. Como combustible genera calor, debido a su valor calorífico aproximadamente 16720 kJ/kg), y la ceniza resultante contiene un porcentaje en sílice superior al 90%, lo cual la hace una potencial fuente de sílice. Las principales impurezas que contiene esta sílice son: calcio, potasio, magnesio y manganeso y como secundarias aluminio, hierro (10-20ppm), boro y fósforo. (1-40 ppm) [15].

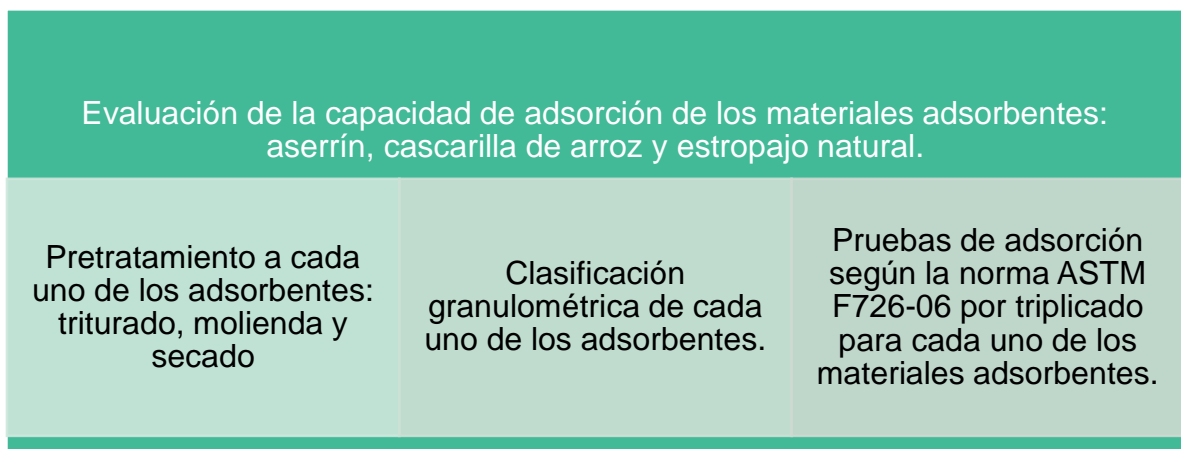
- **Estropajo natural o esponja vegetal:** es una planta exótica de origen asiático que nace de manera silvestre en la zona del Amazonas. Es una enredadera de la familia de las cucurbitáceas que puede llegar a alcanzar una altura de más de 15 metros. Los frutos son alargados, de color verde al principio, y amarillos anaranjados en el momento de la cosecha. Su tamaño medio es de 25 a 30 cm de largo, aunque algunas variedades llegan al medio metro. El interior de la vaina está formado por una densa red de fibras vegetales que forman un cilindro hueco. Una vez cosechadas, peladas y procesadas las esponjas vegetales tienen una forma cilíndrica que hacen que resulten muy cómodas de utilizar. Las esponjas vegetales, al ser un producto 100% natural son biodegradables y ecológicas, ya que tras su utilización pueden volver a la naturaleza donde se descompondrán formando sustrato para que nazcan nuevas plantas [16].

3 DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

Para el desarrollo de éste trabajo, se seleccionó tres materiales adsorbentes, los cuales fueran materiales biodegradables, de fácil disponibilidad y bajo costo. Los materiales usados fueron: aserrín, cascarilla de arroz y estropajo natural.

El procedimiento experimental para el desarrollo de éste trabajo se resume en la figura 2.

Figura 2. Esquema de la metodología desarrollada para la investigación.



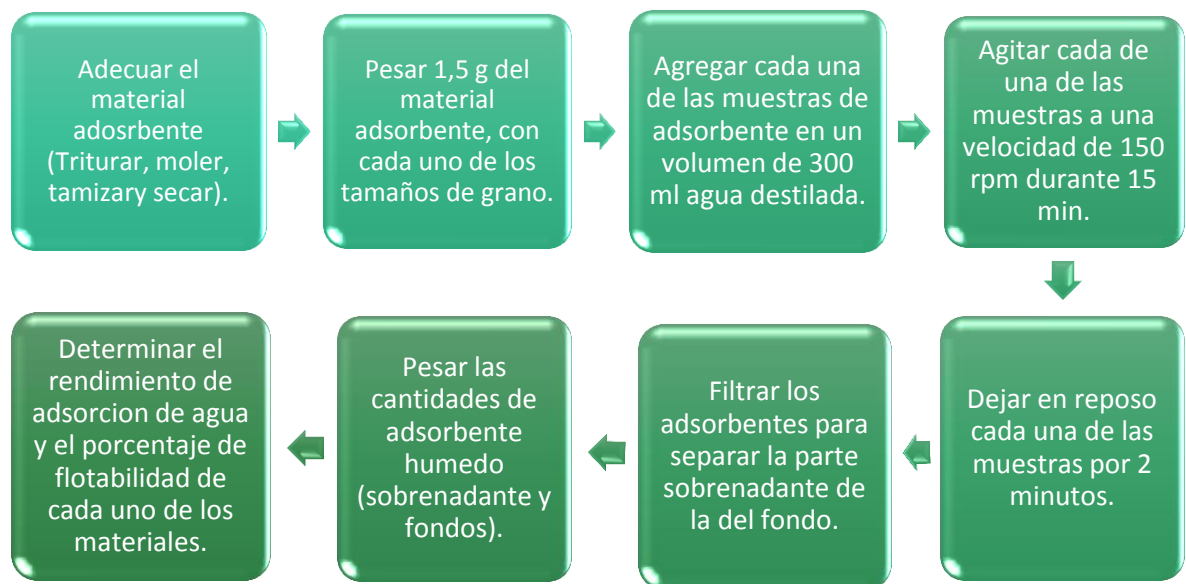
Para la evaluación de la capacidad de adsorción, el procedimiento experimental se realizó en base a la metodología establecida para materiales adsorbentes sueltos, tipo II de la norma ASTM F726-06 [12]; realizando pruebas por triplicado para cada uno de los tamaños de grano obtenidos a partir de la caracterización

granulométrica de cada uno de los adsorbentes (aserrín, cascarilla de arroz y estropajo natural) y cada uno de los hidrocarburos evaluados.

3.1 PRUEBA EN CONDICIONES DINÁMICAS.

La prueba en condiciones dinámicas evalúa el desempeño de un material adsorbente cuando se encuentra en una fase acuosa en movimiento (condiciones hidrofílicas). El procedimiento de los ensayos se muestra en la *Figura 3*.

Figura 3. Procedimiento experimental de las pruebas dinámicas.



Después de realizar la prueba experimental, se procede a calcular el rendimiento de adsorción de agua el cual se determina con la ecuación 1 y la ecuación 2.

$$\text{Adsorbencia de agua} = S_s / S_o \quad (1)$$

$$S_w = S_{wT} - S_o \quad (2)$$

Dónde:

S_0 = peso adsorbente seco inicial, [g].

