

# PRODUCCION SUSTENTABLE DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CAÑA DE BAMBÚ

Varriano, Nicolás<sup>1</sup>(1º Autor)\*; Gil, Marcelo<sup>1</sup>; Cozzarín, Raúl<sup>1</sup>; Pereyra, Andrea<sup>1,2</sup>; Balasini, Joaquín<sup>1</sup>; Alberino, Juan<sup>1</sup>; García Enríquez, Santiago<sup>1</sup>; Pucacco, Sebastián<sup>1</sup>

(1) *Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata*

(2) *UNLP-CINDECA*

[varriano@frlp.utn.edu.ar](mailto:varriano@frlp.utn.edu.ar)

## RESUMEN

El presente trabajo establece la posibilidad de obtener carbón activado utilizando como precursor caña de bambú obtenida de la zona ribereña del partido de Berisso. Se analizan tecnologías disponibles, potenciales aplicaciones, mercados de uso y la prefactibilidad económica financiera para su producción.

El carbón activado ha probado ser un adsorbente por excelencia, fácil de manipular y de gran efectividad, y su empleo para el tratamiento de gases y líquidos es ampliamente conocido. Actualmente Argentina importa el 75% del producto para sus distintas aplicaciones.

El carbón activado fue obtenido en un reactor piloto mediante pirolisis y activación física y a través de ensayos de laboratorio se pudo establecer la factibilidad de obtener dicho material con niveles adecuados de eficiencia, coincidentes con los datos bibliográficos.

El incremento del valor agregado a la actividad de producción de caña de bambú en la zona, contribuirá al mejoramiento del nivel socio económico de la región a partir de una nueva materia prima, un eficiente manejo del recurso energético y una relación costo beneficio que viabilice la factibilidad de avance en el proyecto de construcción de una planta productora de carbón activado. Por otra parte se evitará la quema indiscriminada, eliminando de esta forma las consecuencias ambientales que esa práctica produce en la actualidad.

Cabe mencionar que la Secretaria de la Producción de la Municipalidad de Berisso, conjuntamente con los productores de caña de bambú de esa localidad, han demostrado un gran interés por obtener un mayor aprovechamiento del recurso, comprometiéndose a contribuir con los objetivos del presente trabajo.

**Palabras Clave:** carbón activado, bambú, producción sustentable.

## 1. INTRODUCCIÓN

El carbón activado es una sustancia sólida negra, extremadamente poroso, con una gran área de superficie, muy adsorbente y se produce típicamente a partir de precursores orgánicos.

Los procesos de adsorción, utilizando carbones activados, se usan ampliamente para remover o para eliminar contaminantes de las aguas de desecho o en la purificación de aguas utilizadas en los procesos industriales.

La producción de carbones activados se ha visto notablemente incrementada en las dos últimas décadas dadas sus amplias posibilidades de aplicación. Los carbones activados pueden obtenerse a partir de diversos precursores carbonosos, especialmente carbón mineral, madera, carozos y cáscara de frutas, turba, y diversos vegetales de alto contenido fibroso, tal como cañas de diverso origen. La demanda creciente de estos absorbentes ha incentivado la búsqueda de nuevas fuentes de materias primas, de disponibilidad segura y bajo costo, centrándose la atención especialmente en materiales renovables [1-2-3-4]. En ese sentido, varios residuos agroindustriales, tales como cáscara de nueces, carozos de frutas, bagazo de caña de azúcar y cortezas de algunas especies de crecimiento rápido, han sido recientemente investigados como posibles precursores mediante diferentes técnicas de activación [1-5-6-7]. La elección del precursor es, fundamentalmente, una función de su disponibilidad, precio y pureza, pero el proceso de fabricación y posible aplicación del producto final deben ser muy tenidos en cuenta. El uso de nuevas materias primas en la producción de adsorbentes carbonosos se justifica por muchas razones. Independientemente del precursor de que se trate, es importante conocer el ciclo térmico por el que se transita, ya que las pérdidas en masa que tienen lugar durante los procesos de termo conversión está determinada por sus características específicas, ya que la estructura celular de cada precursor vegetal es definitoria en la micro-estructura de sus carbones activados. De igual importancia son los métodos de activación. El problema básico en el desarrollo de un carbón activado a partir de un precursor es la extensa cantidad de parámetros físico químicos involucrados. Además la eficiencia del producto final depende de la aplicación, por lo que la definición del proceso depende de la misma [8].

En el presente trabajo se evalúa la factibilidad de obtener y comercializar carbón activado de calidad comercial, utilizando como materia prima caña de bambú de la zona ribereña del partido de Berisso. A través de la caracterización físicoquímica se pretende determinar la factibilidad de carbonización y activación del precursor, estimar la eficiencia del proceso y determinar las propiedades del producto obtenido con el fin de analizar la factibilidad de su utilización.

A partir de los resultados obtenidos se pretende:

- Evitar la quema indiscriminada de un recurso natural, cuyo uso puede ser de significativa importancia para los productores.
- Obtener un producto de uso intensivo en la descontaminación y mitigación de contaminantes ambientales.
- Mejorar la calidad de vida de los productores a través del aprovechamiento de un recurso renovable del cual se puede obtener un producto de alto valor agregado.
- Mejorar la calidad ambiental de los pobladores de la zona.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1. Materia Prima

La biomasa vegetal es una fuente natural renovable que puede convertirse en materiales útiles y energía. La idea de utilizar bambú para producir carbón activado está dentro de este contexto. El bambú es una hierba, el grupo más diverso de plantas en esta familia. Pertenece a la sub-familia *bambusoidae*, de la familia *Poaceae*. El bambú aparece naturalmente en todos los continentes excepto en Europa con más de 1200 especies, distribuidas en 70 géneros; estas están entre las plantas de más rápido crecimiento en el planeta. Para la mayoría de los propósitos el bambú puede ser cosechado en dos o tres años, haciendo de él un verdadero recurso renovable.

Se han identificado aproximadamente 1500 aplicaciones comerciales del bambú, mayormente en Asia. Este es un material altamente renovable, resistente y versátil, y ha sido conocido y utilizado durante miles de años.

### 2.2. Producción de caña de bambú en el partido de Berisso.

El Municipio de Berisso posee una superficie de 144 km<sup>2</sup> y una población de 80.092 habitantes (CNPV 2001), de los cuales el 1,4% corresponde al ámbito rural.

