

# INTRODUCCIÓN

## ANTECEDENTES

Es prácticamente imposible determinar con exactitud cuándo el hombre comenzó a utilizar los materiales de carbón, lo cierto es que antes del uso de lo que en la actualidad denominamos carbones activos, es decir carbones con una estructura porosa altamente desarrollada, ya se emplearon como adsorbentes el carbón vegetal, o simplemente maderas parcialmente desvolatilizadas o quemadas.

Según Menéndez J. A., (2006), los primeros usos de carbón activo, generalmente preparados a partir de madera carbonizada (carbón vegetal), parecen haber tenido aplicaciones médicas. Así, en Tebas (Grecia) se halló un papiro que data del año 1550 a.C. en el que se describe el uso de carbón vegetal como adsorbente para determinadas prácticas médicas. Con posterioridad, en el año 400 a.C., Hipócrates recomienda filtrar el agua con carbón vegetal para eliminar malos olores y sabores y para prevenir enfermedades. En relación al tratamiento del agua con carbón activo, se sabe que ya 450 años a.C. en los barcos fenicios se almacenaba el agua para beber en barriles con la madera parcialmente carbonizada por su cara interna, esta práctica se continuó hasta el siglo XVIII como medio para prolongar el suministro de agua en los viajes transoceánicos. Sin embargo, la primera aplicación documentada del uso de carbón activo en fase gas no tiene lugar hasta el año 1793, cuando el Dr. D. M. Kehl utiliza el carbón vegetal para mitigar los olores emanados por la gangrena. El mismo doctor también recomienda filtrar el agua con carbón vegetal. (Menéndez J. A., 2006).

Pese a estos avances, Menéndez J. A. (2006), afirma que la primera aplicación industrial del carbón activo tuvo lugar en 1794, en Inglaterra, utilizándose como agente decolorizante en la industria del azúcar, esta aplicación permaneció en secreto por 18 años hasta que en 1812 apareció la primera patente. En 1854 tiene lugar la primera aplicación a gran escala del carbón activo, cuando el alcalde de Londres ordena instalar filtros de carbón vegetal en los sistemas de ventilación de las cloacas.

En 1872 aparecen las primeras máscaras con filtros de carbón activo utilizadas en la industria química para evitar la inhalación de vapores de mercurio. (Menéndez J. A., 2006).

Sin embargo, según Rodríguez F., (2002), el término adsorción no fue utilizado hasta 1881 por Kayser para describir como los carbonizados atrapaban los gases. Aproximadamente por estas fechas R. Von Ostrejko, considerado el inventor del carbón activo, desarrolla varios métodos para producir carbón activo tal y como se conoce en nuestros días, más allá de simples carbonizados de materiales orgánicos o del carbón vegetal. Así, en 1901 patentó dos métodos diferentes para producir carbón activo. El primero consistía en la carbonización de materiales lignocelulósicos con cloruros de metales; lo cual resultó la base de lo que hoy en día es la activación química. En el segundo, proponía una gasificación suave de materiales previamente carbonizados con vapor de agua o CO<sub>2</sub>; es decir una activación física, o más correctamente térmica. (Rodríguez F., 2002).

Según Orozco M. (1996), en la primera mitad del siglo XIX ya se utilizaba en América filtros de carbón vegetal en las plantas de tratamiento de aguas. El carbón activado en polvo denominado CAP, se utilizó por primera vez para aguas públicas en New Jersey, EEUU, en 1930, durante las siguientes décadas, el interés de la adsorción como proceso para eliminar compuestos orgánicos presentes en las aguas potables aumentó progresivamente, junto a la creciente preocupación sobre la contaminación de los recursos hídricos debida a los residuos industriales, productos químicos usados en la agricultura y de las descargas de las alcantarillas. (Orozco M. 1996).

En la ciudad de Tarija, así como en el resto del país, la mayor aplicación del carbón activo está en el tratamiento de aguas, así como en la decoloración de jarabes y bebidas. Asimismo se cuenta con dos plantas embotelladoras de bebidas gaseosas que son las mayores consumidoras de carbón activado, la planta CASCADA DEL SUR S.A. y EMBOL S.A. Además de éstas, también existen otras empresas tales como embotelladoras de agua mineral, cervecería, bodegas de vinos, de tratamiento de aguas servidas, etc., que también utilizan este producto en menor cantidad.

## JUSTIFICACIÓN

- El carbón activo es un adsorbente poderoso, atóxico y con un gran valor agregado, que no es nocivo para el organismo, es por ello que tiene un sinnúmero de aplicaciones en la industria química, farmacéutica y alimenticia, principalmente. Al producir el carbón activo se puede coadyuvar al desarrollo de las industrias anteriormente mencionadas.
- Bolivia contribuye con el 1.28% de la cobertura forestal mundial (53 millones de 4135 millones de hectáreas), lo cual representa el 48% de la superficie total del país. Esto representa casi el 10% de los bosques tropicales existentes en América del Sur. (UDAPE, 2000). Aunque existen más de 200 especies maderables en el país hasta el momento, las variedades de madera más explotadas son el cedro (*Cedrela fissilis*), la mara (*Swietenia macrophylla*) y el roble (*Amburana cearensis*), con una explotación de 8, 7 y 5 millones de m<sup>3</sup>/año, respectivamente y que además de toda la madera procesada en el país, aproximadamente el 25% se convierte en residuos forestales.
- Solamente en el departamento de Tarija, existen más de 50 procesadoras de madera (barracas, aserraderos y carpinterías), las cuales en conjunto, generan alrededor de 400 toneladas de residuos madereros anualmente.
- El 100% del carbón activo utilizado por las empresas, instituciones, y personas que requieren de este producto, es importado de otros países tales como la Argentina, Estados Unidos u otros, a precios que varían desde 10 a 50 dólares el kilogramo, lo que influye de forma negativa en la economía del país, que por el contrario se podría pensar en montar una planta de fabricación de carbón activo, que aportaría a nuestra economía.
- En la región existen diferentes industrias que utilizan carbón activado, las cuales en su mayoría son elaboradoras de bebidas con y sin alcohol. Según entrevistas realizadas a diferentes empresas de la región, se estima que solamente en la ciudad de Tarija se consume alrededor de 10 toneladas de carbón activado cada año, 3 toneladas son consumidas por CASCADA DEL SUR S. A., otras 3

toneladas por EMBOL S. A., CBN TARIJA S.A. consume anualmente 1 tonelada y las tres restantes son consumidas por los laboratorios, bodegas, plantas de tratamiento de agua, particulares, etc. Asimismo, se estima una ampliación de todas las industrias en el departamento, de hasta un 100% en los próximos 5 años, debido al constante crecimiento poblacional.

### **OBJETIVO GENERAL**

Obtener carbón activo a partir de residuos de la madera a escala de laboratorio

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las variables del proceso de obtención, de acuerdo a criterios técnicos y al método utilizado
- Realizar experimentos de obtención, a partir de los diversos tratamientos, resultantes de la combinación de todas las variables del proceso
- Encontrar los rendimientos en peso que se logra a partir de cada tratamiento
- Determinar en función de criterios técnicos y estadísticos, cual es el tratamiento más conveniente para la obtención de carbón activo
- Realizar la comparación de las propiedades adsorptivas del mejor carbón obtenido en laboratorio, con un carbón industrial utilizado en la industria

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1.- GENERALIDADES

El nombre de carbón activado se aplica a una serie de carbones porosos preparados artificialmente para que exhiban un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna. Estas características son las responsables de sus propiedades adsorbentes, que son utilizadas ampliamente en muchas aplicaciones tanto en fase gas como en fase líquida.

Según Menéndez J. A. (2006), el carbón activado es un adsorbente muy versátil, porque el tamaño y la distribución de sus poros en la estructura carbonosa pueden ser controlados para satisfacer las necesidades de la tecnología actual y futura. Más aún, las necesidades específicas de la industria pueden ser satisfechas mediante la posibilidad de preparar estos materiales con una gran variedad de formas físicas, tales como polvo, granular, extrusionado, fibra, fieltro e incluso tela. Por otra parte, mediante la adecuada selección del precursor, el método de activación y control de las variables del proceso de fabricación, las propiedades adsorbentes del producto pueden ser adaptadas para satisfacer necesidades tan diversas como la purificación de aguas potables, o el control de las emisiones de gasolina en automóviles. (Menéndez J. A., 2006).

Rodríguez F., (2002), dice que generalmente la estructura de los materiales carbonaceos de partida es solo ligeramente porosa. Una vez aplicado un procedimiento adecuado de activación, se obtiene un producto que se denomina carbón activado, lo que denota un material con una estructura de poros interna accesible y bien desarrollada. De acuerdo con el procedimiento de activación empleado, se obtiene un material con un área superficial interna que puede oscilar entre 500 y 1500 m<sup>2</sup>/g, lo cual lo convierte en un adsorbente por excelencia, utilizado en innumerables procesos tecnológicos que abarcan diferentes industrias tales como la alimenticia, la biofarmacéutica y la metalúrgica. (Rodríguez F., 2002).

Menéndez J. A., (2006), menciona que la superficie específica y las dimensiones de los poros dependen del precursor y de las condiciones de los procesos de carbonización y activación utilizados. Los tamaños de los poros van desde los más pequeños, llamados microporos (hasta 2nm), hasta los mesoporos (de 2 a 50nm) y macroporos (mayores de 50nm). Hay que tener en cuenta que aunque la mayor parte de la adsorción tiene lugar en los microporos (responsables de más del 90% de la superficie específica), los mesoporos y los macroporos son extraordinariamente importantes en los carbones activados, porque son los que facilitan el acceso de las especies que se van a adsorber al interior de la partícula y a los microporos. Sin embargo, las propiedades adsorbentes de un carbón activado no sólo están definidas por su estructura porosa, sino también por su naturaleza química. El carbón activado presenta en su estructura átomos de carbono con valencia insaturada y, además, grupos funcionales (principalmente de oxígeno y nitrógeno) y componentes inorgánicos responsables de las cenizas, todos ellos con un efecto importante en los procesos de adsorción. (Menéndez J. A., 2006).

Rodríguez F., (2002), comenta que los grupos funcionales se forman durante el proceso de activación por interacción de los radicales libres de la superficie del carbón con átomos tales como oxígeno y nitrógeno, que pueden en parte provenir del precursor o de la atmósfera. Estos grupos funcionales hacen que la superficie del carbón se haga químicamente reactiva y esa es la razón por la que afectan las propiedades adsorbentes, especialmente para moléculas de cierto carácter polar. Así, el carbón activado puede ser considerado en principio como hidrófobo por su poca afinidad por el agua, lo que es muy importante en aplicaciones como la adsorción de gases en presencia de humedad, o de especies en disolución acuosa; pero la presencia de grupos funcionales en la superficie del carbón activado hace que puedan interactuar con el agua, haciendo que la superficie sea más hidrófila. Más aún, la oxidación de un carbón, que es inherente a la fabricación del carbón activado, resulta en la formación de grupos de hidroxilo, carbonilo, carboxilo, etc., que le dan al carbón activado un carácter anfotérico, por lo que puede ser ácido o básico. Además de influir en la adsorción de muchas moléculas, los grupos superficiales de

oxígeno contribuyen a la reactividad de los carbones activados hacia ciertos disolventes en aplicaciones como la recuperación de disolventes. (Rodríguez F., 2002).

**Cuadro I -1**  
**Características del carbón activo según el precursor utilizado**

Propiedad	Coco	Carbón Mineral	Lignito	Madera
Microporo	Alto	Alto	Mediano	Bajo
Macroporo	Bajo	Mediano	Alto	Alto
Dureza	Alta	Alta	Baja	Mediana
Cenizas	5%	10%	20%	5%
Cenizas Solubles en Agua	Alta	Baja	Alta	Mediana
Polvo	Bajo	Mediano	Alto	Mediano
Regeneración	Buena	Buena	Pobre	Regular
Densidad Aparente	0,42 g/cc	0,48 g/cc	0,3 g/cc	0,35 g/cc
Índice de Yodo	1100	1000	600	100

Fuente: Vergara F., 2002

## **1.2.- CLASIFICACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO SEGÚN SU FORMA FÍSICA**

El carbón activo puede tener forma de gránulos irregulares, polvo o pellets, como así también se pueden encontrar otras formas como hilos, fibras y telas de carbón activo, como se muestra en la figura 1-1. (Menéndez J. A., 2006).



**Figura 1-1.-** *Diferentes formas de carbón activo*

### **1.2.1.- EL CARBÓN ACTIVO GRANULAR**

Consiste en gránulos de forma irregular que se instalan dentro de un recipiente por el que se hace circular el líquido o gas que va a tratarse. Mientras menores son las partículas de carbón, trabajan con una rapidez sustancialmente mayor, aunque también causan una mayor caída de presión en el fluido.

### **1.2.2.- EL CARBÓN ACTIVO EN POLVO**

Se define como aquel carbón cuyas partículas pasan a través de la malla 80 (apertura 0.177mm). Debido a su tamaño, no puede emplearse en el tratamiento de gases. Se adiciona al líquido en un tanque agitado: después de un tiempo que suele ser de entre 10 y 30 minutos, se deja sedimentar o se separa por medio de un filtro. Como ventaja frente al carbón activo granular es la velocidad a la que trabaja.

### **1.2.3.- EL CARBÓN ACTIVO PELETIZADO**

El carbón activo puede pulverizarse y posteriormente peletizarse bajo presión o con la ayuda de agentes ligantes, como brea, alquitranes y glucosa. Los pellets suelen ser cilíndricos, normalmente se produce por extrusión. Su principal ventaja consiste en que causan una menor caída de presión que los granulares, lo cual lo hacen muy útiles en la purificación de gases en la que existe una baja presión disponible, la principal desventaja es su mayor coste de fabricación.