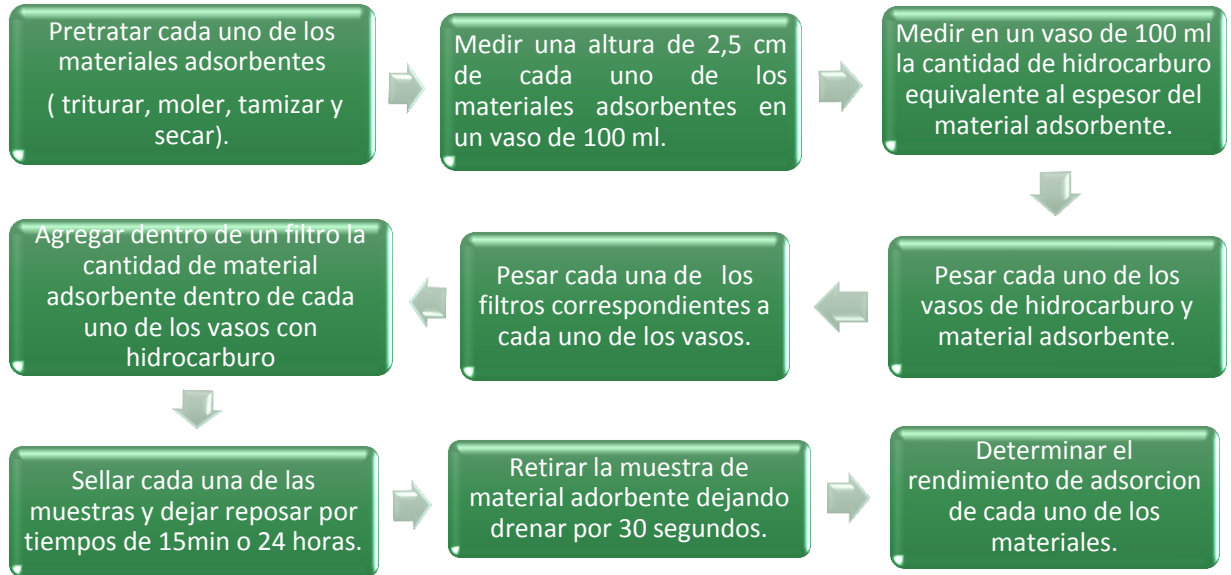
S_{wT} = peso de las muestras adsorbentes al final de la prueba de agua, [g].

S_w = agua neta absorbida, [g].

3.2 PRUEBAS PARA EL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DE HIDROCARBURO DE CORTA DURACIÓN 15 MINUTOS Y LARGA DURACIÓN 24 HORAS.

Las pruebas de adsorción de hidrocarburo de corta y larga duración corresponden a la máxima cantidad de hidrocarburo adsorbido en un tiempo de 15 minutos y 24 horas. El procedimiento de los ensayos se muestra en la *Figura 4*. Las pruebas de adsorción se hicieron por triplicado para cada tamaño de grano, con los dos tipos de hidrocarburo. Según la norma ASTM-F726-06 el material adsorbente debe estar inmerso en el hidrocarburo. Por lo tanto, existe una relación entre la cantidad de material usado por cantidad de hidrocarburo empleado, para que su capacidad de adsorción sea gramo a gramo.

Figura 4. Procedimiento experimental de las pruebas de rendimiento de adsorción de los tres materiales



Después de realizar el anterior procedimiento se calcula el rendimiento de adsorción de hidrocarburo, tal como se establece en la ecuación 3.

$$\text{Adsorbencia de hidrocarburo} = S_S / S_0$$

(3)

Dónde:

S_0 = peso adsorbente seco inicial, [g].

S_{ST} = peso de las muestras adsorbentes al final de la prueba de hidrocarburo, [g].

$S_S = (S_{ST} - S_0)$ hidrocarburo neto adsorbido, [g].

3.3 BALANCES DE MASA GLOBALES

Para cada una de las pruebas de adsorción se realizó los balances de masa globales promedio para las pruebas cortas de 15 minutos y para las pruebas largas de 24 horas (Ver anexo A), cada uno de los balances de masa se determinó con la ecuación 4.

$$S_a = S_{ai} - S_{af} \quad (4)$$

Dónde:

S_a =Peso hidrocarburo adsorbido [g].

S_{ai} =Peso inicial hidrocarburo [g].

S_{af} =Peso hidrocarburo remanente [g].

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 PRETRATAMIENTO DE LOS MATERIALES SELECCIONADOS.

La muestra de aserrín usada es éste estudio, se obtuvo de un aserradero de la ciudad, compuesta por tres clases de madera, pino, cedro y moncoro. La cascarilla de arroz adquirió de una de las arroceras locales, procedente del departamento de Casanare, finalmente se consiguió el estropajo en mercado común, previamente descascarado y seco.

Los tres materiales adsorbentes usados en este trabajo tuvieron un pretratamiento, el cual consistía en separación por tamaños de grano (tamizaje) y

secado. Para las muestras de cascarilla y de estropajo fue necesario realizar un proceso de triturado en un molino de cuchillas de 2 mm de diámetro.

El proceso de tamizaje se llevó a cabo a través de vibraciones, durante un tiempo de 10 minutos en el cual se obtuvieron fracciones diferentes. En la tabla 2 se resumen los tamaños de grano obtenidos para los tres materiales.

Tabla 2. Tamaños de grano usados en las pruebas.

	Muestra gruesa				Muestra fina		
Malla	4	8	10	16	20	30	40
Tamaño de grano (mm)	4,75	2,38	2	1,16	0,84	0,59	0,42
Cantidad obtenida Aserrín [g]	98	98	75	87	120	100	110
Cantidad obtenida Cascarilla [g]			91	95	98	120	140
Cantidad obtenida Estropajo [g]			145		105	100	98

El material del cual se obtuvo más tamaños de grano fue el aserrín, con un total de 7 mallas diferentes (malla: 4, 8, 10, 16, 20, 30 y 40), éste en que la muestra gruesa tuvo 4 tamaños de partícula, a diferencia de la cascarilla de arroz (2 tamaños partícula muestra gruesa malla 10 y malla 16) y el estropajo natural (malla 10).

Finalmente, el proceso de secado para los tres materiales (aserrín, cascarilla y estropajo natural) se llevó a cabo por separado para cada tamaño de grano, sometiéndolos a una temperatura de 40 °C, durante 24 horas, en un horno de laboratorio.

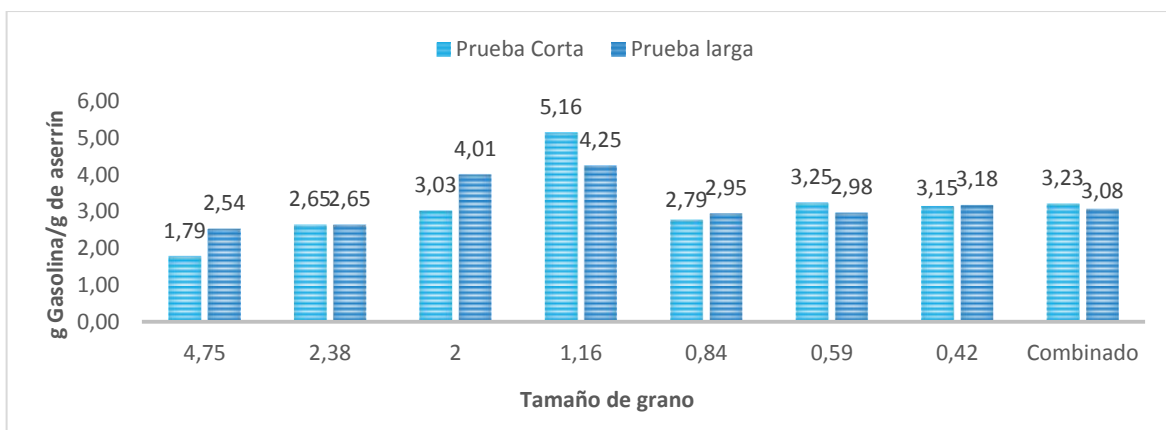
4.2 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DE LOS MATERIALES USANDO GASOLINA SEGÚN LA NORMA ASTM-F726-06

Los resultados se obtuvieron a partir del procedimiento descrito en la norma internacional ASTM F726-06. En las figuras 5-a, 5-b y 5-c se presentan los resultados obtenidos para aserrín, cascarilla de arroz y estropajo respectivamente.