Una de las características distintivas del sector rural del partido es la elevada diversificación productiva de los establecimientos, situación que revela un patrón de conducta minimizador de riesgos.

La información recabada durante el trabajo de campo en el área rural del partido, fue empleada en la construcción de las variables seleccionadas, cuyo análisis permitió la realización del diagnóstico. De acuerdo a dicha información, se puede apreciar una amplia distribución espacial de productores rurales en función de la zonificación municipal. La superficie total agropecuaria

relevada fue de 2.590 ha., mientras que la realmente trabajada asciende a 2.091,1 ha.. Esto significa una relación superficie trabajada sobre superficie total de 80,55%. El 66% del ingreso principal proviene de las actividades productivas desarrolladas por la horticultura, fruticultura y ganadería, seguido del cultivo de caña 13% y forestación 11%. Figuras 1 y 2.

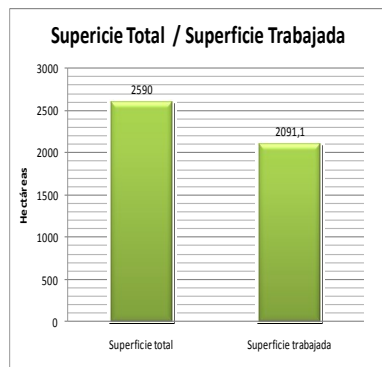


Figura 1

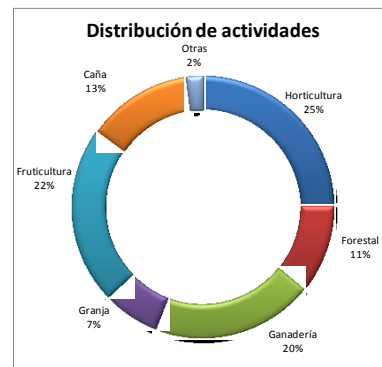


Figura 2

El 80 % de los establecimientos rurales de Berisso tiene incorporado a sus combinaciones de actividades productivas el cultivo de caña. La difusión extendida de esta actividad está asociada a características propias del cultivo: bajo riesgo, adaptado a las condiciones locales, de bajo costo y cierta seguridad de mercado aunque con escasa rentabilidad. La combinación fruticultura/forestal representa un 20% del total, al igual que la combinación horticultura/caña.

La especie predominante es el bambú conocido como "Caña Tomatera" o "Tacuarita" *Arundinaria simonii* cuyo destino actual es exclusivamente para tutores de plantas de tomates. En los últimos años la modalidad de siembra del tomate fue cambiando trayendo aparejada una disminución en sus ventas y la potencial quema de sus excedentes con las consecuencias ambientales de tal situación. Otras especies son "Caña de Pesca" o "Tacuara *Phyllostachys aurea* y la Caña de nudo largo "India *Bambusa tuldois* que se utiliza en tutores forestales, construcciones elementales y artesanías.

El cultivo se realiza en los albardones o tierras anegadizas pero de fácil escurrimiento en el bajante, salvo un pequeño grupo de productores que sistematizan los pajonales para garantizar mediante zanjos la salida de las aguas. En muchas plantaciones estas especies crecen de forma silvestre por su gran adaptación. Figuras 3 y 4

Se estima que hay más de 300 hectáreas en condiciones de ser cosechadas siendo el turno de corte de alrededor de tres años. Los trabajos de corte se realizan en forma manual al igual que la construcción de zanjas. El periodo de corte es de marzo a octubre. La cosecha es retirada utilizando tractores con acoplados y/o embarcaciones y se las carga en camiones.

Es de mencionar que parte de lo cosechado, en las actuales condiciones de cultivo, debe incinerarse en el lugar para garantizar la correcta crianza de los nuevos brotes, con la consecuencia ambiental que ello trae aparejado.



Figura 3. *Cultivo maduro para la cosecha*



Figura 4. *Caña cultivada*

### 2.3. Métodos de Obtención de Carbón Activado

El bambú o los desechos de la industrialización del mismo, pueden utilizarse para convertirlos en productos con valor agregado, tal como carbón activado. Los carbones activados son formas no gráficas de carbón con un área superficial interna elevada, debido a la porosidad intrínseca del precursor y/o desarrollo de esta durante el proceso de activación. Su red porosa está constituida principalmente por micro poros con tamaños de poros por debajo de 2 nm, por meso poros con

tamaños comprendidos entre 2 y 50nm y por macro poros con dimensiones superiores a los 50nm. Los micro poros generalmente contribuyen a la principal parte del área de superficie interna. Los macro y los meso poros generalmente pueden considerarse como las vías principales dentro de la partícula de carbón y son fundamentales para la cinética de adsorción. La estructura de poro deseado de un producto de carbón activado, se alcanza combinando la materia prima correcta y las condiciones de activación.

Por otra parte también es variable la naturaleza y cantidad de grupos químicos funcionales existentes en la superficie de los carbones, responsables de la mayor o menor afinidad entre el adsorbente y especie a adsorber [2].

La adsorción puede ser clásicamente definida como la deposición sobre la superficie del material, debido a la condensación capilar dentro de la multitud de sitios porosos activos disponibles. Debido a que los compuestos químicos orgánicos a menudo son responsables de los problemas derivados de sabor, olor y color, la filtración por carbón activado puede generalmente utilizarse para eliminar tales impurezas. De igual manera, se fundamenta la retención de trazas de compuestos inorgánicos tales como metales pesados [9].

Existe más de un proceso de obtención del carbón activado. Su preparación puede ser por activación física y/o química. Durante el proceso de activación química la carbonización y la activación es llevada a cabo por medio de una descomposición térmica, en un horno, impregnando la materia prima con agentes químicos (solución acuosa de ácido fosfórico, cloruro de zinc o ácido sulfúrico). El carbón resultante se lava profundamente para eliminar los restos del agente. Una gran desventaja de este proceso de activación es el peligro que representa para el medioambiente las sustancias usadas [10-11].

La activación física se obtiene mediante una carbonización (pirólisis) y subsiguiente activación de los compuestos carbonados, prefiriéndose aquellos compuestos que permiten obtener rendimientos económicamente razonables, ya que son considerables las mermas de peso debidas al desprendimiento de los componentes volátiles durante la carbonización y la activación.