### **1.3.- APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVO**

El carbón activado es el adsorbente más versátil por su alta superficie específica, distribución polimodal de tamaños de poro, estructura porosa en forma de rendija y por su capacidad de presentar diferentes tipos de naturaleza química en su superficie. Es necesario mencionar que aunque sólo alrededor de un 20% del carbón activado producido está destinado a aplicaciones en fase gaseosa, suele ser mucho más caro, y en cuanto a costo supone alrededor del 40% del valor total del carbón activado vendido. (Menéndez J. A., 2006).

Según Rodríguez F., (2002), los carbones usados en aplicaciones en fase gas deben tener una microporosidad muy desarrollada para presentar una alta capacidad adsorbente frente a gases y vapores, con áreas superficiales superiores a  $1000\text{m}^2/\text{g}$ . Además, estos carbones deben presentar una alta capacidad adsorbente por unidad de volumen, alta capacidad de retención en presencia de humedad, baja resistencia al flujo de gases y una fácil liberación de los compuestos adsorbidos durante la regeneración. Los carbones activados que se utilizan en aplicaciones en fase líquida difieren fundamentalmente de los de fase gaseosa en la distribución de tamaños de poros, puesto que los primeros deben tener un mayor volumen de macroporos para facilitar la difusión de los líquidos a los meso y microporos. (Rodríguez F., 2002).

La aplicación puede requerir carbón activado en polvo, granular o conformado (el tamaño medio del carbón en polvo es 15-20nm, mientras que el granular suele ser 0,3

a 3,0mm, y la selección se basa fundamentalmente en el grado de purificación que se requiera, por ejemplo: (Rodríguez F., 2002).

- Los granulares o conformados se suelen utilizar cuando se utiliza flujo continuo en lechos profundos, para eliminar esencialmente los contaminantes del líquido que se va a purificar, y son los preferidos cuando se pueden esperar picos en la concentración de los contaminantes.
- Los carbones activos en polvo son más efectivos y se puede conseguir un mayor intervalo de eliminación de impurezas en discontinuo (batch), el cual se dosifica en función de la concentración de las impurezas que deben ser eliminadas.

En la tabla I-1 se resumen también los porcentajes de algunos de los usos del carbón activado.

**Tabla I -1**  
**Usos del carbón activado en el mundo**

	<b>PESO %</b>	<b>INCREMENTO ANUAL</b>
Producción Mundial	100	8.01
<b>Adsorción en fase líquida</b>	85	8.04
Decoloración de azúcar	20	1.05
Tratamiento de agua potable	25	5.5
Tratamiento de aguas albañales	10	8.5
Tratamiento de aguas contaminadas	30	3.0
<b>Adsorción en fase gaseosa</b>	15	5.8
Tratamiento de gases industriales	5	8.5
Purificación de aire	7	5.5
Otros usos	3	2.0
<b>TOTAL</b>	100	

Fuente: Marín, Granadillo, Correa, 1988.

### **1.3.1.- CARBÓN ACTIVO PROCEDENTE DE LA MADERA**

Los carbones activados procedentes de la madera se utilizan principalmente para tratar aguas residuales con colores intensos y/o con cantidades sustanciales de grasas, aceites y otros compuestos de alto peso molecular, en la potabilización de agua superficial con alto contenido de materia orgánica natural, decolorar soluciones de azúcar y otros alimentos y para quitar sabores y olores desagradables del agua.

### **1.4.- LA MATERIA PRIMA**

La materia prima que se va a utilizar en el presente trabajo, es el residuo de madera de cedro, que se produce en la región, debido a la industria maderera que se practica. Se escogió la madera de cedro, puesto que es la especie de madera, más explotada y utilizada en el país, debido a su calidad y a que tiene un costo medianamente accesible. (Pérez D. N., Márquez M. F., Autié P. M. 2005).

#### **1.4.1.- PRINCIPALES ESPECIES FORESTALES**

Las principales especies forestales y de mayor aprovechamiento en el país son, la mara (*Swietenia macrophylla*), roble (*Amburana cearensis*) y cedro (*Cedrela fissilis*), aunque existen más de 134 especies maderables que aún no se explotan tanto como las mencionadas. (Cámara Forestal de Bolivia 2000).

#### **1.4.2.- DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIONES DE LA MATERIA PRIMA**

##### **1.4.2.1.- EL CEDRO**

El cedro misionero o ygary ([Cedrela fissilis](#)), es una [especie botánica](#) de [árbol](#) de la clase [dicots](#), familia de las [Meliáceas](#) de regiones tropicales y subtropicales de [América](#). Otros nombres son: cedro, cedro real (Costa Rica). (Cámara Forestal de Bolivia 2000).

##### **Nombre común**

- Cedro misionero, ygary, ygaí, cedro colorado

### ***Origen y dispersión***

Originario de América Central y de Sudamérica. Es un árbol de forestas tropicales y subtropicales húmedas y secas. No resiste bien ni heladas ni sequías.

El Género Cedrela comprende 7 especies repartidas en América tropical, de las cuales cinco son endémicas de Argentina.

### ***Descripción botánica***

El cedro misionero es un árbol del orden de las Sapindales familia de las Meliáceas de regiones tropicales y subtropicales de América, tiene un fuste importante que puede alcanzar 30m de altura. El tronco puede medir 10-15dm de diámetro. Con hojas paripinadas, de 4-6dm de largo, 12-15 folíolos; raquis pubescente de 4-6dm de largo y pecíolo pubescente de 7-9cm de largo, de color rojizo en las hojas juveniles. Folíolos de 10-15cm largo por 4 a 5cm de ancho (basales elípticos y apicales oblongos con ápice agudo), con pubescencia inconspicua sobre los nervios medio, secundarios basales y márgenes, envés tomentoso, sésiles a subsésiles, peciólulos pubescentes de 2mm largo. Panícula de 27-35cm largo. Flores de 8-9mm de largo, pentámeras; cáliz de 2-2,5mm de largo, pubescente, 5-6-dentado y hendidura longitudinal hasta la base; pétalos de 7-8mm de largo, pubescentes, oblongos. El androginóforo es columnar, de 3-4mm de largo x 1-1,2mm ancho, 5-costado; estambres de 3-3,5mm de largo, con anteras de 1mm de largo; ovario de 1,2mm de largo, pentalobulado; estilo de 1,5-2mm de largo; estigma capitado, de 1-1,3mm de ancho. El fruto es una cápsula piriforme, de 5,5-10cm de largo, valvas de 1,5-1,8cm de ancho, columna central de 7-9mm de diámetro con ápice agudo o truncado, pericarpo de 5mm de espesor, epicarpio pardo oscuro con lenticelas ocreas prominentes regularmente distribuidas en toda la superficie. Semillas pardas-rojizas de 2,5-2,7cm de largo, con ala de 1,5-1,8cm, gruesa, no translúcida.

### ***Silvicultura***

Una especie importante de la selva, se presenta con alta frecuencia y abundancia en toda el área cubierta por bosque alto. Coloniza donde existe suficiente luz para realizar un crecimiento rápido.

- Diámetro (cm/año): 0,69
- Altura (m/año): 0,9
- Volumen (m<sup>3</sup>/año): 0,04

Se planta cedro a densidades de humedad bajas, porque una alta trae el hongo *Hipsiphyla grandella*.

### ***Fenología***

Florece de agosto a octubre; fructifica de noviembre a febrero.

### ***Uso***

Su madera de color castaño rojizo, es muy apreciada por su calidad, se usa en toda clase de trabajos de carpintería, mueblería, revestimientos y construcciones navales. Es una madera liviana a semipesada con características físico-mecánicas muy buenas, y excelente estabilidad dimensional.

### ***Rollizo***

- Longitud útil: 9 a 11m
- Diámetro promedio: 6dm

### ***Características técnicas***

- moderadamente dura
- semipesada
- contracciones moderadas
- poco penetrable

La corteza es febrífuga. Es un árbol melífero.

## **1.5.- PROCESOS DE OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVO**

Los procesos de obtención se pueden dividir en dos tipos: activación física (también llamada térmica) y activación química. La porosidad de los carbones preparados mediante activación física es el resultado de la gasificación del material carbonizado a temperaturas elevadas, mientras que la porosidad que se obtiene en activación química es generada por reacciones de deshidratación química, que tienen lugar a temperaturas mucho más bajas. (Rodríguez F., 2002).

### **1.5.1.- ACTIVACIÓN FÍSICA**

Llamada también activación térmica, a pesar de que la activación se produce por la reacción (química) del agente activante (un oxidante como el aire, vapor de agua, CO<sub>2</sub>, etc.) con el carbono del material que está siendo activado. Este tipo de activación consta de varias etapas. Así, a veces son necesarios ciertos pretratamientos como la molienda y el tamizado para obtener un tamaño adecuado del precursor. Si el precursor es un carbón coquizable será necesario entonces una etapa de oxidación para eliminar las propiedades coquizables. En otras ocasiones el material de partida es molido hasta formar un fino polvo, después compactado con algún aglomerante en forma de briquetas y luego vuelto a moler hasta obtener el tamaño deseado. De esta forma se consigue una mejor difusión del agente activante y por tanto una mejor porosidad en el carbón activado resultante. Otra etapa previa a la activación propiamente dicha es la [carbonización](#), en la cual el precursor es sometido a elevadas temperaturas (del orden de los 800°C) en ausencia de aire, para eliminar las sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso que será el que se someta a la activación.



**Figura 1.2.-** Diagrama de la activación física

Durante la desvolatilización, la salida de los gases y vapores del precursor produce una porosidad “incipiente” en el carbonizado, la cual se desarrolla aun más durante la etapa de activación. La activación propiamente dicha puede ser un proceso totalmente independiente de la carbonización o llevarse a cabo a continuación de ésta. Consiste en hacer reaccionar al agente activante con los átomos de carbono del carbonizado que está siendo activado; de forma que se produzca un “quemado selectivo” que va horadado progresivamente al carbonizado, generando poros y aumentando la porosidad hasta transformarlo en un carbón activado. Los agentes activantes que se suelen usar son: Oxígeno (raramente a escala industrial) aire, vapor de agua (el más usado) y CO<sub>2</sub>. Estos agentes dan lugar a las siguientes reacciones químicas que eliminan átomos de carbono produciendo así la porosidad.

**Cuadro I-2**

**Reacciones químicas producidas durante la activación física**

$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$C + H_2O \rightleftharpoons H_2 + CO$
$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$

Fuente: Menéndez J. A., 2006

### 1.5.2.- ACTIVACIÓN POR DESHIDRATACIÓN QUÍMICA

En este tipo de activación el precursor se hace reaccionar con un agente químico activante. En este caso la activación suele tener lugar en una única etapa a temperaturas que pueden variar entre 450 y 900°C. No obstante, en este tipo de activación, es necesaria una etapa posterior de lavado del carbón activado para eliminar los restos del agente activante. Existen numerosos compuestos que podrían ser usados como agentes activantes, sin embargo los más usados industrialmente son el cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ), el cloruro de calcio ( $CaCl_2$ ), el ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), el ácido clorhídrico ( $HCl$ ) y el hidróxido de potasio ( $KOH$ ).



Figura 1.3.- Diagrama de la activación química

### 1.6.- REGENERACIÓN DE CARBÓN USADO

Una vez que el carbón activado ha sido saturado con los componentes que debe adsorber en una aplicación industrial, puede ser regenerado mediante una serie de procesos, para así recuperar su estado original. Las ventajas de la regeneración son, principalmente, el que se reduce el costo para el usuario y que se reduce

considerablemente el problema de la eliminación o almacenamiento del material gastado. La regeneración puede realizarse “in situ”, en la propia instalación del usuario o, más frecuentemente, en los sistemas de regeneración de los propios fabricantes.

El método más simple de regeneración es la desorción de las sustancias adsorbidas por tratamiento térmico o por desgasificación. Lo que se suele hacer, es pasar una corriente de vapor de agua sobrecalentado o de gas inerte a alta temperatura a través del lecho de carbón; este procedimiento es la base del proceso de recuperación de disolventes y del sistema PSA (pressure swing adsorption) utilizado en la separación de mezclas de gases. En algunos casos la regeneración se ha de llevar a cabo en condiciones de activación para descomponer y desorber las sustancias adsorbidas y es en la práctica, una reactivación. (Luna D. 2000).

### **1.7.- ESTRUCTURA DEL CARBÓN ACTIVO**

Según Karickhoff, (1981), Los carbones activos (o activados) pueden considerarse como el contrapunto de las dos estructuras perfectamente ordenadas de las dos formas alotrópicas del carbono (diamante y grafito). Tanto es así, que durante mucho tiempo han sido considerados como carbones amorfos, a diferencia del carbono cristalino, que incluía al diamante y al grafito. Hoy día se sabe que esto no es totalmente cierto porque el carbón activo (como otros carbones considerados amorfos) posee una estructura microcristalina, que dependiendo de las condiciones de preparación, se parece en mayor o menor grado a la del grafito y que recibe el nombre general de estructura “turbostrática”. En general, un carbón activo está constituido por microcristales elementales en los que los planos hexagonales no están bien orientados, sino desplazados unos respecto a otros y solapando entre sí, por lo que presentan un elevado porcentaje de la estructura altamente desordenada. De hecho se produce el plegamiento de láminas hexagonales dejando huecos de muy diferente tamaño (generalmente menores de 2nm) según se aprecia en la Figura 1.4. (Karickhoff, 1981).