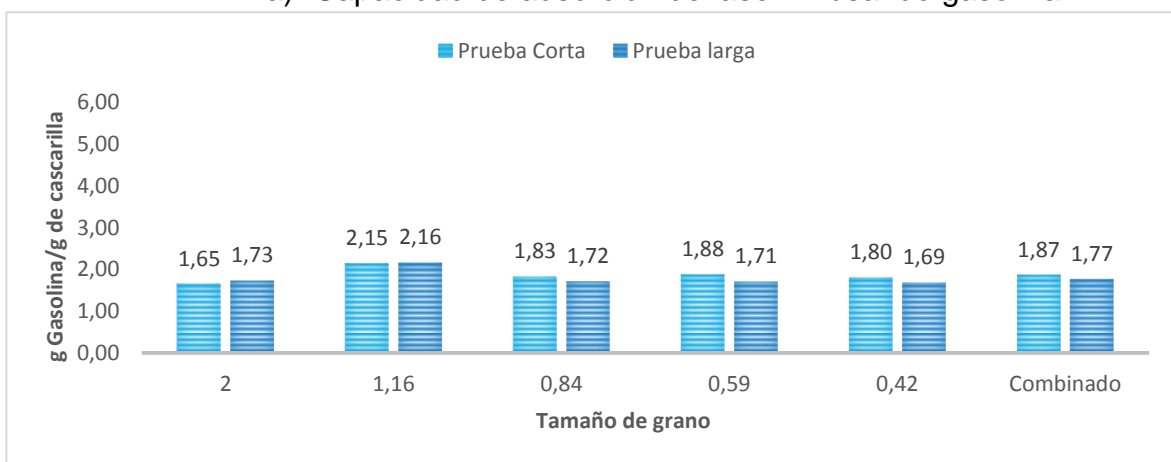
Para el aserrín y la cascarilla de arroz se determinó con las pruebas experimentales que en la malla 16 con tamaño de grano intermedio de 1,16 mm, adsorbe mayor cantidad de gasolina (figuras 5-a y 5-b respectivamente). Por otra parte, en el estropajo natural, se estableció que el mayor rendimiento de adsorción se presentó en el tamaño de grano más pequeño (0,42 mm). Éste material tiende a aumentar su adsorción de gasolina con tamaño de grano más fino, tal como se evidencia en la figura 5-c. Los comportamientos anteriores no infieren una tendencia definitiva en que dependiendo el tamaño de grano se obtenga mejor resultados en la adsorción definitiva de gasolina.

En general, el aserrín presentó el mejor rendimiento de adsorción, con valores entre 1,79 y 5,16 g/g, seguido por el estropajo natural con valores de 1,84 y 3,79 g/g, finalmente la cascarilla de arroz obtuvo los rendimientos de adsorción más bajos, entre 1.65 y 2.15 g/g. Los resultados obtenidos para las pruebas realizadas con la combinación de todos los tamaños de grano de cada material confirman que el aserrín sería el material más adsorbente con un rendimiento entre 3,08 y 3,23 g/g.

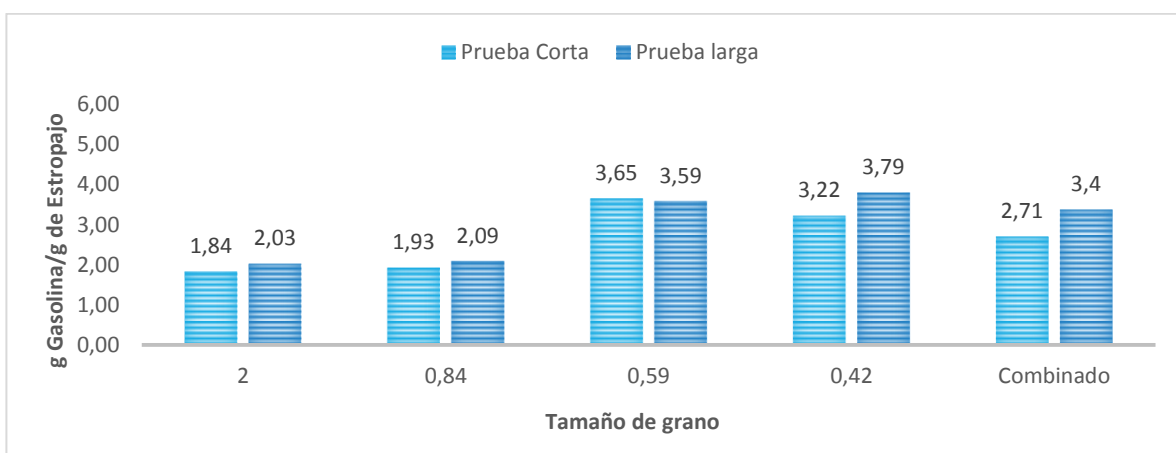
Figura 5. Evaluación del rendimiento de adsorción de gasolina en diferentes tamaños de grano.



a) Capacidad de adsorción del aserrín usando gasolina.



b) Capacidad de adsorción de la cascarilla de arroz usando gasolina.



c) Capacidad de adsorción del estropajo natural usando gasolina.

4.2.1 Balances de masa de las pruebas realizadas con gasolina.

Para las pruebas de adsorción, donde se determinaron las condiciones oleofílicas de los tres materiales adsorbentes, se realizó el balance global con la ecuación 4. En la tabla 3, se resumen las pérdidas calculadas mediante el balance de masa. Los balances de masa completos se encuentran consignados en el anexo B.

Tabla 3. Pérdidas de gasolina encontradas en las pruebas de adsorción.

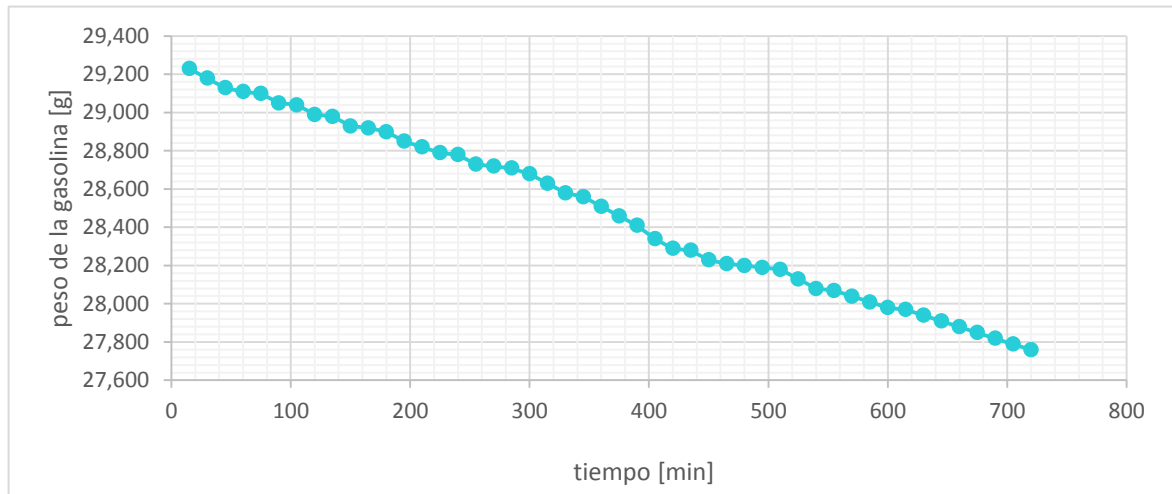
Tamaño de grano [mm]	Aserrín		Cascarilla de arroz		Estropajo natural	
	Prueba corta	Prueba larga	Prueba corta	Prueba larga	Prueba corta	Prueba larga
4,75	3,82	6,33	-	-	-	-
2,38	5,96	9,86	-	-	-	-
2	6,02	8,83	8,49	6,86	3,6	7,48
1,16	9,48	6,82	10,83	5,87	-	-
0,84	7,76	5,65	6,74	8,08	5,84	7,02
0,59	6,58	8,62	4,99	8,47	3,31	7,95
0,42	7,06	8,04	3,63	8,79	5,07	6,59
Combinado	4,29	6,13	9,01	7,95	9,73	5,23

Las pérdidas obtenidas en los balances de masa con la gasolina no establecen una tendencia, por lo que no puede atribuirse su comportamiento al tamaño de grano. El material en que se presentó mayor pérdida fue la cascarilla de arroz en el tamaño de grano de 1,16 mm, con un valor de 10,83 %. No obstante, el material que presentó menor pérdida fue el estropajo natural con 3,31% en el tamaño de grano de 0,59 mm.