La carbonización puede efectuarse con un gradiente de temperaturas de 100°C a 850°C. El tiempo de permanencia debería ser de aproximadamente 1 hora a 4 horas. Con ello, el material carbonizado debería alcanzar una temperatura entre los 400°C y 800 °C. El efecto se logra bajo condiciones inertes (por ejemplo: nitrógeno) o a lo sumo ligeramente oxidantes.

Paso siguiente es la activación. El proceso se logra a partir de deshacer de manera selectiva y dirigida, bajo condiciones adecuadas, una parte del carbono generado durante la carbonización. Con ello se originan numerosos poros, hendiduras y fisuras, y la superficie, referida a la unidad de masa, aumenta considerablemente. Durante la activación tiene lugar una pérdida de sustancia que puede ser considerable, y se produce un incremento de la porosidad y a un aumento de la superficie interior (volumen de poros). Por ello, la activación tiene lugar bajo condiciones oxidantes, selectivas o controladas. En términos generales gases de activación habituales son: el oxígeno, en especial en forma de aire, vapor de agua y/o dióxido de carbono

La activación se lleva a cabo a temperaturas de aproximadamente 600°C a 1000°C y los tiempos de permanencia pueden ser aproximadamente de 1 a 4 horas. La superficie que se logra está en un rango típico de 500 a 1400 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>.

Debido a que la producción de carbón activado involucra una reacción no catalítica entre sólido-gas, es esencial tener un reactor que permita un buen contacto entre las dos fases y un buen proceso de transporte.

#### **2.4. Caracterización del carbón activado.**

Las normas de la American Society for Testing and Materials Standards (ASTM) establecen pruebas estándar necesarias para establecer la calidad del carbón obtenido, entre ellas están: el porcentaje de humedad, volátil, cenizas, carbón fijo, y la resistencia a la abrasión. Para la caracterización de la estructura porosa del carbón activado, se suelen utilizar algunas técnicas sencillas como la utilización del Índice de yodo (Norma ASTM 3555/00).

La determinación de una isoterma de adsorción permite deducir la superficie específica, a través de la conocida ecuación BET (Brunauer, Emmett y Teller). En general, la superficie específica varía entre 500 y 2000 m<sup>2</sup>/g. Además, es posible determinar la porosidad del carbón accesible a la molécula que se adsorba. La estructura microporosa del carbón puede obtenerse a partir de la adsorción de nitrógeno a 77 K y dióxido de carbono a 273 K. El dióxido de carbono permite determinar el volumen de microporos más estrechos, mientras que la de nitrógeno suministra el volumen total de microporos.

El análisis de las variables del proceso tales como: temperatura y tiempo de residencia para la carbonización, y temperatura, tiempo de residencia y flujos de vapor de agua y nitrógeno para la activación, permitirán optimizar, en base a los resultados obtenidos, las condiciones experimentales más adecuadas para la extrapolación de estos resultados a la obtención del producto a escala industrial.

### 3. OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

La investigación se lleva adelante abordando dos aspectos fundamentales:

- Demostrar desde el punto de vista físico químico que la caña de bambú y sus residuos pueden ser utilizados como precursores en la producción de carbón activado.
- Determinar, a partir de datos de producción cañera y rendimiento, cual sería su potencial de producción sustentable en el área estudiada.

#### 3.1. Diseño experimental

Para la preparación del carbón activado se utilizó, como materia prima, la variedad *Arundo donax* proveniente de la zona ribereña del partido de Berisso.

El material fue secado y trozado en pequeñas fracciones, hasta obtener un tamaño adecuado. La caracterización química del precursor se realizó según norma ASTM 2866 y 5832, y se obtuvieron valores de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo, aproximados a los hallados en trabajos antecedentes [12].

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos del análisis próximo del precursor.

La determinación de cenizas es importante, debido a que la naturaleza y cantidad de estas afectan el desempeño del material como absorbente. Los resultados obtenidos, a través del análisis próximo, muestran que el material por el cual se optó es rico en carbón y tiene una baja cantidad de cenizas lo que lo hace adecuado como precursor para la preparación de carbones activados.

Tabla 1. Análisis próximo del precursor

	% en peso
<b>Humedad</b>	8.5
<b>Volátiles</b>	10.5
<b>Cenizas</b>	19.6
<b>Carbón Fijo</b>	61.4

#### 3.2. Reactor Piloto. Reacción de carbonización

El proceso de carbonización se llevó a cabo a temperatura de 500°C durante una hora con flujo de N<sub>2</sub> para garantizar atmósfera inerte en un reactor de lecho fijo de acero inoxidable de 10 cm de longitud y 7.5 cm de diámetro instalado dentro de un horno con control de temperatura. La evolución de la curva de calentamiento se observó en un software destinado al efecto. Tanto el ingreso de N<sub>2</sub> como de vapor de agua se suministró a través de un tubo de 0.6 cm de diámetro del mismo material conectado a la parte inferior del reactor. El material se soportó sobre una malla crivada para una mejor distribución de los flujos de gas N<sub>2</sub> y el vapor. Los gases producto de la reacción se evacuan por la parte superior del reactor a través de un conducto de diámetro similar. Se empleó un método similar al utilizado por Villegas Aguilar [13].

Se optó por efectuar las reacciones de carbonización y activación durante dos fases consecutivas del proceso.

En la Figura 5 se puede observar el diagrama de flujo completo del sistema y en la Figura 6 las instalaciones y en la Figura 7 el pequeño reactor con el material precursor.