**Figura 1.4.-** Representación esquemática de la estructura de un carbón activo.

Como consecuencia de la diferencia estructural entre un carbón activo y el diamante o el grafito, la extensión de la superficie del sólido accesible a los gases es muchísimo mayor. En el caso del diamante, dada su estructura rígida y compacta, sólo la superficie externa de las partículas es accesible a la fase gaseosa o líquida. Cuando se trata de grafito, la estructura menos perfecta de los cristales, así como la existencia de los bordes en las láminas o de paquetes de las mismas (muchos más activos que los planos) hace que la superficie que pueden ponerse en contacto con la fase gaseosa o líquida sea mayor que en el diamante. Por supuesto que, en ambos casos, cuanto mayor sea el grado de división de las partículas, mayor será la superficie accesible. (Karickhoff, 1981).



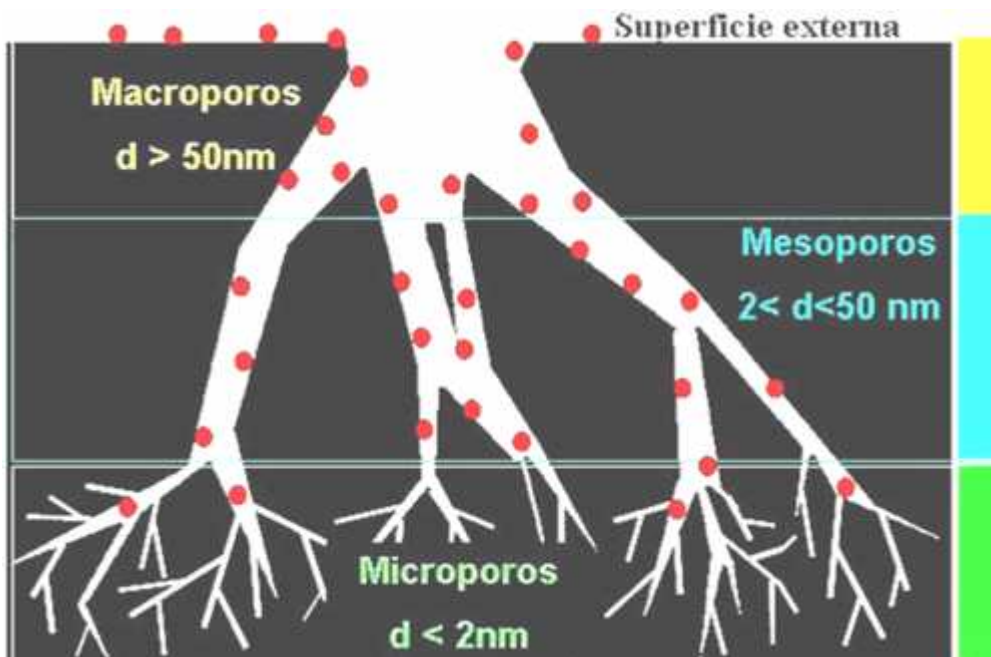
**Figura 1.5.-** Gránulo de carbón activo.

En el caso de carbones activos, el proceso de activación que implica la desaparición de carbono, hace que se forme un gran número de poros, lo que lleva consigo que la superficie interna (debida a las paredes de los poros) sea muy elevada en comparación con la superficie externa o geométrica, como se observa en la Figura 1.5.

### **1.8.- IMPORTANCIA DE LA TEXTURA POROSA DE LOS CARBONES ACTIVADOS**

Rodríguez F. (2002). Explica que los carbones activados, pueden presentar elevadas superficies específicas, del orden de  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  e incluso llegar a los  $3000 \text{ m}^2/\text{g}$ , dependiendo de su sistema poroso (ver figura 1.6). Los elevados valores de superficie específica se deben en gran medida a la porosidad que presentan los materiales carbonosos, siendo los microporos los que mayor contribución tienen en la superficie específica. En principio, cabría pensar que a mayor superficie específica mejores serán las características como adsorbente del carbón activado, puesto que también deberíamos tener un mayor número de centros para adsorber el adsorbato. Sin embargo, esto no siempre es cierto, ya que hemos de tener en cuenta el posible “efecto de tamiz molecular”. Así, dependiendo del tamaño de las moléculas del adsorbato, puede suceder que éstas sean mayores que algunos de los poros y por tanto no toda la superficie sea accesible a dichas moléculas. (Rodríguez F., 2002).

Por otro lado Menéndez J. A., (2006), afirma que también hay que tener en cuenta tanto la geometría del poro como la del adsorbato. Así, por ejemplo, determinadas moléculas pueden penetrar en poros con geometría del “tipo rendija” y no hacerlo en poros de dimensiones similares y geometría cilíndrica. (Menéndez J. A., 2006).



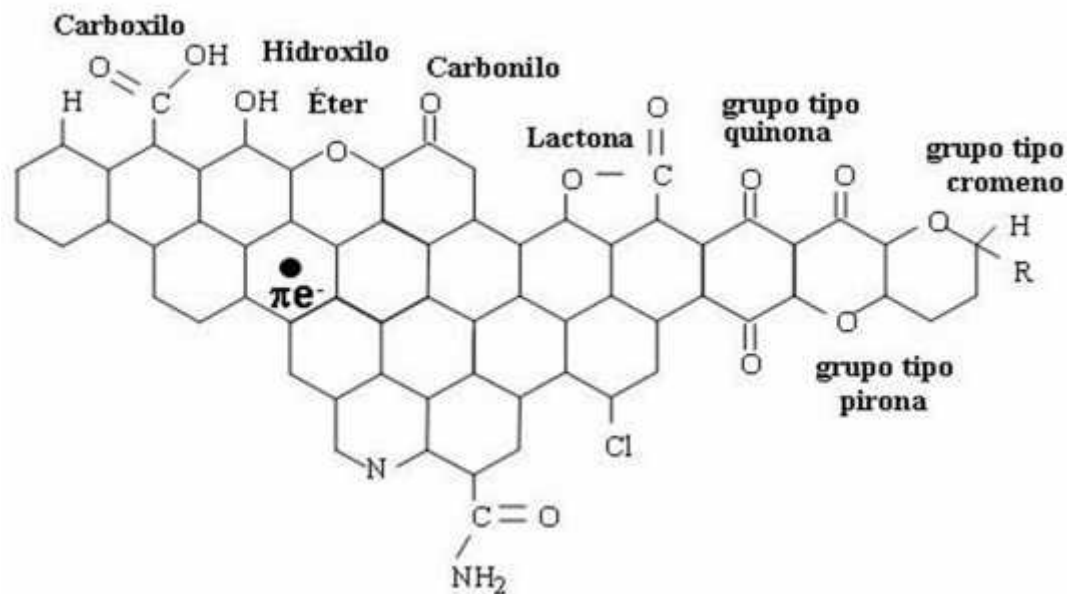
**Figura 1-6.-** Clasificación de los poros según su tamaño ( $d$  = dimensión característica del poro).

Menéndez J. A. (2006) también explica que en numerosas ocasiones se ha observado que determinados compuestos se adsorben muy bien en un cierto carbón activado, mientras que la adsorción es mucho menor en otros, a pesar de poseer éstos una textura porosa, una distribución de tamaños de poros y superficie específica, muy similar. Esto se debe al importante hecho de que, una elevada superficie específica, con una buena distribución de tamaños de poros que la hagan fácilmente accesible al adsorbato, es una condición necesaria, pero no suficiente, para optimizar la preparación de un carbón activado, hay que tener en cuenta otros factores. (Menéndez J. A., 2006).

### **1.9.- IMPORTANCIA DE LA QUÍMICA SUPERFICIAL DE LOS CARBONES ACTIVADOS**

Menéndez J. A. (2006), dice que la superficie de los carbones, en particular los átomos de carbono de los bordes de los planos basales, pueden encontrarse combinados en mayor o menor proporción con otros átomos distintos al carbono, formando heteroátomos (ver Figura 1.7), dando lugar a diferentes grupos

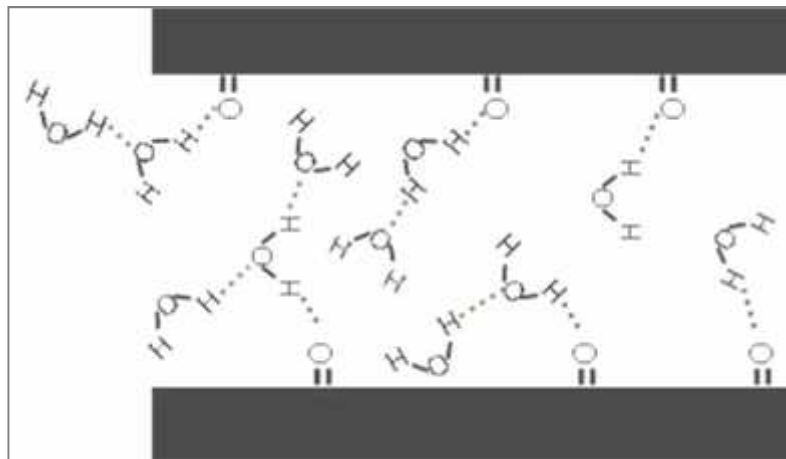
superficiales. Por otro lado, los átomos de carbono de los planos basales, poseen orbitales  $p$  que contienen electrones más o menos deslocalizados dentro de estos planos basales. La presencia o ausencia de los grupos superficiales, así como el mayor o menor grado de deslocalización de los electrones  $p$  afecta a las interacciones del carbón con otros elementos o compuestos. (Menéndez J. A., 2006).



**Figura 1-7.-** Representación esquemática de los principales grupos superficiales que pueden encontrarse en un carbón.

Además de esto, los electrones deslocalizados de los orbitales  $\pi$  juegan un papel muy importante en la química superficial de los carbones. Por ejemplo, todos los carbones presentan en principio un **carácter hidrófobo**, no obstante podemos disminuir este carácter hidrófobo adicionando grupos superficiales polares. Esto puede conseguirse por oxidación con algún tipo de agente oxidante. Los grupos oxigenados dan lugar a centros primarios de adsorción de moléculas de agua que a su vez adsorberán nuevas moléculas por formación de puentes de hidrógeno (ver figura 1.8). De esta forma se aumenta el carácter hidrófilo y la “mojabilidad” de los carbones. En el caso de la adsorción de compuestos inorgánicos en fase acuosa esto podría resultar beneficioso. Sin embargo, en el caso de que el carbón activado vaya a ser usado para adsorber

compuestos en fase gas, el hecho de que los poros estén ocupados, o incluso bloqueados, por moléculas de agua puede llegar a disminuir sustancialmente la capacidad de adsorción del carbón. De hecho este efecto combinado de oxidación/adsorción de humedad de los carbones activados, se conoce como efecto de envejecimiento (*ageing effect*) y es algo a evitar en la medida de lo posible, especialmente para las aplicaciones en fase gas. (Menéndez J. A., 2006).

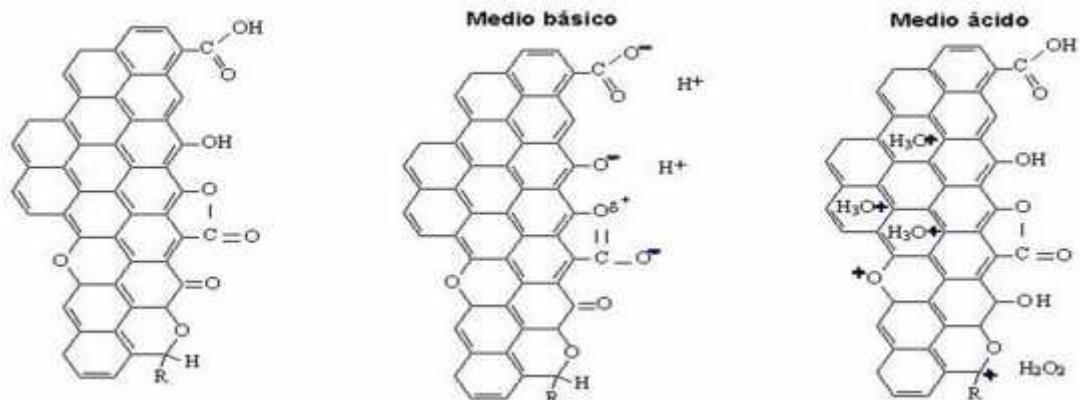


**Figura 1.8.-** Representación esquemática de grupos superficiales dentro de un poro, y de los puentes de hidrógeno que forma las moléculas de  $H_2O$  con ellos y entre sí.

Otra faceta importante de la química superficial de un carbón activado es su **naturaleza anfótera**, lo cual significa que en la superficie del carbón coexisten grupos superficiales de carácter ácido y grupos superficiales de carácter básico. El que un carbón sea globalmente ácido o básico dependerá tanto de la concentración de estos grupos como de la fuerza como ácido o base de los mismos. De forma intuitiva, se puede deducir que un carbón de tipo básico, será preferible para la adsorción de compuestos ácidos que un carbón de tipo ácido y viceversa. Por otro lado, los grupos ácidos tienden a liberar protones, especialmente en los medios básicos, mientras que los grupos básicos tienden a captarlos cuando se encuentran en un medio ácido. De esta forma pueden aparecer cargas positivas o negativas en la superficie del carbón (ver figura 1.9). De forma genérica: si el pH del medio es mayor que el punto de carga cero del carbón ( $pH_{PZC}$  es el pH en el cual el número de cargas positivas es igual al de cargas negativas de forma tal que la carga neta sobre la superficie del

carbón es cero), tendremos un predominio de las cargas negativas en la superficie del carbón; por el contrario, si el pH es menor que  $pH_{PZC}$ , obtendremos una superficie cargada positivamente. Las condiciones en las que un carbón tenga una carga neta negativa serán preferibles para adsorber cationes y aquellas en las que presente una carga neta positiva lo serán para adsorber aniones. Dado que el modificar el pH de los efluentes contaminantes no siempre resulta sencillo es preferible optimizar la química superficial del carbón activado teniendo en cuenta los criterios anteriores para que la adsorción sea máxima.