Para establecer la causa de las pérdidas en el balance de masas, se procedió a realizar una curva de volatilización de la gasolina. Para esto se dispuso de tres (3) muestras del producto en vasos de precipitado, realizando mediciones de cambio en el peso (muestra y vaso) cada 15 minutos, durante 12 horas. Como resultado,

se estableció que en 720 minutos se pierde máximo alrededor del 7,15 % de la cantidad inicial de gasolina. Ver figura 6.

Figura 6. Curva de Volatilidad de la gasolina.



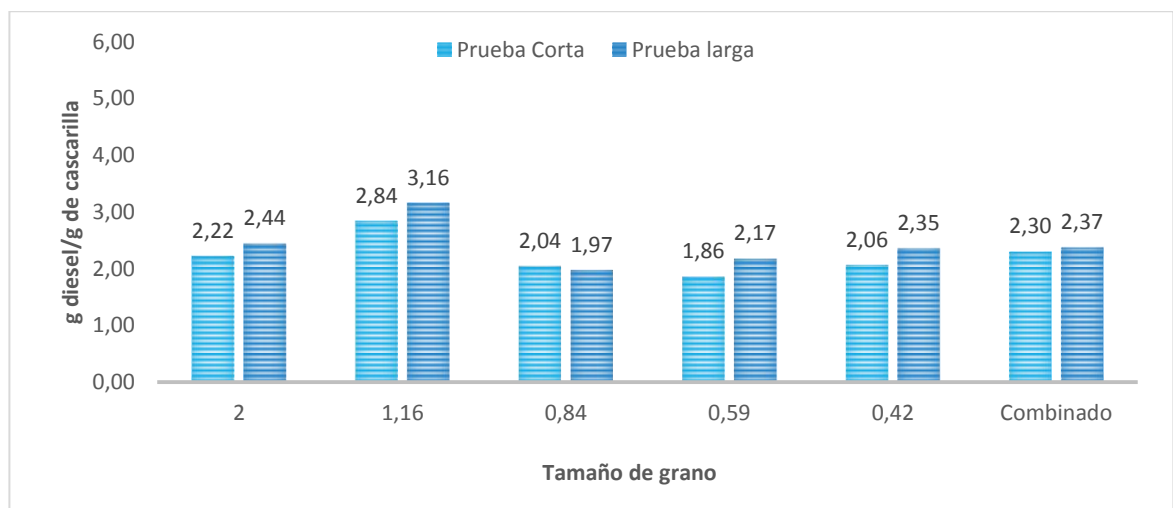
4.3 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DE LOS MATERIALES USANDO DIESEL SEGÚN LA NORMA ASTM-F726-06

En este trabajo el diesel fue usado para evaluar el rendimiento de adsorción de la cascarilla de arroz y estropajo natural. Para el aserrín se tomaron los resultados obtenidos de adsorción de diesel, de un trabajo de grado desarrollado en el 2017 por el Centro de Investigaciones para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía- CIDES [1].

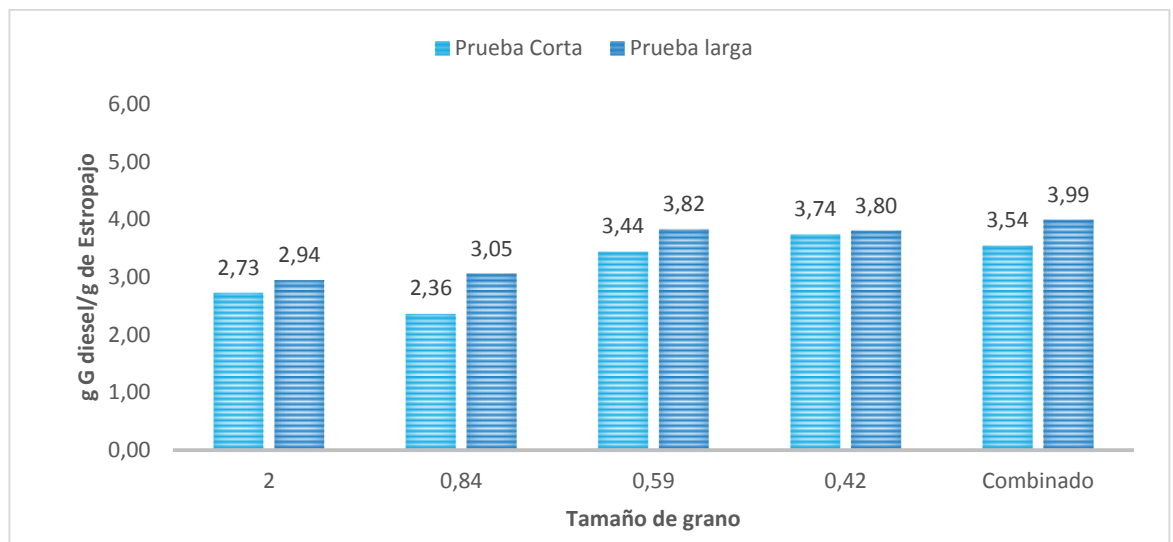
En las figuras 7-a, 7-b se presentan los resultados obtenidos para cascarilla de arroz y estropajo respectivamente. Ambos materiales presentaron un comportamiento similar en la prueba corta de 15 minutos y la prueba larga de 24 horas, lo cual podría sugerir que los materiales pueden alcanzar su máxima saturación en un tiempo menor o igual a 15 minutos.

El mayor rendimiento de adsorción se presentó en el estropajo natural con tamaño de grano fino, ya que a partir de tamaños inferiores a 0,59 mm, presentó valores en la prueba larga de 3,82 g/g y en la prueba corta de 3,44g/g, éste sobrepasa la capacidad de adsorción de la cascarilla de arroz, debido a que ésta obtuvo su máximo rendimiento con valores de 3,16 g/g y 2,84g/g, tanto en la prueba larga como para la prueba corta (figura 7-a).

Figura 7. Evaluación del rendimiento de adsorción de diesel en diferentes tamaños de grano.



a) Capacidad de adsorción de la cascarilla de arroz usando diesel.



b) Capacidad de adsorción del estropajo natural usando diesel.

Para el aserrín, según Castro y Pinilla (2017), la mayor capacidad de adsorción se presentó con el tamaño de grano intermedio (1,16 mm), con un valor de 6,22 g/g [1].

4.3.1 Balances de masa de las pruebas realizadas con diesel.

Los balances realizados a las pruebas oleofílicas de corta y larga duración en la cascarilla de arroz y estropajo se determinaron con la ecuación 4 los balances de cada una de las pruebas pueden verse en el anexo C.