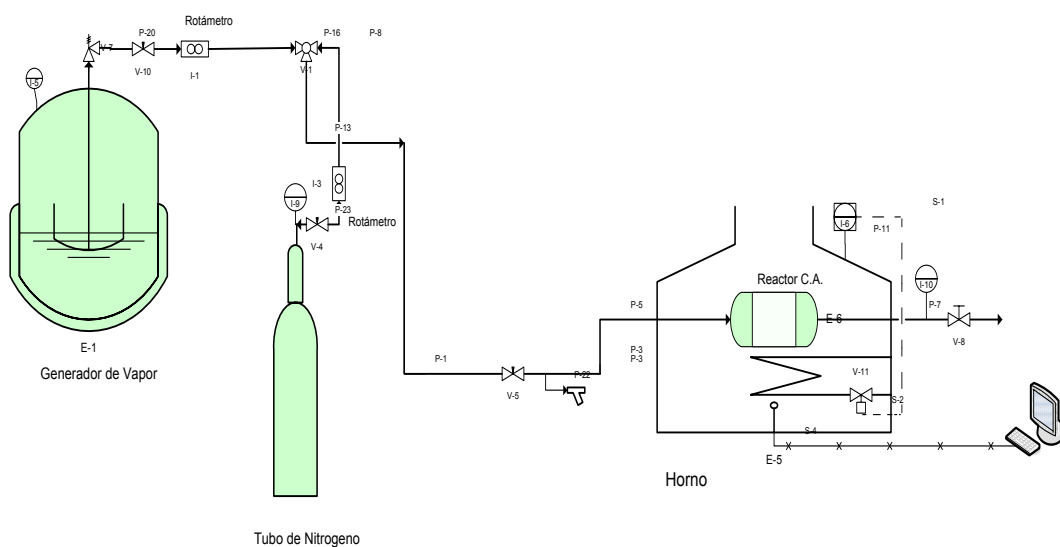


Figura 5. Esquema del equipo experimental





Figura 6. Instalaciones



Figura 7. Reactor con material precursor

El pequeño reactor dentro del horno y el producto obtenido pueden verse en las figuras 8 y 9



Figura 8. Reactor a 650°C



Figura 9. Producto Final

### 3.3. Proceso de Activación Física.

El proceso físico también se conoce como activación térmica a pesar de que la activación se produce debido a una reacción (química) del agente activante (un oxidante como el aire, vapor de agua,  $\text{CO}_2$ , etc.).

Se optó para el presente trabajo el proceso de activación física. Se utilizó como agente oxidante vapor de agua saturado a 100°C abastecido desde una pequeña caldera. Dado que la reacción es endotérmica se suministró una temperatura constante (600 – 700°C).

Es de mencionar que según experiencias ya realizadas, en general el material de partida es molido hasta formar un fino polvo. De esta forma se consigue una mejor difusión del agente activante y por lo tanto una mejor porosidad del producto resultante. En este caso se optó por un troceado y no una molienda para obtener un tamaño más adecuado del precursor. Este hecho permite suponer que ensayos realizados bajo esa forma podrían haber dado resultados superiores en cuanto a valores de activación.

La activación propiamente dicha se llevó a cabo inmediatamente después del proceso de carbonización y consistió en hacer reaccionar al agente activante (vapor) con los átomos de carbono del producto de la pirolisis que está siendo activado; de forma de producir un “quemado selectivo” que va horadado progresivamente al carbonizado, generando poros y aumentando la porosidad hasta transformarlo en un carbón activado. Estos agentes dan lugar a las reacciones químicas ya descritas donde se eliminan átomos de carbono produciendo así la porosidad. El producto sólido de la pirolisis, se activó a diferentes temperaturas y tiempos de activación. Para evaluar la influencia simultánea de las condiciones operacionales (temperatura y tiempo) y optimizar con ello el proceso estudiado se empleó un diseño de experimentos factorial  $3^2$

### 3.4. Caracterización del carbón Activado

El análisis de la capacidad de adsorción se realizó a través de la adsorción de azul de metileno mediante un espectrofotómetro Beckman DU0664 midiendo la absorbancia a una longitud de onda de 66 nm. Este ensayo se realizó solo en forma preliminar como indicador de posibles resultados positivos antes de diseñar los ensayos posteriores, donde se optó por la determinación del Índice de Yodo según la Norma ASTM D4607-94.

El rendimiento del proceso se obtuvo a partir de la masa obtenida y se calculó como pérdida de peso en base seca.

El ensayo BET solamente se realizó en casos puntuales y sobre muestras con buen resultado de Índice de Yodo debido a la imposibilidad de contar con el equipo en forma permanente.

El número de yodo es un índice del área superficial de un carbón activado. Esto se debe a que el yodo se absorbe con mucha eficiencia en una capa monomolecular y su tamaño le permite alojarse hasta en los poros más pequeños en los que se lleva a cabo la adsorción. Por lo tanto, la cantidad de yodo adsorbido es proporcional al área del carbón. Este análisis es sencillo y suele utilizarse como la principal herramienta de control de calidad en la producción de carbón de calidad y como método de evaluación que puede realizar el comprador. Hay que señalar una coincidencia afortunada que consiste en que el número de yodo, que se expresa en mg/g-miligramos de yodo adsorbidos por gramos de carbón tiene un valor aproximadamente igual al del área superficial obtenida por el método BET de adsorción de N<sub>2</sub>, expresada en m<sup>2</sup> /g .

El análisis de los resultados de la caracterización del precursor así como la de los carbones activados obtenidos a partir del bambú permite la optimización de las condiciones operacionales a fin de obtener un producto con el máximo poder adsorbente.

### 3.4.1. Índice de Yodo y área superficial en un carbón activado

La determinación del Número de Yodo se realizó en el laboratorio de Evaluación de la Calidad de Aguas Suelos y Sedimentos (ECASS) de la U.T.N. Facultad Regional La Plata.

Para la determinación del área superficial del carbón activado se utilizó el método BET. Los ensayos se llevaron a cabo en Centro de Investigación y Desarrollo de Ciencias Aplicada (CINDECA) de la Universidad Nacional de La Plata, con un equipo Micromeritics ASAP 2020 V3.00H. La caracterización textural de los carbones activados se realizó por adsorción de N<sub>2</sub> a la temperatura de 77K.

### 3.4.2. Influencia de la temperatura y el tiempo

Para determinar la influencia de las variables tiempo y temperatura, se realizaron los ensayos sobre la variedad "Tacuara *Phylostachys aurea (Arundo donax)*. Las pérdidas de material, los rendimientos en los ensayos y el Índice de yodo se pueden observar las Tabla 2.

Tabla 2.