Lamentablemente optimizar la textura porosa y química superficial de un carbón activo no siempre es una tarea sencilla, más aún si tenemos en cuenta que la textura porosa y la química superficial pueden estar interrelacionadas. Por ejemplo, un aumento en el contenido de grupos superficiales oxigenados, puede modificar la textura porosa de un carbón, ya que se pueden bloquear parte de los microporos, lo que disminuye la accesibilidad al sistema poroso. Un tratamiento térmico a temperaturas elevadas para eliminar grupos superficiales, puede también producir un colapso de la textura porosa, disminuyendo también el volumen de poros. Así, a veces puede ser necesario llegar a soluciones de compromiso cuando se pretende optimizar la textura porosa y química superficial de un carbón. (Menéndez J. A., 2006).



**Figura 1.9.-** Representación esquemática del carácter ácido de algunos grupos oxigenados (carboxilos, hidroxilos y lactonas) y del carácter básico de los

*electrones deslocalizados del plano basal y de grupos oxigenados (tipo pirona, tipo quinona y tipo cromeno)*

### **1.10.- CARACTERIZACIÓN**

La caracterización es un procedimiento que sirve para determinar las propiedades fisicoquímicas de un carbón activado, lo cual implica demasiado costo, además de que se requieren equipos e instrumentos muy especiales y complicados a los cuales es muy difícil tener acceso en cualquier ciudad.

Según Martínez J. (2002), la adsorción de gases y vapores es una de las técnicas más convenientes para la caracterización de la estructura porosa del carbón activado, puesto que al tratarse de un material no cristalino, la difracción de rayos X, tan importante en el caso de adsorbentes inorgánicos como las zeolitas, no puede utilizarse para este fin. La determinación de una isoterma de adsorción permite deducir no sólo la superficie específica, sino que también suministra información sobre la porosidad del carbón que es accesible a la molécula que se adsorbe. Para la determinación de la superficie específica se suele utilizar la conocida ecuación BET, aunque no sea estrictamente aplicable a sólidos microporosos, que suministra la llamada superficie aparente o equivalente. Para la determinación de la microporosidad se pueden utilizar distintas ecuaciones, aunque la más usual es la de Dubinin-Radushkevich, basada en la teoría potencial de Polanyi. Una caracterización completa de la porosidad requiere la adsorción de moléculas sonda con distintas dimensiones moleculares, lo que permite la determinación experimental de la distribución de tamaños de poro. Sin embargo, este procedimiento es muy tedioso, porque la caracterización de una sola muestra puede requerir varias semanas. Lamentablemente estas técnicas de caracterización son demasiado costosas, y para su realización se requiere de aparatos muy delicados con los que solo las grandes compañías pueden contar (Martínez J. 2002).

## **1.11.- ADSORCIÓN**

### **1.11.1.- PRINCIPIOS DE LA ADSORCIÓN**

Según Vergara F. (1984), la adsorción, es la transferencia selectiva de uno o más solutos (adsorbato) de una fase fluida a una de partículas sólidas (adsorbente). La selectividad común de un adsorbente, entre el soluto y el fluido portador o entre varios solutos, hace posible la separación de ciertos componentes presentes en el fluido. En forma similar, en la operación inversa, llámese Desorción, se realiza a menudo la separación de las especies que se encontraban originalmente en el sólido. En general, la Adsorción incluye la acumulación de moléculas de soluto en una interfase. La acumulación por unidad de área es pequeña; por consiguiente se prefieren los sólidos altamente porosos con áreas internas muy grandes por unidad de volumen. (Vergara F. 1984)

Iprocor (2002), manifiesta que generalmente las superficies son irregulares y las energías de enlace debidas básicamente a las fuerzas de *Van der Waals*. Los adsorbentes son materiales naturales o sintéticos de estructura amorfa y microcristalina. Los utilizados en gran escala incluyen el Carbón activo, la alúmina activa, el gel de sílice, la tierra de fuller, otras arcillas, etc. (Iprocor 2002).

### **1.11.2.- MECANISMOS DE ADSORCIÓN**

Las moléculas a partir de la fase del gas o del líquido serán unidas de una manera física a una superficie, en este caso que la superficie es del carbón activo. El proceso de la adsorción ocurre en tres pasos: (Karickhoff, 1981)

- Macro transporte: El movimiento del material orgánico a través del sistema del macro-poros del carbón activo (macro-poros > 50nm)
- Micro Transporte: El movimiento del material orgánico a través del sistema del micro-poros del carbón activo (microporo < 2nm; meso-poro los 2-50nm)

- Absorción: El accesorio físico del material orgánico en la superficie del carbón activo en los mesoporos y micro-poros del carbón activo.

### **1.12.- PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN ADSORBEDOR**

Según Herrera J. (2004), lo primero que se debe hacer, es calcular la cantidad de adsorbente requerido y, en ocasiones se deben considerar otros factores como el incremento de la temperatura de la corriente gaseoso debido a la adsorción y la vida útil de adsorbente en las condiciones de operación. El cálculo de las dimensiones y diseño global del sistema de adsorción depende de las propiedades y características tanto del gas alimentado para su eliminación como del adsorbente. Para propósito de diseño deben disponerse de la siguiente información. (Herrera J. 2004).

#### I. Para la corriente de gas:

- La concentración del compuesto por adsorber (adsorbato)
- La temperatura
- El incremento de la temperatura durante la adsorción
- La presión
- La velocidad de flujo
- La presencia de material contaminante para el adsorbente

#### II. Para el adsorbente

- La capacidad de adsorción, al utilizarlos sobre la corriente
- El incremento de la temperatura durante la adsorción
- Operación isotérmica
- La posibilidad de efectos catalíticos que causen una reacción química adversa en la corriente de gas
- La densidad de masa

- El tamaño de partícula

### III. Los dimensiones del poro

- Información necesaria para la regeneración

### IV. Fenómenos de adsorción

## **1.13.- PROPIEDADES Y CONDICIONES QUE AFECTAN LA ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVADO**

La adsorción en carbón activado se ve afectada por diversas propiedades tanto del carbón como del adsorbato, así como por condiciones del gas o el líquido en el que se lleva a cabo este fenómeno. Algunas de éstas ya se describieron en la sección anterior, pero a continuación se listarán de una manera organizada, junto con otras que aún no se han mencionado. (Martínez J. 2002).

### **Propiedades relacionadas con el tipo de carbón activado**

- La adsorción aumenta cuando el diámetro de los poros predominantes está entre una y cinco veces el diámetro del adsorbato.
- Diferencias en la química superficial y en los constituyentes de las cenizas pueden afectar la adsorción, especialmente en fase líquida. Sin embargo, estas propiedades tienen una influencia pequeña respecto a cualquier otra de las que se están listando.

### **Propiedades relacionadas con el adsorbato**

Antes de listarlas, hay que mencionar que todo tipo de moléculas orgánicas se adsorben bien en el carbón activado. No así la inorgánicas, excepto en algunos casos como los molibdatos, los cianuros de oro, el dicianuro de cobre, el cloruro de mercurio, el yodo y las sales de plata, entre otros.

- La adsorción de orgánicos es más fuerte al aumentar su peso molecular, mientras el tamaño de la molécula no rebasa al del poro.
- Las moléculas orgánicas no polares se adsorben con mayor fuerza que las polares.

- Las moléculas orgánicas ramificadas se adsorben con mayor fuerza que las lineales.
- La mayoría de las moléculas orgánicas que tienen ligados átomos de cloro, bromo o yodo, se adsorben con mayor fuerza.
- Para el caso de adsorción en fase líquida, ésta aumenta al disminuir la solubilidad del adsorbato

NOTA: Las moléculas orgánicas de más de tres carbonos generalmente se adsorben, a menos que sean extremadamente solubles.

### **Propiedades relacionadas con el gas o el fluido que rodea al carbón activado**

Martínez J. (2002), explica que en fase líquida, generalmente aumenta la adsorción al disminuir el pH. Para el caso de adsorción en fase líquida, la teoría dice que ésta no se ve afectado por la temperatura. Sin embargo, a mayor temperatura, aumenta la solubilidad del adsorbato, y se adsorbe en menor proporción. Por otro lado, a mayor temperatura, también disminuye la viscosidad del solvente, facilitando la movilidad del adsorbato y por lo tanto acelerando su velocidad de difusión hacia los poros. Todo lo anterior generalmente resulta en un aumento de la adsorción al aumentar la temperatura. (Martínez J. 2002).

### **1.14.- CAPACIDAD ÚTIL DE UN CARBÓN**

La experiencia de Herrera J. (2004), demuestra que rara vez pueden sobrepasarse tres volúmenes de agua por volumen de carbón y por hora, en casos de contaminación elevada. En el caso de tratamiento de aguas para el consumo humano, en el que los contenidos de productos adsorbibles son muy pequeños, deben preverse, en el estudio económico, unos elevados gastos de inversión, por lo que generalmente debe aceptarse una menor saturación del carbón, utilizando velocidades mayores: 5 a 10 vol. agua/(vol. carbón. h). Puesto que la teoría da únicamente el sentido de variación de estas leyes, es indispensable recurrir a la experiencia del especialista y realizar ensayos dinámicos a través de columnas de tamaño suficiente para poder efectuar una extrapolación. (Herrera J. 2004).

### **1.15.- ADSORBATOS**

Históricamente, la adsorción en el tratamiento de aguas se ha aplicado a la eliminación del olor y el sabor. Actualmente, se dirige más hacia la eliminación de compuestos orgánicos naturales o sintéticos. La experiencia demuestra que los carbones activos son buenos adsorbatos, ya que son adsorbentes de amplio espectro. La mayoría de las moléculas orgánicas se fijan en su superficie, siendo las que peor se fijan las moléculas más cortas y las más polares (alcoholes y ácidos de menos de tres átomos de carbono). Las moléculas más pesadas se adsorben con mayor facilidad. Como los compuestos más fácilmente biodegradables son los que peor se adsorben, el tratamiento de adsorción adquiere un carácter complementario muy apreciado, en relación con el tratamiento biológico. (Pérez D. N., Márquez M. F., Autié P. M. 2005.)

#### ***Compuestos orgánicos***

Martínez J. (2002), comenta que cuanto menos soluble en el agua es un compuesto orgánico, mejor se adsorbe a partir de su disolución. Esta es la regla de Lundelius. Análogamente, el compuesto menos polar es el mejor adsorbido a partir de sus soluciones acuosas polares, sobre carbón poco o nada polar. Ambas reglas cualitativas surgen de la necesidad que tiene una molécula orgánica de romper las uniones disolvente- adsorbato para poder adsorberse. Estos enlaces son generalmente más fuertes cuando el adsorbato es muy soluble en el agua o presenta con este disolvente una interacción dipolo-dipolo. Las moléculas orgánicas son, en general, las menos solubles, y tienden a difundirse más lentamente a través de los poros, adsorbiéndose con mayor dificultad cuanto más grandes sean, al no poder penetrar fácilmente en los poros más pequeños. (Martínez J. 2002).

## **1.16.- TIPOS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS SEGÚN SU CAPACIDAD DE ADSORCIÓN SOBRE CARBÓN ACTIVO**

### **1.16.1.- COMPUESTOS ORGÁNICOS FÁCILMENTE ADSORBIBLES**

Los compuestos orgánicos fácilmente adsorbibles son: (Martínez J. 2002)

- **Disolventes aromáticos:** Benceno, tolueno, nitrobenzenos, etc.
- **Aromáticos clorados:** PCBs, clorobenzenos, cloronaftaleno.
- **Fenol y Clorofenoles:** Aromáticos policíclicos: Benzopirenos, etc.
- **Pesticidas y herbicidas:** DDT, aldrin, clordane, .BHCs, heptaclor, etc.
- **Clorados no aromáticos:** Tetracloruro de carbono, ésteres cloroalquílicos, hexaclorobutadieno, etc.
- **Hidrocarburos de alto peso molecular:** Tintes, gasolina, aminas, compuestos húmicos.

### **1.16.2.- COMPUESTOS ORGÁNICOS POCO ADSORBIBLES**

- Alcoholes
- Cetonas de bajo peso molecular
- Ácidos, aldehídos
- Azúcares y almidones
- Coloides orgánicos de peso molecular muy alto
- Alifáticos de bajo peso molecular

Según Martínez J. (2002), otros factores relacionados con la adsorción de compuestos orgánicos tienen que ver con las afinidades químicas específicas entre los grupos funcionales del adsorbente y el adsorbato. Los fenoles sustituidos, por ejemplo, se adsorben mejor que los halometanos o el etileno. Estos compuestos orgánicos volátiles son disolventes industriales, a menudo presentes en altas concentraciones. Su eliminación es difícil o requiere frecuentes regeneraciones de los lechos. Los hidrocarburos policíclicos aromáticos y las nitrosaminas se adsorben rápidamente.