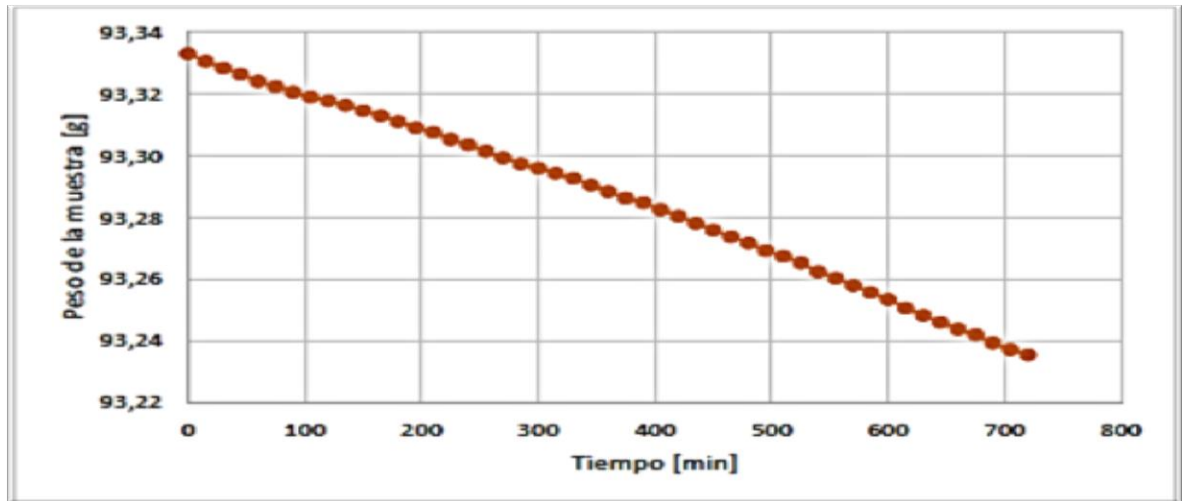
En la Tabla 4 se pueden observar las pérdidas de diesel obtenidas al realizar los balances de masa de las pruebas hechas con cascarilla de arroz y estropajo natural.

Tabla 4. Pérdidas de diesel encontradas en las pruebas de adsorción.

Tamaño de grano [mm]	Cascarilla de arroz		Estropajo natural	
	Prueba corta	Prueba larga	Prueba corta	Prueba larga
2	6	7,34	4,05	5,54
1,16	3,79	3,21	-	-
0,84	6,54	7,58	6,35	1,59
0,59	7,13	4,19	7,5	6,69
0,42	8,9	1,87	3,51	8,93
Combinado	4,48	6,69	3,87	4,33

Las pérdidas de diesel calculadas con los balances de masa para cada uno de los adsorbentes (cascarilla de arroz y estropajo natural) no sobrepasaron el 8,9%. De acuerdo a la curva de volatilidad del diesel (figura 8) elaborada por Castro y Pinilla (2017), en un tiempo de 720 minutos se reduce en aproximadamente 4,2% la cantidad inicial de diesel, por tanto, se podría inferir que las pérdidas en las pruebas realizadas corresponderían tanto a volatilización como errores en la manipulación de las pruebas [1].

Figura 8. Curva de volatilidad del diesel.



Fuente: CASTRO C. Allison, PINILLA P. Sebastián, Evaluación del rendimiento de adsorción del aserrín, en diferentes tamaños de grano, para la contingencia de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos.2017 [1]

4.4 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN CONDICIONES HIDROFÍLICAS.

4.4.1 Flotabilidad.

Según la norma ASTM F726-06 para que un material sea usado como adsorbente suelto en la contingencia de derrames, no solo debe tener buena capacidad de adsorción, además presentar flotabilidad mayor o igual al 90% en peso.

Como se observa en la tabla 5, el único material con el porcentaje de flotabilidad sugerido por la norma sería el aserrín (90%), con el mayor tamaño de grano (4,75 mm) con 90,16% [1]. Los materiales evaluados en este trabajo (cascarilla de arroz y estropajo natural), no cumplirían con esta condición en ningún tamaño de grano.

Tabla 5. Flotabilidad de los materiales adsorbentes en diferentes tamaños de grano.

Tamaño de grano [mm]	4,75	2,38	2	1,16	0,84	0,59	0,42
Flotabilidad aserrín [%]*	90,16	76,3	66,3	40,4	6,41	3,52	0,16
Flotabilidad cascarilla [%]	-	-	6,91	7,55	10,5	10,4	14
Flotabilidad estropajo [%]	-	-	25,9	-	14,9	8,58	13,03

4.4.2 Capacidad de adsorción de agua de los tres materiales adsorbentes.

Siguiendo las especificaciones de la ASTM F726-06, se evaluó la capacidad de adsorción de agua de la cascarilla de arroz y el estropajo. Los datos del aserrín fueron tomados del trabajo de Castro y Pinilla (2017) [1].

En la tabla 6 se resume la adsorción de los tres materiales, se puede apreciar que el material que menos adsorbe agua es la cascarilla de arroz (7,67-7,99 g/g), seguida del aserrín (6,67 – 9.91 g/g); siendo el de mayor adsorción el estropajo natural con valores entre 8,77 y 12,12 g/g.

Tabla 6. Rendimiento de adsorción en agua de los tres materiales en diferentes tamaños de grano

Tamaño de grano [mm]	4,75	2,38	2,00	1,16	0,84	0,59	0,42
Capacidad de adsorción [g agua/ g aserrín]*	7,33	8,69	9,91	9,91	6,84	6,67	8,23
Capacidad de adsorción [g agua/ g de cascarilla]	-	-	7,67	7,86	7,89	7,99	7,95
Capacidad de adsorción [g agua/ g de estropajo]	-	-	8,77	-	9,71	11,75	12,12

* Adaptado de CASTRO C. Allison, PINILLA P. Sebastián, *Evaluación del rendimiento de adsorción del aserrín, en diferentes tamaños de grano, para la contingencia de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos.* 2017 [1]

5 CONCLUSIONES

- De los tres materiales evaluados, el aserrín es el mejor adsorbente, puesto que presentó la mayor adsorción de gasolina y diesel (5,16 y 6,22 g/g respectivamente), seguido del estropajo natural (3,79 y 3,99 g/g respectivamente) y la cascarilla de arroz (2,16 y 3,16 g/g respectivamente).
- De acuerdo a los resultados obtenidos para los dos productos evaluados (diesel y gasolina), solo en las pruebas con estropajo natural se evidenció relación directa del tamaño de grano y capacidad de adsorción (menor tamaño, mayor adsorción), contrario al aserrín y la cascarilla de arroz donde el tamaño intermedio (1,16 mm) fue el que registró los mejores resultados. Esto podría sugerir que la capacidad de adsorción depende de las características de cada material y no es posible generalizar en la conveniencia del uso de un rango específico de tamaños de grano para todos los materiales adsorbentes.
- De acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM 726-06, solo el aserrín en tamaño de grano grande (4,75 mm) es apto para uso como adsorbente suelto (tipo II), puesto que a pesar de no presentar la mayor capacidad de adsorción es el único que satisface las restricciones de flotabilidad (mayor al 90% en peso).