N° de muestra	Peso Inicial (grs.)	Temp. de Activación (°C)	Tiempo de Activación (min.)	Peso Final (grs.)	Rendimiento	Iy
1	58.3	600	30	9.97	17.1%	475
	58.6	600	45	9.37	16%	478
3	58	600	60	9.28	16%	652
4	58.2	650	30	9.9	17%	890
5	59	650	45	8.85	15%	1020*
6	58.7	650	60	9.4	16	910
7	58.9	700	30	9.4	16%	781
8	58.2	700	45	6.92	12%	-
9	58.1	700	60	5.82	10.0%	-

Se observa que el aumentar el tiempo se incrementa la pérdida de peso, o lo que es lo mismo la cantidad de destilados. En cuanto a la temperatura se puede observar un comportamiento similar en las diferentes series; al aumentar se produce un incremento muy suave y prácticamente lineal de la pérdida de peso, siendo más pronunciada con temperaturas de 700°C. Este factor es de suma importancia al considerar que el trabajo apunta a obtener el mayor rendimiento posible tanto en cantidad de material como en capacidad de adsorción. Los rendimientos obtenidos fueron del orden del 15 al 17 % en la zona 600 a 650 °C, notándose la pérdida pronunciada de peso al incrementar el tiempo y la temperatura en el caso de los 700°C. Este comportamiento se corresponde con lo reportado en la literatura para productos de naturaleza semejante y el mismo tiene una importancia decisiva en el desarrollo poroso de los adsorbentes.

### 3.4.3. Índice BET.

Las propiedades de textura del carbón (área específica, volumen de los poros y el diámetro promedio de los poros), se determinaron por medio de un equipo de fisisorción de N<sub>2</sub> (Micromeritics, ASAP 2020 V3.00 H).

Para la determinación del área superficial y volumen de microporos se utilizaron las ecuaciones de Brunauer-Emmett-Teller (BET) y de Dubinin-Radushkevich (D-R)

El análisis BET se realizó sobre la especie (*Arundo donax*) con de mayor Índice de Yodo (\*). Los resultados de BET se reproducen en la Tabla 3:

Tabla 3. Determinación de área superficial y volumen de poros

<b>BET Surface Area</b>	<b>980.5034 m<sup>2</sup>/g</b>
Langmuir Surface Area	1263,1700 m <sup>2</sup> /g
t-Plot Micropore Area	869,8609 m <sup>2</sup> /g
t-Plot External Surface Area	110,6425 m <sup>2</sup> /g
Pore Volume	0.451762 cm <sup>3</sup> /g
Micro Pore Volume	0.4008 cm <sup>3</sup> /g

Es de destacar un muy buen valor de Índice BET a 650°C y 45min que se corresponde con el Índice de Iodo de 1020. Este resultado afirma la posibilidad de utilizar la especie como materia prima para la obtención de carbón activado.

Del análisis de la isoterma se observó un ciclo de histéresis, el cual se asocia al llenado y vaciado de los poros por dos rutas diferentes: adsorción y desorción. Esto se debe a la no coincidencia de las velocidades de adsorción y desorción en un determinado rango de presiones relativas.

Estos tipos corresponden a materiales con poros laminares y su estructura está conformada principalmente por microporos. Entendiéndose a la muestra como un carbón de buenas características, compatible con la calidad de muchos productos ofrecidos en el mercado.

#### 3.4.4. Caracterización del carbón activado por Espectroscopía Infrarroja con transformadas de Fourier (FTIR).

La técnica FTIR permite conocer la química superficial del carbón obtenido. La importancia de esta técnica recae en que accede a tener información sobre los grupos funcionales presentes en la superficie de los carbones activados, los cuales pueden tener un papel crucial en la adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Estos grupos funcionales superficiales le otorgan al carbón activado propiedades hidrofílicas.

Dadas las características propias de la caña, se puede considerar como que su composición es de una matriz compleja a base de fibra formada por polímeros naturales en los cuales la frontera de la fibra estaría formada de microfibrillas de celulosa cristalina que suelen contener celulosa hemicelulosa y lignina en distintos porcentajes.

El equipo instrumental utilizado fue un Espectrofotómetro Shimadzu modelo 1600T. Las muestras fueron analizadas en un rango espectral de 4000 - 400 cm<sup>-1</sup>.

En la Figura 10 se muestra los espectros FTIR del carbón activado preparado a partir del precursor (bambusoidae). El espectro presenta diferentes bandas de ancha atribuidas a grupos hidroxílicos (O-H), ácidos carboxílicos (C-H), uniones C=O y de C-O en ésteres (=C-O-C), estos últimos son grupos característicos en la celulosa.

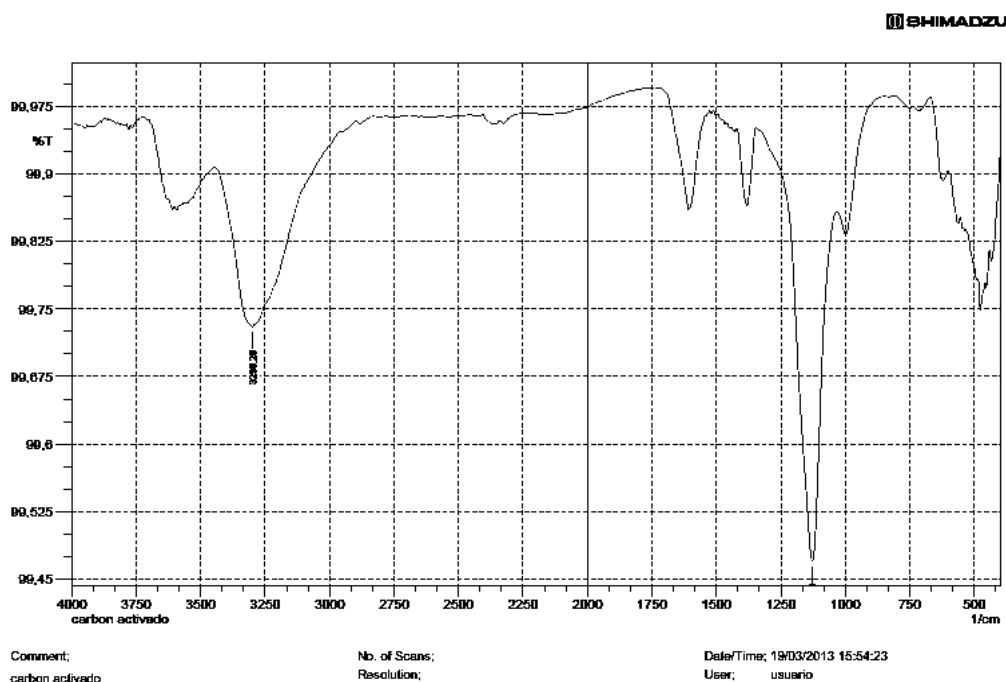


Figura 10. Espectro FTIR de la muestra de carbón activado seleccionada

Estos grupos funcionales OH serían los responsables de la carga superficial de los carbones activados en estudio y en donde posiblemente se produce la adsorción de las especies de cromo.