Como quiera que no suele haber mucha información disponible sobre la adsorción de las especies orgánicas con carbón activo granular, es con frecuencia necesario realizar ensayos en tanque o en columna en laboratorio, antes de pasar a predecir la eficacia en la eliminación de tales compuestos en un lecho a gran escala. La mayoría de los compuestos poco adsorbibles son muy solubles y de peso molecular bajo; pero también hay otros de peso molecular muy elevado. En el caso de los ácidos orgánicos y de las bases, la adsorción depende mucho del pH, eliminándose preferentemente las moléculas de tipo neutro. (Martínez J. 2002).

### **1.17.- COMPUESTOS INORGÁNICOS**

Algunos compuestos inorgánicos pueden eliminarse por adsorción sobre carbón activo.

Martínez J. (2002), alude que los metales a nivel de trazas, como el mercurio, el arsénico y el plomo pueden ser eliminados con carbón activo granular. La mayoría de los cationes y aniones presente en las aguas naturales no se adsorben, como es el caso del calcio, sodio, ortofosfatos, nitratos y haluros. Una excepción es el fluoruro, que es eliminado, tanto por alúmina activada como con carbón. (Martínez J. 2002).

#### **1.17.1.- METALES Y COMPUESTOS INORGÁNICOS CLASIFICADOS POR SU POTENCIAL DE ADSORCIÓN SOBRE CARBÓN ACTIVADO**

Los compuestos inorgánicos adsorbibles en carbón activo son: (Martínez J. 2002)

- **Metales fácilmente adsorbibles:** Antimonio, arsénico, bismuto, cromo, estaño.
- **Metales de potencial de adsorción medio:** Plata, mercurio, cobalto, zirconio.
- **Metales de potencial de adsorción menos bueno:** Plomo, níquel, titanio, vanadio, hierro.
- **Metales con bajo potencial de adsorción:** Cobre, cadmio, zinc, bario, selenio, molibdeno, manganeso, wolframio, radio.

### Cuadro I -3

#### Adsorción potencial de compuestos inorgánicos

Otros compuestos inorgánicos	Adsorción potencial
Nitrato	Baja
Fosfato	Baja
Cloro	Alta
Bromo	Alta
Yodo	Alta
Cloruro	Baja
Bromuro	Baja
Ioduro	Baja
Fluoruro	Alta

Fuente: Karickhoff, 1981

Martínez J. (2002), menciona que los metales pueden reaccionar en los grupos funcionales oxigenados del carbón, desplazando a los iones de hidrógeno por intercambio iónico. Las superficies del carbón también pueden dar lugar a precipitados de sales metálicas por nucleación o coagulación. Los metales reducidos en la estructura original del carbón también pueden reaccionar con los metales en estado iónico en solución, para reducirlos hasta una forma depositable. Análogamente, los metales pueden ser oxidados catalíticamente. (Martínez J. 2002).

## **CAPÍTULO II**

### **PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **2.1.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN**

Las actividades realizadas durante el desarrollo del trabajo de investigación, fueron las siguientes:

- Tamizado de la materia prima.
- Análisis de humedad de la materia prima, en el secador de infrarrojos.
- Secado de la materia prima, en un secador de bandejas.
- Activación de la materia prima, según el método de activación por deshidratación química, utilizando soluciones químicas de ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, cloruro de sodio y cloruro de zinc, a dos concentraciones distintas, 10 y 20% p/p. Se añadirán 250ml de activante, para cada muestra. Se trabajara con 10g de materia prima por cada muestra.
- Para mejorar la deshidratación química, se utilizó un agitador de barra magnética, y se agitaron las muestras durante 1 hora.
- Carbonización de la materia prima a dos temperaturas diferentes, 400 y 700 °C.
- Se determinó el rendimiento en peso, de cada una de las muestras.
- Se realizaron experimentos de adsorción de azul de metileno, con el producto final obtenido para determinar la eficiencia de adsorción.
- Se realizará la comparación del mejor carbón obtenido, con un carbón activo utilizado en una industria de la región, para determinar la calidad y la competitividad del mismo.

## **2.1.1.- TAMIZADO DE LA MATERIA PRIMA**

### **2.1.1.1.- ZARANDA O TAMIZADOR**

El tamizado, se realizó en un tamiz de las siguientes características:

- Zaranda o tamizador ORTO-ALRESA
- Juego: 5; 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,063mm y bandeja de recepción de muestra.
- Norma española



**Foto 2-1.- Tamiz**

### **2.1.1.2.- PROCEDIMIENTO**

El procedimiento de tamizado, se realizó como se describe a continuación:

- Se colocó 250g el aserrín en la primer malla del tamiz y se prendió el equipo
- Al finalizar el proceso de tamizado se obtuvo materia prima de diferente granulometría
- Se escogió el aserrín de la malla de 1mm, debido a que no ocupaba demasiado volumen y facilita la activación y calcinación en comparación con los de

granulometría mayor, además de no obtener demasiada cantidad de tierra e impurezas como los de granulometría menor.



**Foto 2-2.-** *materia prima tamizada*

Se tuvo que realizar dos tamizados para obtener una cantidad de materia prima adecuada para la experimentación.

## **2.1.2.- ANÁLISIS DE HUMEDAD DE LA MATERIA PRIMA**

### **2.1.2.1.- SECADOR DE INFRARROJOS**

El análisis de humedad, se realizó en un secador de infrarrojos Sartorius.

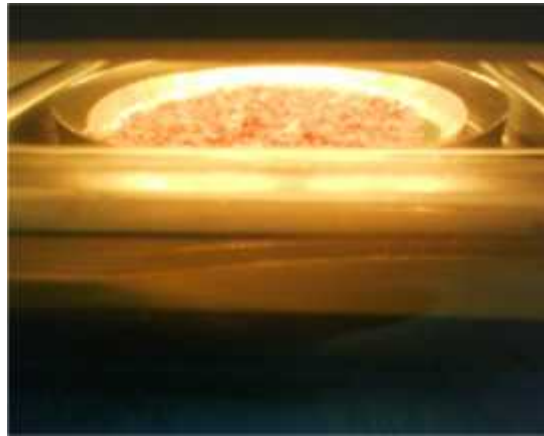


**Foto 2-3.-** *Secador de infrarrojos*

### 2.1.2.2.- PROCEDIMIENTO

Para realizar el análisis de humedad, se realizaron los siguientes pasos:

- Se colocó el platillo del secador y se llevo el peso a cero
- Se peso 1g de aserrín en el platillo de aluminio
- Se colocó el platillo dentro del secador, y se inicio el análisis
- Una vez finalizado el análisis se anotaron todos los datos y se realizaron los cálculos necesarios



**Foto 2-4.-** *Análisis de humedad*

Obteniendo los datos del secador calculamos el porcentaje de humedad de la materia prima:

$$\% \text{ HUMEDAD} = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}}{m_{\text{inicial}}} \times 100$$

$$\% \text{ HUMEDAD} = \frac{1\text{g} - 0.93\text{g}}{1\text{g}} \times 100 = 7\%$$

### **2.1.3.- SECADO DE LA MATERIA PRIMA**

#### **2.1.3.1.- SECADOR DE BANDEJAS**

El secado, se realizó en un secador de bandejas, J.P. Selecta, de 2000w de Potencia.



**Foto 2-5.-** *Secador de bandejas*

#### **2.1.3.2.- PROCEDIMIENTO**

Para el secado, se procedió de la siguiente manera:

- Se colocó el aserrín en una bandeja de hierro, de 30 x 40cm, de forma que el aserrín se encontraba con un espesor o altura de 5mm aproximadamente.
- Se realizó el secado a una temperatura de 105°C
- El tiempo de secado fue de dos horas, con lo que se garantiza una máxima extracción de humedad



**Foto 2-6.-** *Proceso de secado*

## **2.1.4.- AGITACIÓN DEL PRECURSOR CON EL ACTIVANTE**

### **2.1.4.1.- AGITADOR MAGNÉTICO O DE BARRA MAGNÉTICA**

El proceso de agitación, se realizó en un agitador de barra magnética con termostato incluido, y se utilizó una barra de agitación magnética de 0,5cm de diámetro y 5cm de longitud.



**Foto 2-7.-** *Agitador magnético*

#### **2.1.4.2.- PROCEDIMIENTO**

Luego de secar la materia prima, se procedió al proceso de agitación, que se efectuó de la siguiente manera:

- Se pesaron 10 gramos de aserrín seco y se colocó dentro de un vaso de precipitado de 500ml
- Se agregó 250ml del activante respectivo
- Se inició la agitación

Se siguió esta secuencia, para cada uno de los experimentos o tratamientos realizados.

Las condiciones de operación durante el proceso de agitación fueron las siguientes:

Tiempo: 1 hora

Temperatura: 45°C

Velocidad: 600rpm



**Foto 2-8.-** *Proceso de agitación*

## **2.1.5.- CARBONIZACIÓN**

### **2.1.5.1.- MUFLA ELÉCTRICA**

La calcinación se realizó en una mufla eléctrica Vulcan, de 2400w de potencia, perteneciente al laboratorio del CEANID.



**Foto 2-9.- Mufla eléctrica**

### **2.1.5.2.- PROCEDIMIENTO**

Luego de finalizada la agitación, se procedió a realizar la calcinación, para lo cual se trabajó de la siguiente manera:

- Se escurrió por completo todo el líquido activante del aserrín
- Se colocó el aserrín dentro de recipientes de cerámica, previamente tarados y pesados.
- Se colocaron los recipientes dentro de la mufla y se inició el calentamiento de la misma.
- Una vez que se llegó a la temperatura deseada, se controló el tiempo de calcinación.
- Se dejó enfriar de manera lenta y se retiraron las muestras aún en caliente, haciendo uso de un desecador, para evitar que estas adquieran humedad, antes de ser pesadas.



**Foto 2-10.-** *Carbón activo obtenido*

Las condiciones de operación durante el proceso de calcinación fueron las siguientes:

Tiempo: 4 horas

Temperatura: según sea el tratamiento (400 y 700°C)



**Foto 2-11.-** *Desecador*

## 2.1.6.- DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO EN PESO

### 2.1.6.1.- BALANZA ANALÍTICA ELECTRÓNICA

El pesado del carbón, fue realizado en una balanza analítica de las siguientes características:

- Marca: Gibertini
- País de fabricación: Italia
- Peso máximo permitido: 510g
- Peso mínimo permitido: 1g
- Sensibilidad (d) 0,001g
- Desviación estándar ( ) 0,01g



**Foto 2-12.- Balanza analítica**

### 2.1.6.2.- PROCEDIMIENTO

Luego de finalizada la carbonización, se procedió a realizar el pesado del carbón obtenido, para lo cual se trabajo de la siguiente manera:

- Se pesaron las tazas que contenían el carbón obtenido
- Al peso total de la taza, más la muestra, se le restó el peso de la taza, con lo que se obtuvo el peso exacto de carbón obtenido.
- Se colocaron cada una de las muestras en recipientes de plástico con doble tapa, para protegerlas mejor de la humedad y se los guardo para luego realizar los experimentos de adsorción de azul de metileno.



**Foto 2-13.-** *Muestra de carbón activo*

Las cantidades de carbón activado, obtenidas a partir de los diferentes métodos utilizados, se expresan en las tablas mostradas a continuación:

**Tabla II -1****Carbón activo obtenido a partir de activación con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**

Residuo (g)	Impregnación H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%)	Temperatura de carbonización (°C)	Carbón activo obtenido (g)	Rendimiento (%)
10	10	400	3,078	30,78
10	10	700	5,367	53,67
10	20	400	2,164	10,82
10	20	700	5,127	25,635

Fuente: Elaboración propia

**Tabla II -2****Carbón activo obtenido a partir de activación con HCl**

Residuo (g)	Impregnación HCl (%)	Temperatura de carbonización (°C)	Carbón activo obtenido (g)	Rendimiento (%)
10	10	400	3,34	33,4
10	10	700	1,329	13,29
10	20	400	3,061	30,61
10	20	700	0,704	7,04

Fuente: Elaboración propia

**Tabla II -3****Carbón activo obtenido a partir de activación con CaCl<sub>2</sub>**

Residuo (g)	Impregnación CaCl <sub>2</sub> (%)	Temperatura de carbonización (°C)	Carbón activo obtenido (g)	Rendimiento (%)
10	10	400	7,229	72,29
10	10	700	6,063	60,63
10	20	400	9,793	97,93
10	20	700	9,793	97,93

Fuente: Elaboración propia

**Tabla II -4****Carbón activo obtenido a partir de activación con ZnCl<sub>2</sub>**

Residuo (g)	Impregnación ZnCl <sub>2</sub> (%)	Temperatura de carbonización (°C)	Carbón activo obtenido (g)	Rendimiento (%)
10	10	400	8,140	81,4
10	10	700	5,367	53,67
10	20	400	7,322	73,22
10	20	700	5,127	51,27

Fuente: Elaboración propia

## **2.2.- REALIZACIÓN DE EXPERIMENTOS DE ADSORCIÓN DE AZUL DE METILENO**

### **2.2.1.- PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE AZUL DE METILENO**

Se utilizó azul de metileno sólido, del cual se preparó diferentes diluciones.



**Foto 2-14.-** *Azul de metileno sólido*

Se trató de encontrar la concentración ideal para este experimento, una concentración con la que se pueda diferenciar con facilidad la variación de color antes y después de la adsorción con carbón activo, y que además se pueda determinar la absorbancia de luz en el espectrofotómetro. Para este fin, lo primero que se hizo, fue preparar una solución de azul de metileno de concentración 100mg/litro, de la cual se obtuvo un color azul muy oscuro, imposible de utilizar en el espectrofotómetro, como se muestra en la foto 2-15.