6 RECOMENDACIONES

- Dado que los menores tamaños de grano tienden a presentar mejor adsorción, pero baja flotabilidad, se sugiere evaluar la viabilidad del uso del aserrín, cascarilla de arroz y estropajo natural en tamaños menores a 4,75 mm, como adsorbentes contenidos (tipo III).
- Investigar técnicas para mejorar la flotabilidad de los tres materiales evaluados, para su uso como adsorbentes sueltos (tipo II).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASTRO C. Allison, PINILLA P. Sebastián, Evaluación del rendimiento de adsorción del aserrín, en diferentes tamaños de grano, para la contingencia de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos.2017.
- [2] ANDRADE RIVERA Carolina Estefanía. Tratamiento de aguas contaminadas con crudo utilizando quitosano como adsorbente. Universidad Central del Ecuador, Quito, 2015.
- [3] MENESES B Fátima, OLIVEIRA C Flavio A, OKEKE Benedict, Frankenberger-Júnior William T. Bioremediation of soil contaminated by diesel oil. Brazilian Journal Microbiology. 2003; Vol 34:65-68.
- [4] MERLIN, F., LE GUERROUÉ, P. Use of Sorbents for Spill Response. OperationalGuide.Cendre.1991; p. 7
- [5] WUOTTO Vicente, PEMEX Exportación De Hidrocarburos 5 de septiembre de 2013 pág. 1 Ciudad de México. D.F.
- [6] JIMÉNEZ, Diana Lucia. Estudio de impacto ambiental generado por un derrame de hidrocarburos sobre una zona estuarina, aledaña al terminal de Ecopetrol en Tumaco. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia. 2006.
- [7] VELÁSQUEZ ARIAS, Johana Andrea. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. Yopal, Casanare, Colombia. 2017. Vol 8, Num 1.
- [8] SILOS RODRIGUEZ, José M. Manual de lucha contra la contaminación por hidrocarburos. España: Universidad de Cádiz. 2008.

- [9] MARTÍNEZ ALTAMIRANO María Elena. Remediación de agua contaminada con petróleo utilizando pennisetum clandestinum como bioadsorbente. Universidad Central del Ecuador, Quito, Junio 2013.
- [10] MOODLEY K, Singh R, T MUSAPATIKA, Onyango M and OCHIENG A. Removal of nickel from wastewater using an agricultural adsorbent. Water SA; 2011; Vol. 37: 5-17.
- [11] SUN RUN-Cang. Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels. 2010. 1a Ed. 35-52 p.
- [12] ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents. West Conshohocken: ASTM F726-06.
- [13] ALI, M. ELIYAS, H. AL-SARAWI, S.S. Radwan. Hydrocarbon-utilizing microorganisms naturally associated with sawdust. Chemosphere; 2011; Vol 83: 1268–1272
- [14] TATY-COSTODES, V. C., FAUDUET, H., Porte, C. and DELACROIX, A. Removal of Cd(II) and Pb(II) ions, from aqueous solutions, by adsorption onto sawdust of Pinus sylvestris. Journal of Hazardous Materials; 2003; Vol 105; 121-142.
- [15] SIERRA AGUILAR, Jaider. Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia. Universidad de Sucre. Sincelejo 2009.
- [16]. PEREIRA MARTÍNEZ, Ricardo, MUÑOZ PAREDES Juan F., PELUFFO ORDOÑEZ Diego H. Empleo del estropajo común (*Luffa cylindrica*) en la remoción de contaminantes. Revista de Investigación Agraria [en línea] junio 2017 ISSN 2145-6453. [Consultado 14 noviembre, 2018] Disponible en: <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1850/2069>.

BIBLIOGRAFÍA

ANDRADE RIVERA Carolina Estefanía. Tratamiento de aguas contaminadas con crudo utilizando quitosano como adsorbente. Universidad Central del Ecuador, Quito, 2015.

ALI, M. ELIYAS, H. AL-SARAWI, S.S. Radwan. Hydrocarbon-utilizing microorganisms naturally associated with sawdust. *Chemosphere*; 2011; Vol 83: 1268–1272

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents. West Conshohocken: ASTM F726-06.

CASTRO C. Allison, PINILLA P. Sebastián, Evaluación del rendimiento de adsorción del aserrín, en diferentes tamaños de grano, para la contingencia de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos. 2017.

JIMÉNEZ, Diana Lucia. Estudio de impacto ambiental generado por un derrame de hidrocarburos sobre una zona estuarina, aledaña al terminal de Ecopetrol en Tumaco. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia. 2006.

MNESES B Fátima, OLIVEIRA C Flavio A, OKEKE Benedict, Frankenberger-Júnior William T. Bioremediation of soil contaminated by diesel oil. *Brazilian Journal Microbiology*. 2003; Vol 34:65-68.

MERLIN, F., LE GUERROUÉ, P. Use of Sorbents for Spill Response. *Operational Guide*. Cendres. 1991; p. 7

MARTÍNEZ ALTAMIRANO María Elena. Remediación de agua contaminada con petróleo utilizando *pennisetum clandestinum* como bioadsorbente. Universidad Central del Ecuador, Quito, Junio 2013.

MOODLEY K, Singh R, T MUSAPATIKA, Onyango M and OCHIENG A. Removal of nickel from wastewater using an agricultural adsorbent. *Water SA*; 2011; Vol. 37: 5-17.

PEREIRA MARTÍNEZ, Ricardo, MUÑOZ PAREDES Juan F., PELUFFO ORDOÑEZ Diego H. Empleo del estropajo común (*Luffa cylindrica*) en la remoción de contaminantes. *Revista de Investigación Agraria* [en línea] junio 2017 ISSN 2145-6453. [Consultado 14 noviembre, 2018] Disponible en: <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1850/2069>

SIERRA AGUILAR, Jaider. Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia. Universidad de Sucre. Sincelejo 2009.

SUN RUN-Cang. Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels. 2010. 1a Ed. 35-52 p.

SILOS RODRIGUEZ, José M. Manual de lucha contra la contaminación por hidrocarburos. España: Universidad de Cádiz. 2008.

TATY-COSTODES, V. C., FAUDUET, H., Porte, C. and DELACROIX, A. Removal of Cd(II) and Pb(II) ions, from aqueous solutions, by adsorption onto sawdust of *Pinus sylvestris*. *Journal of Hazardous Materials*; 2003; Vol 105; 121-142.

VELÁSQUEZ ARIAS, Johana Andrea. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. Yopal, Casanare, Colombia. 2017. Vol 8, Num 1.

WUOTTO Vicente, PEMEX Exportación De Hidrocarburos 5 de septiembre de 2013 pág. 1 Ciudad de México. D.F.

ANEXOS

ANEXO A. Registro de pruebas por triplicado de adsorción en condiciones oleofílicas.

Tabla A.1. Pruebas de corta duración de la adsorción del aserrín, sobre la gasolina.

Malla	Peso inicial del adsorbente [g]	Peso adsorbente Post-prueba (g)	Peso hidrocarburo retirado por el adsorbente (g)	Capacidad de adsorción [g de hidrocarburo / g de aserrín]
4	4,06	24,30	5,51	1,36
	4,14	23,33	8,32	2,01
	4,06	23,03	8,16	2,01
8	4,051	20,513	11,690	2,886
	4,033	21,170	10,720	2,658
	4,026	19,190	9,716	2,414
10	4,600	17,341	15,842	3,444
	4,083	17,463	11,181	2,739
	4,344	18,916	12,626	2,907
16	4,422	10,300	22,743	5,143
	4,308	5,475	20,883	4,847
	4,020	10,927	22,084	5,493
20	7,366	5,461	21,926	2,977
	7,376	6,830	22,007	2,984
	7,377	12,143	17,856	2,421
30	7,360	1,393	25,194	3,423
	7,400	3,414	23,696	3,202
	7,300	3,844	22,909	3,138
40	7,381	1,310	22,569	3,058
	7,395	3,173	21,844	2,954
	7,408	3,043	25,502	3,443
Combinada	6,788	8,904	26,886	3,961
	6,893	6,224	22,960	3,331
	6,879	8,929	16,406	2,385

Tabla A.2. Pruebas de larga duración de la adsorción del aserrín, sobre la gasolina.