Por otra parte es ampliamente conocido que los grupos funcionales que contienen oxígeno pueden ser usados como puntos activos que pueden adsorber metales en solución acuosa. Por lo tanto debido a la presencia de grupos carbonilos o carboxilos en la muestra de carbón activado se espera que el material tenga una buena capacidad de adsorción. Estos grupos ácidos están generalmente ubicados en los bordes de la capa de grafito [18].

### 3.4.5. Análisis morfológico del precursor y de los carbones activados mediante microscopía electrónica de barrido (SEM)

Para poder apreciar la morfología del carbón activado obtenido con mayor nitidez, se realizó un análisis mediante microscopía electrónica de barrido, en diferentes tamaños con aumentos de 500x, 2500x y 10000x.

Las Figuras 11 y 12 muestran las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido SEM de la superficie del carbón activado obtenido a partir de la variedad bambusoidae. Se puede observar que a escala micrométrica, la morfología de la superficie externa, presenta cavidades con un alto grado de uniformidad y rugosidad, estos espacios son del orden de 800 a 1250 nm.

Si bien los microporos y mesoporos no son visibles, las fotografías presentan las formas y localización de los macroporos sobre la superficie de la muestra. Los macroporos se forman durante la activación por efecto del vapor de agua y la pérdida de material volátil durante la pirólisis y favorecen los procesos difusionales.

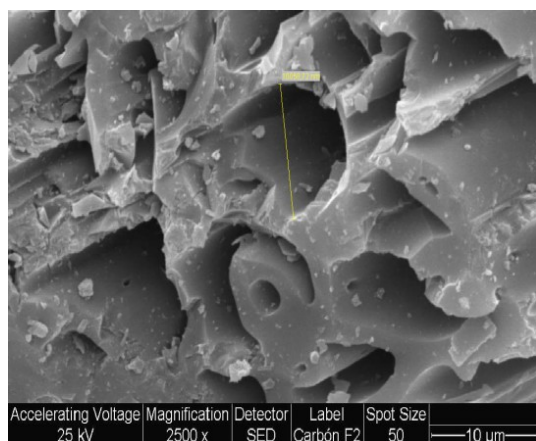


Figura 11. Fotografía SEM magnificada 2500x

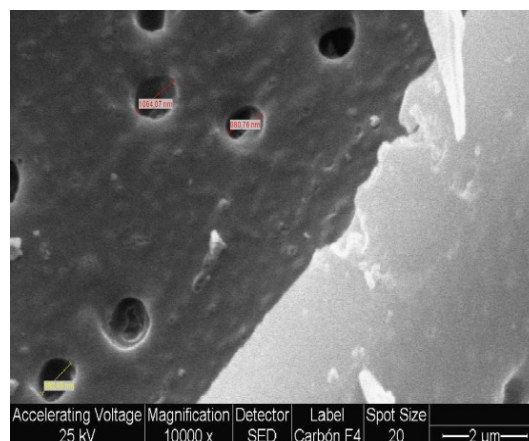


Figura 12. Fotografía SEM magnificada 10000x

### 3.4.6. Adsorción de Cromo

Dado que el presente trabajo se realiza a los fines de aportar una solución, desde el punto de vista sustentable, a la utilización de una materia prima abundante en la zona bajo estudio, es que se decide realizar ensayos de adsorción sobre un metal pesado testigo y que es de gran complejidad en cualquier planta de tratamiento de efluentes industriales.

La presencia de metales pesados en solución acuosa representa un serio peligro para la salud humana ya que muchos de estos metales son tóxicos. Los metales pesados son emitidos al medio ambiente por fuentes naturales como las erupciones volcánicas y fuentes antropogénicas tales como las descargas de aguas residuales industriales. Entre los principales metales tóxicos destacan el Plomo, Cadmio, Cromo y Mercurio.

El elemento seleccionado es el cromo, que es un metal reductor activo y en el medio ambiente se encuentra principalmente en las formas trivalente, Cr (III) y hexavalente, Cr (VI) [13].

La adsorción se considera como un método eficiente para eliminar metales pesados presentes en aguas residuales [13-14]. Diversos materiales adsorbentes se han probado para eliminar Cromo en solución acuosa, entre estos materiales destacan carbón activado, alúmina activada, zeolitas naturales y varios biosorbentes [15-16-17]. Para nuestro caso en particular, uno de los objetivos planteados es determinar la capacidad de adsorción de Cr (III) en solución acuosa sobre el Carbón activado obtenido a partir de la variedad de caña bambusoidae, cuyos datos de adsorción según el método BET arrojaron un área superficial de 980.503 m<sup>2</sup>/gr. con un volumen de poros de 0.4518 cm<sup>3</sup>/gr.

Para determinar la capacidad de adsorción de cromo se siguió la experiencia seguida por Hameed y Din (2006). Los ensayos se realizaron sobre muestras preparadas a partir de Cr<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (Nitrato de Cromo). Luego sobre las soluciones separadas de los sólidos, por filtración, se midió por espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama, la concentración de Cr (III) en dichas muestras líquidas. En la Figura N° 13 se observa la curva de adsorción respectiva.

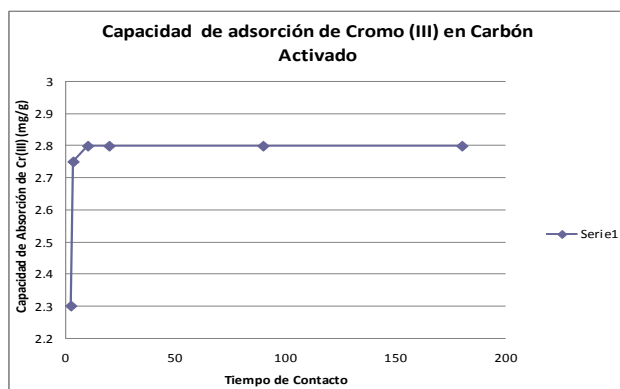


Figura 13. Capacidad de adsorción e Cromo (III) en carbón activado

#### 4. EVALUACIÓN ECONÓMICA FINANCIERA DE SU PRODUCCIÓN

Una vez determinada la posibilidad de obtener carbón activado de características similares a los utilizados en el mercado argentino, se realiza un análisis económico financiero para la producción a escala industrial del producto.