**Foto 2-15.-** *Solución de azul de metileno 100mg/l*

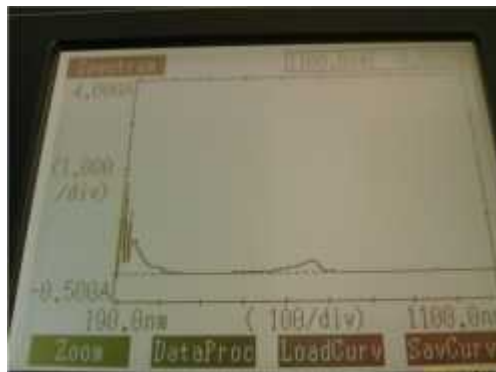
Posteriormente se prepararon mas soluciones utilizando la solución anterior. Se prepararon 6 soluciones de concentraciones 1, 2, 4, 6, 8 y 10mg/l o ppm. Las cuales se utilizaron para elaborar la curva patrón de calibración absorbancia-concentración con la ayuda del espectrofotómetro.



**Foto 2-16.-** Soluciones de concentración 1, 2, 4, 6, 8 y 10mg/l

### **2.2.2.- DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA REQUERIDA**

Para saber cuál es la longitud de onda, a la que se debe trabajar con soluciones de azul de metileno, se realizó el barrido de absorción desde 190 a 1100nm de longitud de onda utilizando una solución de azul de metileno de concentración 2mg/l, luego el equipo graficó y mostró el pico formado, como se muestra en la foto 2-17. La mayor absorbancia se efectuó en el rango contenido entre 600 y 700nm de longitud de onda.



**Foto 2-17.-** Gráfico absorbancia-longitud de onda, mostrado en la pantalla del espectrofotómetro

Conociendo este dato, se procedió a realizar lecturas de absorbancia, variando la longitud de onda, entre 600 a 700nm hasta lograr encontrar el valor en el cual la absorbancia sea máxima.

**Tabla II -5**

**Determinación de la longitud de onda requerida (primera lectura)**

<b>Longitud de onda (nm)</b>	<b>Absorbancia</b>
600	0.168
610	0.205
620	0.217
630	0.233
640	0.280
650	0.355
660	0.418
670	0.407
680	0.368

Fuente: Elaboración propia

**Tabla II -6**

**Determinación de la longitud de onda requerida (segunda lectura)**

<b>Longitud de onda (nm)</b>	<b>Absorbancia</b>
660	0.418
662	0.426
664	0.430
<b>665</b>	<b>0.431</b>
666	0.429
668	0.422
670	0.407

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se encontró el valor máximo de absorbancia, a una longitud de onda de **665nm**, por lo tanto, esta es la longitud de onda óptima, para realizar lecturas de absorbancia, con soluciones de azul de metileno.



**Foto 2-18.-** Espectrofotómetro utilizado en la elaboración de la curva patrón de calibración

### **2.2.3.- ELABORACIÓN DE LA CURVA PATRÓN DE CALIBRACIÓN**

Para la elaboración de la curva de calibración, se realizó la lectura de la absorbancia de luz en el espectrofotómetro, introduciendo las soluciones de concentración conocida descritas en el punto 2.2.1.

**Tabla II -7**

**Lecturas de absorbancia para distintas concentraciones de azul de metileno**

<b>Concentración (g/l)</b>	<b>Absorbancia</b>
0	0
0,001	0,194
0,002	0,436
0,004	0,825
0,006	1,237

Fuente: Elaboración propia

Solamente se utilizaron las soluciones de concentración, 1, 2, 4 y 6mg/l debido a que la utilización de las dos concentraciones superiores, 8 y 10, daban un coeficiente de correlación más alejado de la unidad.

### 2.2.3.1.- DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DE CONCENTRACIÓN MEDIANTE EL PROGRAMA POLYMATH

Para la determinación de la ecuación de concentración se utilizó el programa Polymath, debido a que con este es posible encontrar la ecuación de la concentración sin ordenada en el origen, lo cual no es posible realizarlo en el Excel.



Foto 2-19.- introducción de datos al Polymath



Foto 2-20.- curva de calibración y ecuación de concentración

La ecuación de la concentración es:

$$CONC = 0,00483407 \times ABS$$

Esta ecuación es el resultado del ajuste de la curva de calibración.

Pese a que el Polymath muestra la ecuación de concentración, no muestra el coeficiente de correlación, el cual determina cuan desviados se encuentran los puntos de la recta. Por lo tanto se debe proceder a realizar el cálculo del coeficiente de correlación en el Excel.

### 2.2.3.2.- DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

Tabla II -8

Cálculo del coeficiente de correlación realizado en el Excel

x (absorbancia)	y (concentración)	y estimado	(y <sub>est</sub> -y <sub>med</sub> ) <sup>2</sup>	(y-y <sub>med</sub> ) <sup>2</sup>
0	0	0	0,00000676	0,00000676
0,194	0,001	0,00093781	2,76288E-06	0,00000256
0,436	0,002	0,00210765	2,42404E-07	0,00000036
0,825	0,004	0,00398811	1,92684E-06	0,00000196
1,237	0,006	0,00597974	1,14227E-05	0,00001156

Fuente: Elaboración propia

Se encuentra el valor promedio de y:

$$y_{medio} = \frac{0 + 0,001 + 0,002 + 0,004 + 0,006}{5} = 0,0026$$

Se realiza la suma de las diferencias entre los Y estimados y el valor promedio de Y:

$$\Sigma(y_{est} - y_{med})^2 = 0.00000676 + 2,76288 \times 10^{-6} + 2,42404 \times 10^{-7} + 1,92684 \times 10^{-6} + 1,14227 \times 10^{-5}$$

$$\Sigma(y_{est} - y_{med})^2 = 2,31148 \times 10^{-5}$$

Se efectúa la suma de las diferencias entre cada uno de los Y y el valor promedio de Y:

$$\Sigma(y - y_{med})^2 = 0,00000676 + 0,00000256 + 0,00000036 + 0,00000196 + 0,00001156$$

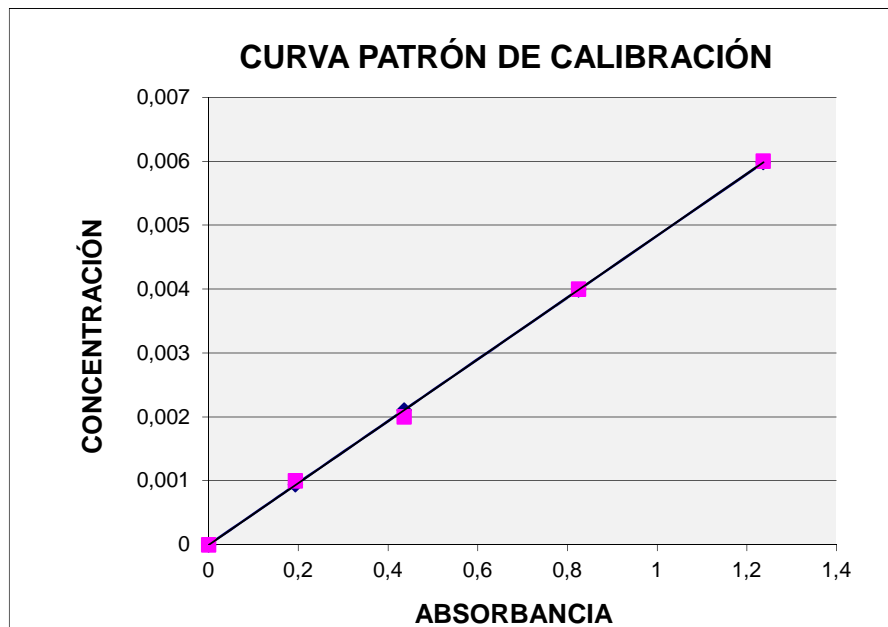
$$\Sigma(y - y_{med})^2 = 0,0000232$$

La ecuación del coeficiente de correlación es:

$$r = \left( \frac{\Sigma(y_{est} - y_{med})^2}{\Sigma(y - y_{med})^2} \right)^{0,5}$$

$$r = \left( \frac{2,31148 \times 10^{-5}}{0,0000232} \right)^{0,5} = 0,998162054$$

$$r = 0,998162054$$



**Figura 2-1.-** Curva de calibración para el azul de metileno

#### **2.2.4.- DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ADSORCIÓN**

Se realizó la adsorción de azul de metileno, utilizando la solución de concentración 2mg/l, debido a que era una solución de un color no muy intenso pero muy notable antes y después de la activación. No se pudo trabajar con una concentración mayor debido a que el poder colorativo que caracteriza al azul de metileno, ocasionaba que la celda del espectrofotómetro se tiña de azul, lo cual ocasionaba errores en la lectura siguiente.

Para cada experimento, se peso 0,01g de carbón en un tubo para centrífuga de 50ml y se añadió a él, 20ml de solución de azul de metileno 2mg/l.



**Foto 2-21.- Pesado del carbón**

Se llevaron los tubos a un agitador, en el cual se agitaron durante 10min a una velocidad de 800 ciclos por minuto.



**Foto 2-22.- Agitación de los tubos**

Una vez concluida la agitación, se centrifugaron los tubos durante 5min a una velocidad de 2500rpm.



**Foto 2-23.-** *Centrifugado de los tubos*

Seguidamente se realizó la lectura de la absorbancia de luz en el espectrofotómetro, de cada una de las soluciones tratadas con carbón experimental. Para esto lo primero que se hizo fue colocar una de las celdas con agua destilada (blanco o testigo) en el portaceldas del fondo, y luego otra con la muestra a analizar, en el portaceldas correspondiente.



**Foto 2-24.-** *Lectura de la absorbancia en el espectrofotómetro*

Una vez concluidas todas las lecturas de absorbancia, los datos se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla II -9**  
**Valores de absorbancia de cada experimento**

<b>N° DE CARBÓN</b>	<b>TIPO DE OBTENCIÓN</b>	<b>REP 1</b>	<b>REP 2</b>	<b>REP 3</b>	<b>PROMEDIO</b>
1	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 10%, 400°C	0,130	0,163	0,164	0,152
2	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 20%, 400°C	0,135	0,135	0,160	0,143
3	HCl, 10%, 400°C	0,183	0,210	0,242	0,212
4	HCl, 20%, 400°C	0,190	0,199	0,204	0,198
5	CaCl <sub>2</sub> , 10%, 400°C	0,033	0,075	0,075	0,061
6	CaCl <sub>2</sub> , 20%, 400°C	0,044	0,054	0,061	0,053
7	ZnCl <sub>2</sub> , 10%, 400°C	0,098	0,132	0,199	0,143
8	ZnCl <sub>2</sub> , 20%, 400°C	0,052	0,069	0,084	0,068
9	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 10%, 700°C	0,099	0,100	0,107	0,102
10	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 20%, 700°C	0,081	0,082	0,092	0,085
11	HCl, 10%, 700°C	0,000	0,000	0,005	0,002
12	HCl, 20%, 700°C	0,000	0,000	0,004	0,001
13	CaCl <sub>2</sub> , 10%, 700°C	0,135	0,148	0,150	0,144
14	CaCl <sub>2</sub> , 20%, 700°C	0,077	0,097	0,102	0,092
15	ZnCl <sub>2</sub> , 10%, 700°C	0,054	0,058	0,081	0,064
16	ZnCl <sub>2</sub> , 20%, 700°C	0,000	0,000	0,001	0,000

Fuente: Elaboración propia

Los tres valores de color azul de la tabla II-9, son el resultado de la pérdida total del color, de manera que tuvo que repetirse los ensayos con estos tres experimentos a una concentración mayor. Se utilizó una solución de concentración 4mg/l, y los datos obtenidos se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla II -10**  
**Valores de absorbancia de los tres mejores experimentos**

<b>N° DE CARBÓN</b>	<b>TIPO DE OBTENCIÓN</b>	<b>ABSORBANCIA</b>				
		<b>REP 1</b>	<b>REP 2</b>	<b>REP 3</b>	<b>REP 4</b>	<b>Promedio</b>
11	HCl, 10%, 700°C	0,015	0,018	0,019	0,02	0,018
12	HCl, 20%, 700°C	0,001	0,003	0,007	0,012	0,006
16	ZnCl <sub>2</sub> , 20%, 700°C	0,000	0,001	0,002	0,008	0,003

Fuente: Elaboración propia

Se realizaron 4 repeticiones por cada experimento, y se analizaron los criterios de descartación, como así también el criterio de selección del mejor carbón obtenido, los cuales se describen en el punto 3.3 del capítulo 3, a partir del cual se determina estadísticamente, cual es el mejor tratamiento realizado.



**Foto 2-25.-** *Soluciones tratadas con carbón activo experimental*

#### **2.2.5.- COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DEL MEJOR CARBÓN OBTENIDO, CON UN CARBÓN INDUSTRIAL**

Para tener una idea de la calidad del carbón obtenido en el laboratorio, se realizó la comparación del mejor carbón experimental (obtenido con  $ZnCl_2$  20%, a una temperatura de  $700^\circ C$ ) contra un carbón activo en polvo, utilizado en la Cervecería Boliviana Nacional. Dicha comparación se describe a continuación:

- En un erlenmeyer de 1000ml, se pesó 0,1g de carbón activo experimental y se añadieron 500ml de solución de azul de metileno 2mg/l
- En otro erlenmeyer de 1000ml, se pesó 0,1g de carbón activo industrial SUCHAR y se añadieron 500ml de solución de azul de metileno 2mg/l
- Ambos erlenmeyers se agitaron durante 10 minutos, a una velocidad de 200 ciclos por minuto
- Se colocó 50ml de cada muestra en dos tubos para centrifuga y se centrifugó durante 5 minutos a 2500rpm
- Se realizó la lectura de la absorbancia en el espectrofotómetro, para cada una de las muestras



**Foto 2-26.-** *carbón experimental vs. Carbón industrial*



**Foto 2-27.-** *Proceso de agitación*



**Foto 2-28.-** *Soluciones de azul de metileno decoloradas durante la comparación*

Se determinó que el carbón activo obtenido en laboratorio por el procedimiento número 16, es superior al carbón SUCHAR de procedencia argentina, que se utiliza en la Cervecería Boliviana Nacional S. A., habiéndose obtenido los siguientes valores:

- La absorbancia de luz en la solución tratada con carbón experimental del tratamiento 16 fue de 0,0.
- La absorbancia de luz en la solución tratada con carbón SUCHAR fue de 0,064.