Malla	Peso inicial del adsorbente [g]	Peso adsorbente post- prueba [g]	Peso hidrocarburo retirado por el adsorbente (g)	Capacidad de adsorción [g de hidrocarburo / g de aserrín].
4	4,100	22,810	13,469	3,285
	4,051	20,492	10,899	2,690
	4,039	23,143	6,592	1,632
8	4,051	19,585	11,690	2,886
	4,033	21,170	10,702	2,654
	4,026	19,190	9,716	2,414
10	4,098	15,419	16,460	4,017
	4,073	13,272	13,258	3,255
	4,033	19,143	19,133	4,745
16	4,182	11,067	20,143	4,817
	4,863	10,104	20,003	4,114
	4,899	5,126	18,690	3,815
20	7,410	6,451	23,948	3,232
	7,350	2,885	21,207	2,885
	7,360	4,035	20,176	2,741
30	7,366	5,158	21,303	2,892
	7,410	0,092	21,435	2,893
	7,357	5,986	23,137	3,145
40	7,389	2,080	25,205	3,411
	7,375	2,148	21,914	2,971
	7,359	3,033	23,319	3,169
Combinada	6,788	9,099	26,846	3,955
	6,893	6,337	19,980	2,898
	6,879	9,929	16,373	2,380

Tabla A.3. Pruebas de corta duración de la adsorción de la cascarilla de arroz, sobre la gasolina.

Malla	Peso inicial del adsorbente [g]	Peso adsorbente post- prueba [g]	Peso hidrocarburo retirado por el adsorbente (g)	Capacidad de adsorción [g de hidrocarburo / g de cascarilla]
10	6,814	16,635	12,948	1,900
	6,786	16,780	9,696	1,429
	6,795	18,181	11,105	1,634
16	7,213	15,383	14,031	1,945
	7,238	14,865	14,181	1,959
	7,087	12,798	18,044	2,546
20	8,703	10,626	15,251	1,752
	8,531	9,552	15,392	1,804
	8,747	9,167	16,812	1,922
30	9,002	9,062	17,126	1,902
	9,049	10,599	17,433	1,927
	9,056	11,780	16,437	1,815
40	9,233	11,654	17,075	1,849
	9,542	11,435	16,804	1,761
	9,787	9,420	17,512	1,789
combinada	8,112	13,264	20,055	2,472
	8,110	12,212	15,859	1,955
	8,100	13,753	9,597	1,185

Tabla A.4. Pruebas de larga duración de la adsorción de la cascarilla de arroz, sobre la gasolina.

Malla	Peso inicial del adsorbente [g]	Peso adsorbente post- prueba [g]	Peso hidrocarburo retirado por el adsorbente (g)	Capacidad de adsorción [g de hidrocarburo / g de cascarilla]
10	6,433	15,732	11,787	1,832
	6,432	20,096	9,795	1,523
	6,435	20,668	11,806	1,835
16	7,794	18,903	16,762	2,151
	7,967	13,977	14,184	1,780
	7,686	12,074	19,577	2,547
20	8,661	13,051	13,260	1,531
	8,555	10,493	16,580	1,938
	8,627	10,610	14,621	1,695
30	9,001	14,042	16,797	1,866
	9,001	6,247	15,311	1,701
	9,002	11,252	14,165	1,573
40	9,047	7,413	16,618	1,837
	9,030	7,524	15,400	1,705
	9,034	10,792	13,811	1,529
Combinada	8,167	14,264	16,015	1,961
	8,210	15,133	15,212	1,853
	8,198	14,656	12,281	1,498

Tabla A.5. Pruebas de corta duración de la adsorción del estropajo natural, sobre la gasolina.

Malla	Peso inicial del adsorbente [g]	Peso adsorbente post- prueba [g]	Peso hidrocarburo retirado por el adsorbente (g)	Capacidad de adsorción [g hidrocarburo / g estropajo]
10	3,452	26,228	8,348	2,418
	3,456	26,297	4,274	1,237
	3,541	25,868	6,624	1,871
20	3,325	21,252	6,692	2,012
	3,548	20,774	5,630	1,587
	3,459	21,218	7,610	2,200
30	4,096	11,236	13,506	3,297
	4,065	11,300	14,476	3,561
	4,021	14,363	16,478	4,098
40	6,312	4,748	22,221	3,521
	6,517	4,024	21,164	3,248
	6,467	8,572	18,718	2,894
Combinada	5,786	12,081	13,939	2,409
	5,674	13,104	16,403	2,891
	5,534	15,076	15,602	2,819

Tabla A.6. Pruebas de larga duración de la adsorción del estropajo natural, sobre la gasolina.

Malla	Peso inicial del adsorbente [g]	Peso adsorbente post- prueba [g]	Peso hidrocarburo retirado por el adsorbente (g)	Capacidad de adsorción [g de hidrocarburo / g de estropajo]
10	3,493	23,110	7,891	2,259
	3,272	27,676	6,677	2,041
	3,655	22,376	6,511	1,781
20	3,477	14,209	5,926	1,704
	3,855	16,069	8,888	2,306
	3,251	23,611	7,392	2,274
30	4,012	11,243	14,522	3,619
	4,002	10,425	12,887	3,220
	4,012	12,871	15,713	3,916
40	6,089	3,366	25,489	4,186
	6,014	2,512	23,380	3,888
	6,103	1,671	20,132	3,299
Combinada	5,786	9,825	14,733	2,546
	5,674	14,880	20,875	3,679
	5,534	12,369	21,511	3,887

Tabla A.7. Pruebas de corta duración de la adsorción de la cascarilla de arroz, sobre el diesel.

Malla	Peso inicial del adsorbente [g]	Peso adsorbente post- prueba [g]	Peso hidrocarburo retirado por el adsorbente (g)	Capacidad de adsorción [g de hidrocarburo / g de estropajo]
10	6,606	20,601	15,521	2,350
	6,508	18,898	13,676	2,101
	6,883	20,805	15,196	2,208
16	7,165	12,696	18,009	2,514
	7,043	18,261	20,101	2,854
	7,128	14,146	22,382	3,140
20	8,662	10,893	18,881	2,180
	8,738	13,088	19,512	2,233
	8,768	15,301	15,027	1,714
30	9,001	13,099	15,835	1,759
	9,002	13,783	15,158	1,684
	9,009	14,950	19,141	2,125
40	9,490	7,292	17,108	1,803
	9,218	10,168	17,722	1,923
	9,583	14,870	23,569	2,460
Combinada	8,088	19,194	23,104	2,856
	8,078	14,261	15,088	1,868
	8,083	12,794	17,543	2,170

Tabla A.8. Pruebas de larga duración de la adsorción de la cascarilla de arroz, sobre el diesel.

Malla	Peso inicial del adsorbente [g]	Peso adsorbente post-prueba [g]	Peso hidrocarburo retirado por el adsorbente [g]	Capacidad de adsorción [g de hidrocarburo / g de estropajo]
10	6,454	22,767	16,270	2,521
	6,468	15,921	14,017	2,167
	6,430	16,612	16,863	2,622
16	7,315	10,644	24,769	3,386
	7,574	12,904	23,426	3,093
	7,448	12,947	22,272	2,990
20	8,628	14,043	18,517	2,146
	8,667	11,600	14,065	1,623
	8,544	13,996	18,397	2,153
30	9,003	10,553	19,797	2,199
	9,004	13,962	19,575	2,174
	9,005	13,738	19,347	2,148
40	9,475	10,537	26,730	2,821
	9,235	4,840	22,597	2,447
	9,235	14,399	16,470	1,783
Combinada	8,088	18,194	19,004	2,350
	8,078	14,946	19,029	2,356
	8,083	12,741	19,443	2,405

Tabla A.9. Pruebas de corta duración de la adsorción del estropajo natural, sobre el diesel.