El proyecto considera establecer una planta de producción de carbón activado de 1.000 toneladas al año, equivalente al 20 % del consumo de este producto en el mercado argentino. Es de destacar, que su fabricación es un claro ejemplo de sustitución de importaciones, dado que en Argentina existe una sola planta de producción, que utiliza cáscara de maní como precursor y abastece aproximadamente el 30% del mercado.

El análisis de factibilidad económico-financiero fue desarrollado siguiendo el objetivo para el cual el proyecto fue pensado en su origen, otorgando en el mediano plazo la posibilidad de agregar valor social, permitiendo crear nuevas fuentes de trabajo a la zona ribereña del partido de Berisso, así como también generar nuevas oportunidades a nivel industrial, logrando un posicionamiento en el mercado nacional e internacional del carbón activado producido.

Según lo establecido en el estudio de mercado el precio de venta esperado para el mercado nacional es de 12.500 pesos por tonelada o de 2.500 dólares por igual cantidad, si tomamos una cotización de 5 pesos por dólar estadounidense.

La inversión inicial preliminar, que incluye maquinaria, instalaciones, nave industrial, y terreno requerida para una planta tipo sería de alrededor de 1.303.380 dólares que podrá ser recuperada en aproximadamente 4 años.

Se estima que los costos de producción serán de 1.752 dólares por tonelada de carbón activado que incluirán la materia prima, mano de obra directa e indirecta, servicios e insumos.

Si las ventas totales por año son de 1000 toneladas el margen bruto de contribución para el proyecto será de aproximadamente 748 dólares por tonelada de carbón activado.

La evaluación económica utilizando una tasa de descuento del 15 % arroja un valor presente neto de 845.635 dólares y una tasa interna de retorno del 28 %.

El análisis de sensibilidad determino que el proyecto baja su rentabilidad con un aumento considerable del precio de la materia prima y una baja moderada del precio final del producto, pero en ninguno de los casos deja de ser rentable.

De todo lo anterior se deduce que la producción de carbón activado a partir de caña es económicamente viable.

##### 4.1. Producción

Se ha determinado como meta inicial la producción de 800 toneladas anuales, con un crecimiento de la producción de 4,5 % acorde al crecimiento del mercado, llegando a producir 1.000 toneladas anuales en el sexto año.

##### 4.2. Inversión

La inversión necesaria para llevar adelante el proyecto asciende a 1.303.380 dólares desglosados de la siguiente manera:

Equipamiento de la planta, correspondiente a los equipos necesarios para el proceso productivo, 574.000 dólares.

Se planea ubicar la Planta en la ciudad de Berisso y la superficie a ocupar se estima en 5000 m<sup>2</sup>.

La inversión necesaria para la compra del terreno y las obras de infraestructura (construcción de la nave industrial y área de servicios) asciende a 540.000 dólares.

Se estima que el proyecto necesita un capital de trabajo de 189.380 dólares necesarios para cubrir las diferencias entre egresos e ingresos de los primeros meses de funcionamiento de la planta.

### 4.3. Ingresos

Los ingresos serán los generados por la venta del producto final. El estudio de mercado determinó que el precio de los carbones activos más básicos ronda entre los 2500 a 3200 dólares por tonelada. El precio del producto será fijado en 2500 dólares por tonelada.

### 4.4. Costos

La planta producirá en tres turnos de 8 hs cada uno. La cantidad de personal necesario para cada uno de los turnos será de 7. Formará parte de cada turno un Jefe de turno, un personal de mantenimiento y el resto operarios.

El área de administración y comercialización requerirá 9 personas, 3 en el área gerencial, 4 como administrativos y 2 en ventas.

Los sueldos del personal fueron calculados teniendo en cuenta el sueldo básico, premio, aguinaldo y las cargas sociales; asignación familiar, jubilación, obra social y seguros. Se determinó que para el sector de producción el costo de personal por tonelada de carbón activo producido será de 123 dólares.

Se estima que el costo fijo de la planta ascenderá a 202.800 dólares.

El rendimiento del proceso determinado en laboratorio es del 15 % .Para una planta cuya capacidad será de 1.000 toneladas se necesitarán aproximadamente 6.666 toneladas. De acuerdo un relevamiento realizado a los productores cañeros de la zona y en función al rendimiento antes mencionado se estimó un costo de materia prima de 1.320 dólares por tonelada de carbón activado producido.

Se calculó el consumo de energía eléctrica de acuerdo a la potencia instalada por el precio del KWh teniendo en cuenta la cantidad de días que opera la planta. De igual manera se determinó el consumo de gas de la caldera y el horno rotatorio en ambas etapas del proceso, calcinación y activación. Por último se sumó el consumo de nitrógeno necesario para llevar adelante el proceso productivo. Se determinó un costo en fluidos de proceso de 118,72 dólares por tonelada de carbón activado producido.

El carbón activado será envasado en bolsas de cartón de 25 kilos, estas serán llenadas y cosidas. Para su expedición se utilizara pallet y film para palletizar. El costo de todos estos insumos se estimó en 21,2 dólares por tonelada de carbón activado producido.

### 4.5. Depreciación de Activos Fijos

Se consideró una depreciación lineal en los 10 años de evaluación del 70 % del valor invertido en maquinaria.

### 4.6. Valor residual

El valor residual del proyecto se consideró en un 60 % de la inversión inicial realizada en capital fijo.

### 4.7. Flujo de caja

La evaluación se realiza considerando un horizonte de 10 años y una tasa de descuento de 15 %.