### 2.3.- DIAGRAMA DE FLUJO Y BALANCE DE MATERIA

Se realizará el balance de materia solamente en aquellos procesos que lo requieran, es decir en aquellos en los que exista diferencia de masa a la salida respecto de la entrada.

#### 2.3.1.- DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL

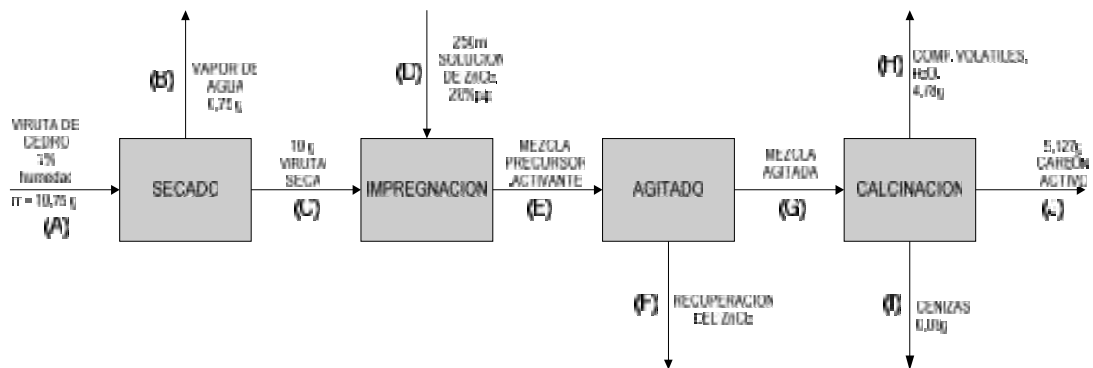


Fig. 2-2.- diagrama de flujo del proceso de obtención de carbón activado

## 2.3.2. - BALANCE EN EL SECADOR

### 2.3.2.1.- BALANCE DE MATERIA

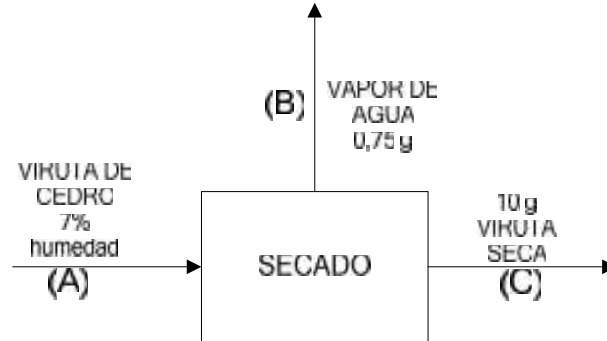


Fig. 2-3.- diagrama de flujo del proceso de secado

La humedad de la materia prima fue determinada en el secador de infrarrojos, dando un valor de 7%.

Para todos los tratamientos se peso 10 g de viruta ya seca, por lo tanto se puede determinar mediante balance de materia la masa de viruta húmeda utilizada.

$$A = C + B$$

$$A = 10g + 0,75$$

$$A = \text{viruta húmeda} = 10,75g$$

### 2.3.2.2.- BALANCE DE ENERGÍA

Las condiciones de secado son:

$$\text{Tiempo (t)} = 2 \text{ h}$$

$$\text{Potencia del secador (P}_{\text{sec}}) = 2000 \text{ w}$$

$$\text{Temperatura de secado (T)} = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

El costo del kwh en la ciudad de Tarija es de 0.88 Bs.

$$\text{Energía} = P_{\text{SEC}} \times t = 2 \text{ kw} \times 2h \quad \rightarrow \quad \text{Energía} = 4 \text{ kwh}$$

Esta es la energía consumida por el secador, por cada una de las muestras. Para encontrar el costo de esta energía, se multiplica la energía por el tiempo de trabajo del mismo:

$$\text{costo secado} = 4 \text{ kwh} \times 0,88 \frac{\text{Bs.}}{\text{kwh}} \rightarrow \boxed{\text{costo secado} = 3,52 \text{ Bs.}}$$

### 2.3.3. - BALANCE DE ENERGÍA EN EL AGITADOR

No es necesario efectuar el balance de materia en este equipo, porque no existe diferencia de masa a la salida respecto de la entrada.

Las condiciones de agitado son:

$$\text{Tiempo (t)} = 1 \text{ h}$$

$$\text{Potencia del agitador (P}_{\text{agitador}}) = 640 \text{ w}$$

$$\text{Temperatura (T)} = 45 \text{ °C}$$

$$\text{Energía} = P_{\text{agitador}} \times t = 0,64 \text{ kw} \times 1 \text{ h} \rightarrow \boxed{\text{Energía} = 0,64 \text{ kwh}}$$

Esta es la energía consumida por el agitador, por cada una de las muestras. Para encontrar el costo de la energía consumida en el agitador, se multiplica la energía por el tiempo de trabajo de este:

$$\text{costo agitado} = 0,64 \text{ kwh} \times 0,88 \frac{\text{Bs.}}{\text{kwh}} \rightarrow \boxed{\text{costo agitado} = 0,56 \text{ Bs.}}$$

### 2.3.4. - BALANCE EN LA MUFLA

#### 2.3.4.1. - BALANCE DE MATERIA

Según datos proporcionados por la cámara forestal de Bolivia, el contenido de cenizas de la madera de cedro es del 0,9% del peso total seco, entonces:

$$G = H + I + J \rightarrow H = G - I - J$$

$$H = 10 \text{ g} - 0,09 \text{ g} - 5,127 \text{ g}$$

$$\boxed{H = \text{sust. volátiles} = 4,78 \text{ g}}$$

### 2.3.4.2. - BALANCE DE ENERGÍA

Las condiciones de carbonización son:

$$\text{Tiempo (t)} = 4 \text{ h}$$

$$\text{Potencia de la mufla (P}_{\text{mufla}}) = 2400 \text{ w}$$

$$\text{Temperatura (T)} = 400 \text{ °C}$$

$$\text{Energía} = P_{\text{mufla}} \times t = 2,4 \text{ kw} \times 4\text{h} \quad \rightarrow \quad \boxed{\text{Energía} = 9,6\text{kwh}}$$

Esta es la energía consumida por la mufla, por cada una de las muestras. Para encontrar el costo de la energía consumida en la mufla, se multiplica la energía por el tiempo de trabajo de este:

$$\text{costo carbonizado} = 9,6 \text{ kwh} \times 0,88 \frac{\text{Bs.}}{\text{kwh}} \rightarrow \boxed{\text{costo carbonizado} = 8,45 \text{ Bs.}}$$

### 2.4.- COSTO ESTIMADO DE LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVO A ESCALA DE LABORATORIO

Para determinar el costo de la obtención de carbón activo a escala de laboratorio, es necesario sumar los costos individuales más relevantes tales como costo de reactivos servicios varios, mano de obra, etc. Se determinará el costo por 1 kg de carbón activo de acuerdo al experimento óptimo efectuado.

**Tabla II – 11**

**Detalle de costos de obtención de carbón activo a escala laboratorio, para el análisis experimental óptimo efectuado**

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
1	Aserrín de cedro	kg	0,010	0,50	0,005
2	Cloruro de zinc	kg	0,05	190	9,5
3	Agua destilada	litro	0,5	4	2
4	Servicios varios	--	--	--	12,53 *
5	Mano de obra	día	1	100	50 †
<b>Costo total</b>					<b>74,035</b>

Fuente: Elaboración propia

\* Se calculó el valor de los servicios varios haciendo uso de los costos de energía calculados anteriormente.

† El costo de mano de obra equivale al costo aproximado de un medio día de trabajo, ya que el analista puede trabajar con dos muestras juntas, lo que reduce los días de trabajo a la mitad.

El costo detallado anteriormente, describe el costo de 5,127g de carbón activo obtenido durante un trabajo de investigación, por lo que el costo de este resulta demasiado alto, por tanto, para poder tener una estimación del costo real de este carbón, se debe realizar un análisis para reducir los costos en todos los procesos involucrados, ya que no todos los costos son proporcionales a la cantidad.

**Tabla II – 12**

**Detalle de costos de obtención de carbón activo a escala laboratorio, para el análisis experimental óptimo efectuado, para obtener 1kg de carbón activo.**

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
1	Aserrín de cedro	kg	1,950	0,50	0,97
2	Cloruro de zinc *	kg	4,876	30	146,28
3	Agua destilada	litro	24,37	2	48,75
4	Servicios varios	--	--	--	30
5	Mano de obra	día	1	100	100 †
<b>Costo total</b>					<b>326,00</b>

Fuente: Elaboración propia

\* Para obtener carbón activo no es necesario utilizar  $ZnCl_2$  p.a., puede utilizarse el técnico que es mucho más económico.

## 2.5.- EQUIPOS UTILIZADOS

- Secador de infrarrojos
- Secador de bandejas
- Agitador de barra magnética
- Mufla eléctrica
- Balanza analítica electrónica
- Agitador
- Centrífuga
- Espectrofotómetro de celdas cuadradas de 1mm

## **2.6.- MATERIAL DE LABORATORIO UTILIZADO**

- 1 desecador
- 2 vasos de precipitación de 500ml
- 2 recipientes de cerámica para calcinación de 250ml
- 1matraz aforado de 1000ml
- 1 matraz aforado de 500ml
- 1 matraz aforado de 100ml
- 1 matraz erlenmeyer de 500ml
- 2 matraces erlenmeyer de 1000ml
- 1 probeta de 500ml
- 1 espátula
- 16 frascos de plástico con doble tapa de 100ml
- 10 botellas de plástico con doble tapa de 250ml
- 16 tubos de plástico para centrífuga
- 1 mortero
- 1 gradilla
- Pipetas de 1,2,5 y 10ml

## **2.7.- REACTIVOS**

- 450ml de ácido clorhídrico 35%.
- 200ml de ácido sulfúrico 90%.
- 150g de cloruro de calcio
- 150g de cloruro de zinc
- 5g de azul de metileno
- 50g de carbón activo en polvo (SUCCHAR)
- 20 litros de agua destilada

## CAPÍTULO III

### DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

#### 3.1.- INTRODUCCIÓN

El análisis estadístico de los resultados obtenidos, es sumamente importante al momento de interpretar resultados experimentales obtenidos, puesto que con el podemos evaluar los valores dichos experimentos, además de proporcionarnos una estimación de los errores cometidos, o la precisión con que se han realizado. Un experimento diseñado estadísticamente nos da estimaciones de los principales efectos (influencia de las variables sobre las respuestas del experimento). Otra ventaja es que se obtiene mucha información aprovechable con un número relativamente reducido de ensayos.

#### 3.2.- DISEÑO FACTORIAL

El diseño factorial tiene la finalidad de estudiar todas las posibles combinaciones que se pueden dar entre las variables que se someten a prueba. En el presente trabajo se realizó el diseño factorial completo, en el cual se tienen 3 factores, el primero a 4 niveles y los otros dos a 2 niveles cada uno, con tres repeticiones, para el cual se introdujeron los datos provenientes de los análisis correspondientes de laboratorio.

Factor A: Tipo de activante

Factor B: Concentración del activante

Factor C: Temperatura de carbonización

El número de experimentos realizados son:

$$N_{\text{exp}} = N^{\circ} \text{ niveles } f_A \times N^{\circ} \text{ niveles } f_B \times N^{\circ} \text{ niveles } f_C \times N^{\circ} \text{ repeticiones}$$

$$N_{\text{exp}} = 4 \times 2 \times 2 \times 3 = 48$$

Se realizaron 48 experimentos elementales.

Los resultados son expresados en las siguientes tres tablas.

Para la adsorción, se utilizó una solución de azul de metileno de concentración 2mg/l.