Malla	Peso inicial del adsorbente [g]	Peso adsorbente post-prueba (g)	Peso hidrocarburo retirado por el adsorbente (g)	Capacidad de adsorción [g de hidrocarburo / g de estropajo]
10	2,840	30,522	6,100	2,148
	2,805	29,758	7,367	2,627
	2,874	28,708	9,782	3,404
20	3,176	24,614	11,383	3,584
	3,279	23,922	6,236	1,902
	3,071	22,158	4,934	1,607
30	4,096	16,500	15,476	3,778
	4,070	17,294	14,473	3,556
	3,927	11,749	11,739	2,989
40	6,075	7,864	30,328	3,992
	6,107	8,810	28,700	3,700
	6,224	7,909	28,100	3,515
Combinada	5,678	21,050	18,868	3,323
	5,572	13,412	17,780	3,191
	5,003	13,709	20,611	4,120

Tabla A.10. Pruebas de larga duración de la adsorción del estropajo natural, sobre el diesel.

Malla	Peso inicial del adsorbente [g]	Peso adsorbente Post-prueba [g]	Peso hidrocarburo retirado por el adsorbente [g]	Capacidad de adsorción [g de hidrocarburo / g de estropajo]
10	2,901	28,425	15,180	5,232
	2,894	23,423	8,124	2,807
	2,984	27,210	2,375	0,796
20	3,216	20,614	10,399	3,234
	3,256	22,922	9,236	2,837
	3,214	19,158	9,934	3,091
30	4,125	17,861	16,471	3,993
	4,012	12,300	16,265	4,054
	4,015	10,709	13,739	3,422
40	6,081	8,119	22,813	3,751
	6,012	5,120	19,996	3,405
	6,013	7,128	22,725	4,462
combinada	5,782	11,524	23,685	4,096
	5,872	13,938	19,996	3,405
	5,093	11,555	22,725	4,462

ANEXO B Balance de masa de las pruebas hechas con gasolina.

Tabla B1. Balance de masa de la gasolina con aserrín durante las pruebas.

Tamaño de grano [mm]	Gasolina Inicial [g]	Gasolina remanente [g]	Gasolina removida por el adsorbente [g]	Gasolina removida más remanente [g]	Pérdidas %
Pruebas cortas (15 minutos)					
4,75	35,52	23,55	10,61	34,16	3,82
2,38	32,96	20,29	10,70	30,99	5,96
2,00	33,12	17,91	13,22	31,12	6,02
1,16	33,83	8,90	21,73	30,63	9,48
0,84	31,16	8,14	20,60	28,74	7,76
0,59	28,71	2,88	23,93	26,82	6,58
0,42	27,77	2,51	23,30	25,81	7,06
Combinado	31,45	8,02	22,08	30,10	4,29
Pruebas largas (24 horas)					
4,75	34,68	22,15	10,34	32,49	6,33
2,38	33,41	18,77	11,35	30,12	9,86
2,00	34,03	14,74	16,28	31,02	8,83
1,16	34,42	8,77	23,30	32,07	6,82
0,84	27,80	4,46	21,78	26,23	5,65
0,59	28,13	3,75	21,96	25,70	8,62
0,42	28,16	2,42	23,48	25,90	8,04
Combinado	31,45	8,45	21,07	29,52	6,13

Tabla B2. Balance de masa de gasolina con la cascarilla de arroz durante las pruebas.

Tamaño de grano [mm]	Gasolina Inicial [g]	Gasolina remanente [g]	Gasolina removida por el adsorbente [g]	Gasolina removida más remanente [g]	Pérdidas (%)
Pruebas cortas (15 minutos)					
2	31,09	17,20	11,25	28,45	8,49
1,16	33,38	14,35	15,42	29,77	10,83
0,84	27,45	9,78	15,82	25,60	6,74
0,59	28,92	10,48	17,00	27,48	4,99
0,42	29,02	10,84	17,13	27,97	3,63
Combinado	31,04	13,08	15,17	28,25	9,01
Pruebas largas (24 horas)					
2	32,17	18,83	11,13	29,96	6,86
1,16	33,81	14,98	16,84	31,83	5,87
0,84	29,59	11,38	15,82	27,20	8,08
0,59	28,34	10,51	15,42	25,94	8,47
0,42	28,18	8,58	17,13	25,71	8,79
Combinado	31,71	14,68	14,50	29,19	7,95

Tabla B3. Balance de masa de la gasolina con estropajo natural durante las pruebas.

Tamaño de grano [mm]	Gasolina Inicial [g]	Gasolina remanente [g]	Gasolina removida por el adsorbente [g]	Gasolina removida más remanente [g]	Pérdidas %
Pruebas cortas (15 minutos)					
2	33,37	26,13	6,03	32,16	3,60
0,84	29,45	21,08	6,64	27,73	5,84
0,59	28,05	12,30	14,82	27,12	3,31
0,42	27,90	5,78	20,70	26,48	5,07
Combinado	31,83	13,42	15,31	28,73	9,73
Pruebas largas (24 horas)					
2	32,88	24,39	6,03	30,42	7,48
0,84	27,28	17,96	7,40	25,37	7,02
0,59	28,14	11,51	14,39	25,90	7,95
0,42	27,32	2,52	23,00	25,52	6,59
Combinado	33,13	12,36	19,04	31,40	5,23

ANEXO C. Balance de masa sobre el diesel.

Tabla C1. Balance de masa del diesel con la cascarilla de arroz durante las pruebas.

Tamaño de grano [mm]	Diesel Inicial [g]	Diesel remanente [g]	Diesel removido por el adsorbente [g]	Diesel removido más remanente [g]	Pérdidas %
Pruebas cortas (15 minutos)					
2	37,125	20,101	14,798	34,899	6,00
1,16	36,587	15,034	20,164	35,198	3,79
0,84	33,063	13,094	17,807	30,901	6,54
0,59	33,008	13,944	16,711	30,655	7,13
0,42	33,198	10,777	19,467	30,243	8,90
Combinado	35,589	15,416	18,578	33,994	4,48
Pruebas largas (24 horas)					
2	36,86	18,43	15,72	34,15	7,34
1,16	36,84	12,17	23,49	35,65	3,21
0,84	32,68	13,21	16,99	30,21	7,58
0,59	33,74	12,75	19,57	32,32	4,19
0,42	32,46	9,93	21,93	31,86	1,87
Combinado	36,92	15,29	19,16	34,45	6,69

Tabla C2. Balance de masa del diesel con el estropajo natural durante las pruebas.

Tamaño de grano [mm]	Diesel Inicial [g]	Diesel remanente [g]	Diesel removido por el adsorbente [g]	Diesel removido más remanente [g]	Pérdidas %
Pruebas cortas (15 minutos)					
2	38,99	29,66	7,75	37,41	4,05
0,84	33,19	23,56	7,52	31,08	6,35
0,59	31,43	15,18	13,90	29,08	7,50
0,42	32,23	8,19	22,91	31,10	3,51
Combinado	35,70	16,06	18,26	34,32	3,87
Pruebas largas (24 horas)					
2	36,96	26,35	8,56	34,91	5,54
0,84	31,25	20,90	9,86	30,75	1,59
0,59	31,20	13,62	15,49	29,11	6,69
0,42	32,64	6,79	22,94	29,73	8,93
Combinado	36,03	12,34	22,14	34,47	4,33