Tabla 5

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingreso Operativo		2,000,000	2,090,000	2,184,050	2,282,332	2,385,037	2,500,000	2,500,000	2,500,000	2,500,000	2,500,000
Costo Variable		1,266,349	1,323,334	1,382,885	1,445,114	1,510,144	1,582,936	1,582,936	1,582,936	1,582,936	1,582,936
Costo Fijo		202,800	202,800	202,800	202,800	202,800	202,800	202,800	202,800	202,800	202,800
Impuesto Ingresos Brutos		70,000	73,150	76,442	79,882	83,476	87,500	87,500	87,500	87,500	87,500
Depreciaciones		77,980	77,980	77,980	77,980	77,980	77,980	77,980	77,980	77,980	77,980
Utilidad Bruta		382,871	412,736	443,944	476,556	510,636	548,784	548,784	548,784	548,784	548,784
Impuesto a la ganancia		134,005	144,457	155,380	166,795	178,723	192,074	192,074	192,074	192,074	192,074
Utilidad Neta		248,866	268,278	288,563	309,762	331,914	356,710	356,710	356,710	356,710	356,710
Depreciaciones		77,980	77,980	77,980	77,980	77,980	77,980	77,980	77,980	77,980	77,980
Inversión	-1,114,000										
Capital de Trabajo	-189,380										189,380
Valor residual											668,400
Flujo de Caja	-1,303,380	326,846	346,258	366,543	387,742	409,894	434,690	434,690	434,690	434,690	1,292,470

Se observa un valor presente neto de 845.635 dólares, una tasa de interna de retorno de 28 % y un periodo de recuperación del capital de poco más de 4 años.

### 8-Análisis de sensibilidad

Se sensibilizaron tres variables que podrían afectar al proyecto: precio del producto, precio de la materia prima y variación del tipo de cambio, considerando escenarios optimistas y pesimistas, con el fin de determinar cómo se comporta el proyecto.

## 5. CONCLUSIONES

El sistema experimental diseñado para llevar a cabo las reacciones de carbonización y activación es de una aceptable reproductividad de resultados.

La eficiencia de carbonización del bambú tratado está en correspondencia con las mencionadas en la bibliografía.

La eficiencia de adsorción, es cualitativamente buena, y se encuentra en correspondencia con carbones activados utilizados en el mercado.

Del relevamiento en campo se determinó la existencia de una área sembrada de 300 hectáreas, las cuales teniendo en cuenta el rendimiento de las misma, el periodo de corte y el rendimiento del proceso generarían un potencial de producción de aproximadamente 1725 toneladas anuales de carbón activado.

De la evaluación económica financiera se desprende una tasa interna de retorno con una perspectiva rentable para su producción.

## 6. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Bahrton, A. (1998). Preparation of activated carbons from a fast growing tree species, Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia.
- [2]. Arriagada R. y col. Retención de Hg (II) y Cr (VI) en carbones activados de origen lignocelulósico. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Concepción, Chile. 2000.
- [3]. Villegas Aguilar P. J., Cavalleri Analía, Camerucci Andrea, Quintana Puchol Rafael, Wasserman Bernardo, Rodríguez Débora. "Estudio de la Transformaciones Morfológicas durante la Termo conversión de Biomásas Tropicales". Centro de Estudio de Termo energética Azucarera (CETA), Universidad Central de Las Villas, Cuba 2006
- [4]. Lua, A.C., Yang, T., 2003. Characteristics of activated carbons prepared from pistachio-nut shells by physical activation. *J. Colloid Interface Sci.* 267, 408–417
- [5]. Razvigorova, Budinova T., Petrov N., Minkova V. (1998). Purification of water by activated carbons from apricot stones, lignites and anthracite. *Wat. Res.* 32, 7, 2135 - 2139.
- [6]. Zhang, T., Walawender, W.P., Fan, L.T., Fan, M., Dugaard, D., Brown, R.C., 2004. Preparation of activated carbon from forest and agricultural residues through CO<sub>2</sub> activation. *Chem. Eng. J.* 105, 53–59. *Carbon.* 32:759-769.
- [7]. Blanco Castro, J. et al., "Activación química del bagazo de caña de azúcar para la obtención de carbones activados", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, (3-2): 41-44, 2000.
- [8]. CYTED. Agencia Iberoamericana de Cooperación para el Desarrollo. Descontaminación ambiental mediante adsorbentes. Libro contenedor de una compilación de trabajos de la Red Temática V.F.:Red Iberoamericana de Adsorbentes para la Protección Ambiental. Editado por Francisco Rodríguez Reinoso (ISBN: 84-96023-37-0). Noviembre 2005.
- [9]. Sheng-Fong Lo, Song-Yung Wang, Ming-Jer Tsai, Lang-Dong Lin. Adsorption capacity and removal efficiency of heavy metal ions by Moso and Ma bamboo activated carbons. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011
- [10]. Blanco Castro J., Bonelli P.R., Cerrella G.E., Cukierman A.L (2000). Phosphoric acid activation of agricultural residues and bagasse from sugar cane: influence of the experimental conditions on adsorption characteristics of activated carbons. *Ind. Eng. Chem. Res.* .
- [11]. Rodríguez Reynoso, F. Carbón activado: estructura, preparación y aplicaciones, *Revista Uniandes* p. 66–69 (2005).
- [12]. Basso, M., E. Cerrella y A. L. Cukierman (2001). Tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados mediante carbones activados obtenidos de un precursor renovable. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, 5: 09.01-09.06.
- [13]. Selvi, K., S. Pattabhi y K. Kadirvelu; Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution by Adsorption onto Activated Carbon, *Biores. Technol.*: 80, 87-89 (2001).
- [14]. Aggarwal, D., M. Goyal y R.C. Bansal; Adsorption of Chromium by Activated Carbon from Aqueous Solution, *Carbon*: 37, 1989-1997 (1999).
- [15]. Faghihian, H. y R.S. Bowman; Adsorption of Chromate by Clinoptilolite Exchanged with various Metal Cations, *Water Res.*: 39, 1099-1104 (2005).
- [16]. Khezami, L. y R. Capart; Removal of Chromium(VI) from Aqueous Solution by Activated Carbons: Kinetic and Equilibrium Studies, *J. Hazard. Mat.*: B123, 223-231 (2005).
- [17]. Mor, S., K. Ravindra y N.R. Bishnoi; Adsorption of Chromium from Aqueous Solution by Activated Alumina and Activated Charcoal, *Biores. Technol.*: 98, 954-957 (2007).
- [18]. Vander Wall, R.L.; Tonasek, A.J.; Steet, K.W.; Thompson, W.K., (2004). Carbon monostructure examined by lattice fringe. *Analysis of resolution transmission electron microscopy images. Appl. Specter.* 58(2): 230-237
- [19]. Nassir Sapag Chain; Evaluación de proyectos de inversión en la empresa, Pearson–Prentice Hall (2001).
- [20]. Manual del Carbón Activo. Universidad Politécnica y Universidad de Sevilla. <http://www.aguapedia.net>. Fecha de consulta: Julio del 2010.