**Tabla III -1**

**Primer ensayo**

<b>Muestra</b>	<b>Tipo de activante</b>	<b>Concentración del activante (%)</b>	<b>Temperatura de Carbonización (°C)</b>	<b>Porcentaje soluto adsorbido (%)</b>
1	Acido sulfúrico	10	400	68,57855
2		20		67,37003
3	Acido clorhídrico	10		55,76826
4		20		54,07634
5	Cloruro de calcio	10		92,02378
6		20		89,36505
7	Cloruro de zinc	10		76,31306
8		20		87,43142
9	Acido sulfúrico	10	700	76,07135
10		20		80,42202
11	Acido clorhídrico	10		100,00000
12		20		100,00000
13	Cloruro de calcio	10		67,37003
14		20		81,38883
15	Cloruro de zinc	10		86,94801
16		20		100,00000

Fuente: Elaboración propia

**Tabla III -2**

**Primera repetición**

<b>Muestra</b>	<b>Tipo de activante</b>	<b>Concentración del activante (%)</b>	<b>Temperatura de Carbonización (°C)</b>	<b>Porcentaje soluto adsorbido (%)</b>
1	Acido sulfúrico	10	400	60,60233
2		20		67,37003
3	Acido clorhídrico	10		49,24227
4		20		51,90100
5	Cloruro de Calcio	10		81,87224
6		20		86,94801
7	Cloruro de Zinc	10		68,09514
8		20		83,32246
9	Acido sulfúrico	10	700	75,82965
10		20		80,18031
11	Acido clorhídrico	10		100,00000
12		20		100,00000
13	Cloruro de Calcio	10		64,22788
14		20		76,55476
15	Cloruro de Zinc	10		85,98120
16		20		100,00000

Fuente: Elaboración propia

**Tabla III -3****Segunda repetición**

<b>Muestra</b>	<b>Tipo de activante</b>	<b>Concentración del activante (%)</b>	<b>Temperatura de Carbonización (°C)</b>	<b>Porcentaje soluto adsorbido (%)</b>
1	Acido sulfúrico	10	400	60,361
2		20		61,327
3	Acido clorhídrico	10		41,508
4		20		50,692
5	Cloruro de Calcio	10		81,872
6		20		85,256
7	Cloruro de Zinc	10		51,901
8		20		79,697
9	Acido sulfúrico	10	700	74,138
10		20		77,763
11	Acido clorhídrico	10		98,791
12		20		99,033
13	Cloruro de Calcio	10		63,744
14		20		75,346
15	Cloruro de Zinc	10		80,422
16		20		99,758

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de los porcentajes de soluto adsorbido a partir de los valores de absorbancia, se demuestra en el anexo 1.

De las tres repeticiones de adsorción realizadas, se efectuaron los criterios de descartación, para saber si los valores sospechosos (aquellos que difieren demasiado de los demás valores), se pueden descartar o no, mediante la ecuación de la t de Student, que se encuentra en la página 22 del manual de estadística:

$$t_i = |X - \bar{X}| / R$$

Donde:

X = valor sospechoso

$\bar{X}$  = promedio de las tres repeticiones

R = rango

Si:  $t_i > t_{tablas} \Rightarrow$  *el valor sospechoso se descarta*

El valor de  $t_{tablas}$ , se encuentra en la tabla A-18 del manual de estadística, que se encuentra en el anexo 2.

Después de realizar estos cálculos, se determinó que ninguno de los valores experimentales, debe ser rechazado, por lo que se prosiguió a tomar el valor promedio calculado, como valor real.

### 3.3.- SELECCIÓN DEL CARBÓN EXPERIMENTAL MÁS ADSORBENTE, MEDIANTE EL CÁLCULO DE LA T DE STUDENT

De las tres repeticiones experimentales realizadas, se prosiguió a determinar el valor promedio de estas, las cuales son descritas a continuación:

**Tabla III -4**  
**Datos finales promedio**

Muestra	Tipo de activante	Concentración del activante (%)	Temperatura de Carbonización (°C)	Promedio del Porcentaje adsorbido (%)
1	Acido sulfúrico	10	400	63,18050
2		20		65,35583
3	Acido clorhídrico	10		48,83943
4		20		52,22327
5	Cloruro de Calcio	10		85,25609
6		20		87,18971
7	Cloruro de Zinc	10		65,43640
8		20		83,48359
9	Acido sulfúrico	10	700	75,34624
10		20		79,45520
11	Acido clorhídrico	10		<b>99,59716</b>
12		20		<b>99,67773</b>
13	Cloruro de Calcio	10		65,11413
14		20		77,76328
15	Cloruro de Zinc	10		84,45041
16		20		<b>99,91943</b>

Fuente: Elaboración propia

Si observamos los valores promedio de la tabla anterior, encontramos que los porcentajes más altos de adsorción de azul de metileno, son los de las muestras 11, 12 y 16.

Usando estos tres valores, se hizo una nueva experimentación, se utilizó ahora una concentración 4mg/l. Se realizaron ahora 4 repeticiones, con el fin de tener datos más confiables, que nos demuestre estadísticamente, cual es el mejor carbón activo.

**Tabla III – 5**

**Determinación del mejor carbón experimental**

Nº	TIPO DE OBT	REP 1	REP 2	REP 3	REP 4	Prom	rango	sosp	t calc
11	HCl, 10%, 700°C	0,015	0,018	0,019	0,02	0,018	0,005	0,015	-0,600
12	HCl, 20%, 700°C	0,001	0,003	0,007	0,012	0,006	0,012	0,004	-0,146
16	ZnCl <sub>2</sub> , 20%, 700°C	0,000	0,001	0,002	0,008	0,003	0,008	0,001	-0,219

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el mismo criterio que en el punto 3.2, para determinar si los valores sospechosos, deben ser descartados o no. Para este fin se utilizó la ecuación ya descrita anteriormente:

$$t_i = |X - \bar{X}| / R$$

Donde:

X = valor sospechoso

$\bar{X}$  = promedio de las tres repeticiones

R = rango

Si:  $t_i > t_{tablas} \Rightarrow$  el valor sospechoso se descarta

El valor de  $t_{tablas}$ , se encuentra en la tabla A-18 del manual de estadística.

Con la cual se determinó, que ninguno de los valores sospechosos, puede ser descartado, de manera que el valor promedio es el valor real.

**3.4.- PRUEBA DE LAS DIFERENCIAS MÍNIMAS SIGNIFICATIVAS**

Esta prueba nos permite determinar si hay diferencias significativas entre uno y otro experimento, o si simplemente, la diferencia entre estos se debe a errores cometidos por el analista.

El cálculo de la f de Fisher se describe en el anexo 3.

El criterio descrito en el manual de estadística, indica lo siguiente:

Si:

$f_{calculado} > f_{tablas} \Rightarrow$  hay diferencias significativas entre los valores analizados

$$f_{calculado} = 19,02631579$$

$$f_{tabla_{10}} = 4,26 ; \quad f_{tabla_{11}} = 8,02$$

$f_{tabla_{10}}$ , es el valor de f de la tabla A-10 (ver anexo 4), con una probabilidad del 95%, y  $f_{tabla_{11}}$ , es el valor de f expresado en la tabla A-11(ver anexo 5), con una probabilidad del 99%.

Por lo tanto como 19,02631579 es mucho mayor que 4,26, y que 8,02, existe una probabilidad del 99% de que si existe diferencia significativa entre los tres carbones obtenidos.

Como se puede observar en la tabla III-5 y de acuerdo al análisis de las diferencias mínimas significativas, el carbón más adsorbente de todos, es el número 16, obtenido con  $ZnCl_2$  al 20% en peso y a una temperatura de 700°C, por lo tanto este es el mejor tratamiento para la obtención de carbón activo.

## CAPÍTULO IV

### COSTOS

#### 4.1.- ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO

Se tomaron en cuenta los costos efectuados, desde el primer día de iniciado el presente trabajo. Los costos considerados se muestran en las tablas siguientes:

**Tabla IV – 1**  
**Detalle de servicios directos**

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
1	Análisis de humedad	análisis	1	21	21
2	Ensayos p/ curva de calibración	análisis	12	30	360
3	Lecturas de absorbancia	análisis	62	30	1860
4	Servicios varios (energía, agua)	hora	42	20	840
5	Mano de obra	día	60	100	6000
<b>Costo subtotal (1)</b>					<b>9081</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla IV– 2**  
**Detalle de servicios indirectos**

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
1	Internet	horas	100	2,5	250
2	Transporte	pasajes	300	1	300
<b>Costo subtotal (2)</b>					<b>550</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla IV – 3**

**Detalle de materia prima y reactivos químicos**

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
1	Aserrín de cedro	kg	2	1	2
2	Ácido clorhídrico	litro	1	140	140
3	Ácido sulfúrico	litro	1	130	130
4	Cloruro de calcio	kg	1	15	15
5	Cloruro de zinc	kg	1	190	190
6	Azul de metileno	g	5	6	6
7	Agua destilada	litro	20	4	80
<b>Costo subtotal (3)</b>					<b>563</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla IV – 4**

**Detalle de materiales**

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
1	Frascos de 100ml	pieza	16	1,50	50
2	Botellas de 250ml	pieza	10	1,5	10
3	Botellas de 1000ml	pieza	10	3	80
4	Recipientes cerámicos	pieza	16	4	64
<b>Costo subtotal (4)</b>					<b>204</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla IV – 5**

**Detalle de material de escritorio**

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs.)	Costo total (Bs.)
1	Bolígrafos	pieza	10	5	50
2	Papel	hojas	600	0.10	60
3	Tinta de impresora	cartucho	2	180	360
4	Bibliografía (fotocopias)	hojas	100	0.30	30
5	marcadores	unidad	2	5	10
<b>Costo subtotal (5)</b>					<b>510</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla IV – 6****Costo total**

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo total (Bs.)</b>
<b>1</b>	<b>Detalle de servicios directos</b>	<b>9081</b>
<b>2</b>	<b>Detalle de servicios indirectos</b>	<b>550</b>
<b>3</b>	<b>Detalle de materia prima y reactivos químicos</b>	<b>563</b>
<b>4</b>	<b>Detalle de materiales</b>	<b>204</b>
<b>5</b>	<b>Detalle de material de escritorio</b>	<b>510</b>
<b>TOTAL</b>		<b>10908</b>

Fuente: Elaboración propia

**4.2.- ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CADA PROCESO SEGÚN BALANCES REALIZADOS****Tabla IV – 7****Tabla de balances con costos**

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario (Bs.)</b>	<b>Costo total (Bs.)</b>
<b>1</b>	Balance en el secador	-	1	3,52	3,52
<b>2</b>	Balance en el agitador	-	1	0,56	0,56
<b>3</b>	Balance en la mufla	-	1	8,45	8,45
<b>TOTAL</b>					<b>12,53</b>

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1.- CONCLUSIONES

Durante la elaboración del presente trabajo de investigación, se logró determinar las variables de mayor incidencia en las diferentes etapas del proceso de obtención del carbón activo por el método de activación química. En consecuencia se tiene que:

- Los mayores rendimientos en peso, se obtienen a partir de la activación con las sales cloruro de calcio y cloruro de zinc, siendo menores los rendimientos ofrecidos por los ácidos, sulfúrico y clorhídrico.
- El factor concentración también tiene mucha influencia en el rendimiento en peso, siendo el primero inversamente proporcional al segundo, excepto para el carbón activado con cloruro de calcio que es directamente proporcional, esto significa que en el caso de los tres activantes (menos el cloruro de calcio), disminuye el rendimiento en peso a mayor concentración y viceversa.
- La temperatura es otro factor de gran relevancia en el rendimiento en peso, ya que para todos los tratamientos realizados, a mayor temperatura, menor es el rendimiento y obviamente a temperaturas menores se tiene un mayor rendimiento en peso.
- En la activación con cloruro de calcio ocurre un fenómeno diferente a los demás, que es el causante de la diferencia de los rendimientos con respecto a los otros. Ocurre que durante la carbonización, el cloruro de calcio tiende a deshidratarse y forma cristales nuevamente, ocasionando un valor erróneo del rendimiento.
- Durante los ensayos de adsorción de azul de metileno, se determinó a partir de cual tratamiento se obtiene el mejor carbón activo. El mejor carbón activado obtenido, es el que recibió el siguiente tratamiento:

- Activante:  $\text{ZnCl}_2$
- Concentración: 20%

- Temperatura: 700°C

Además de obtenerse el carbón activo más adsorbente, también se obtiene un rendimiento superior al que ofrecen ambos ácidos.

- Por último, se demostró que sí es posible obtener carbón activado a escala de laboratorio, haciendo uso de los residuos forestales generados y que es posible llevar este proyecto a una escala superior.

## **5.2.- RECOMENDACIONES**

- Se recomienda utilizar una materia prima de granulometría media, pero necesariamente tamizada y seleccionada, puesto que de no ser así, el producto obtenido no será uniforme, tanto en tamaño como en calidad. Lo que sucede es que al existir trozos de madera demasiado grandes, estos necesitan mayor tiempo de agitación y mayor tiempo de carbonización, ocasionando un mayor costo. En caso de utilizar una granulometría demasiado pequeña, se corre el riesgo de que contenga demasiada tierra e impurezas, ya que la materia prima se encuentra expuesta a este tipo de contaminación.
- Se recomienda realizar siempre un secado a la materia prima, con el fin de permitir al activante, ocupar los poros desalojados por el agua evaporada y de esta manera obtener una mejor activación.
- En el proceso de agitación, se recomienda trabajar a una temperatura media de 45°C, ya que el cloruro de zinc tiende a cristalizar a temperatura demasiado bajas.
- Se recomienda efectuar lavados al carbón activo obtenido, ya que después de la activación, existe la posibilidad de que se tengan vestigios de activante, el lavado se debe realizar con agua muy limpia, mucho mejor si se trata de agua destilada o desionizada, ya que de lo contrario, se contaminaría el carbón en vez de lavarlo.
- Se recomienda mantener al carbón activo siempre protegido de la humedad y de los malos olores, ya que al tratarse de un material muy adsorbente puede ser contaminado en caso de no tomar las previsiones adecuadas.

- También se recomienda en lo posterior, realizar más estudios de investigación acerca de la utilización de nuevas materias primas existentes en el departamento. Debido a que existen materiales aptos para este fin, y que a falta de conocimiento, los mismos son regalados o desperdiciados, ocasionando incluso, contaminación al medio ambiente.
- Por último, se recomienda realizar investigaciones acerca de la obtención de carbón activo por el método de activación física, la cual no se escogió para este proyecto, debido a las severas condiciones que se requieren y que no se cuenta con los equipos necesarios en la universidad ni en la región.