VI. Estudio de potenciales aplicaciones de los carbones activados obtenidos.

VI.1. Análisis de los CA por Difracción de Rayos X relacionada a potenciales aplicaciones en baterías ion-litio.

La Argentina, Chile y Bolivia tienen el 70 % de las reservas mundiales de minerales de litio y semejante riqueza natural propicia el desarrollo de intereses diversos. El triángulo, está conformado por el Salar del Hombre Muerto (Argentina), el Salar de Uyuni (Bolivia) y el Salar de Atacama (Chile), sumados a los salares que se ubican dentro del área comprendida, todos ubicados en altura, en la región de la Puna de Atacama. La Argentina se ubica en tercer lugar en lo referido a la explotación de litio a nivel mundial (16 %). Actualmente hay varias empresas trabajando en la zona de las cuales solo dos son sudamericanas (Sociedad Química y Minera de Chile), la mayoría son empresas mineras extranjeras que envían este recurso a Alemania, China, Estados Unidos, Países Bajos, Reino Unido y Rusia, entre otros, o a empresas como LG Group, Toyota, Mitsubishi y baterías Magna, entre muchas otras (Barraza, 2018).

El Litio es el metal más liviano, con un potencial estándar de reducción de -3.040 V; tiene el mayor potencial electroquímico produciendo una capacidad energética teórica de 3.860 Ah/Kg (Ampere hora por Kg). Por el valor tan negativo de su potencial de reducción, le proporciona una inestabilidad termodinámica en disolventes protónicos, como el agua, o, en ambientes con aire húmedo, que reacciona muy fácilmente, limitando el uso o construcción de baterías de litio en electrolitos no acuosos.

El desarrollo de baterías de ion litio (BILs) a cargo de la empresa japonesa Sony (inicios de los años 90) provocó el comienzo de una revolución comercial para los sistemas de almacenamiento de energía, generando la

expansión en el mercado de dispositivos electrónicos, tales como teléfonos móviles, computadoras portátiles, MP3 y otros. (Nacif, 2014).

Su demanda en los últimos años está en aumento en diferentes aplicaciones y por ende también su introducción paulatina al mercado de la industria de automóviles híbridos, eléctricos, y eléctricos enchufables. Otro campo de aplicación está relacionado con los sistemas de energías renovables (eólicos y solares) favoreciendo el mejoramiento de la eficiencia de su almacenamiento, el cual se está consolidando de modo gradual en un mercado potencialmente atractivo (Manthiram, 2011).

Actualmente estos costos han bajado, los materiales para su construcción de baterías de ion litio siguen resultando del orden del 40 a 50 % del costo total de baterías de potencia (Cabrera *et al.*, 2012, Nelson, *et al.*, 2009).

El uso masivo del grafito, natural o sintético, en el ánodo de las BILs se debe a razones económicas, puesto que es un material de bajo costo así como abundante y/o de fácil preparación, y sin dificultades operacionales. La estructura laminar de este material de carbono permite la intercalación/des-intercalación de los iones Li^+ de forma reversible a bajo voltaje (< 0,2 V vs Li/Li^+), incrementado la diferencia de potencial entre los electrodos y, por tanto, la energía suministrada. La capacidad teórica del grafito es 372 $mAhg^{-1}$ (miliamperios hora por gramos), que equivale a 1 Li^+ por cada 6 C, si bien, en la práctica se alcanzan 300-310 $mAhg^{-1}$ (Lavela & Tirado, 1999).

En las BILs los materiales de carbono son los compuestos de inserción anódica más utilizados, mientras que los cátodos son óxidos de litio y un metal de transición. El carbono un material capaz de intercalar y desintercalar los iones litio de una manera reversible (Kötz & Carlen, 2000).

Para contrarrestar los problemas de volumen en los procesos de carga y descarga, se han empleado principalmente dos estrategias: la reducción del tamaño de las partículas, como es la utilización de nanopartículas metálicas, y la adición de una fase que amortigüe dicho cambio, como puede ser un carbón, formando mezclas (composites) de este material con el metal.

Los materiales más atractivos para ser utilizados como ánodos en baterías de Li-ión han sido los basados en carbón. Su utilización resulta interesante debido a su bajo coste y bajo potencial de inserción de Litio (0.1 V vs Li^+/Li para el grafito), su alta seguridad y su buena estabilidad de ciclado producto de su integridad mecánica (Zhao *et al.*, 2013; Aurbach *et al.*, 2009)

Los carbones activados presentan una amplia aplicación en el campo de la industria de licores, el azúcar y la electrónica como electrodos para supercondensadores (Jayalakshmi & Balasubramanian, 2008; Gamby, *et al.*, 2001) donde no solo es relevante la cristalinidad sino también el área superficial y la conductividad de los mismos. Estas características proporcionan que los electrodos puedan acumular carga y que su estructura porosa facilite el mojado por el electrolito y la rápida transferencia de carga. Además, si este material reúne las condiciones necesarias puede ser empleado en el desarrollo de nuevas baterías de protones con un electrodo de carbono, siendo más segura y ecológica que las baterías de litio actuales (en desarrollo por un grupo de investigadores de la Universidad de RNIT, Melbourne, Australia).

En la presente investigación se seleccionaron algunas muestras representativas de los CA logrados a partir de HA y MO para aplicar la técnica de Difracción de Rayos X, considerando lograr una huella dactilar de cada una de ellas y comparar su similitud en cuanto a cristalinidad con el grafito. El objetivo de esta parte de la investigación se centró en encontrar una posible aplicación de los CA como material activo para electrodos, en particular baterías de ion litio (BILs).

Como se observa en la figura VI.1. los patrones de difracción de rayo x son compatibles con una estructura predominantemente amorfa logrados en CA de HA y MO. Sin embargo, es posible observar algunas reflexiones en las posiciones 2θ de 26° que corresponde a la reflexión (002) y 44° que corresponde a la reflexión (011) sugiriendo cierta cristalinidad como resultado de la alineación de las capas (similar al grafeno). En general los CA de HA (tratamientos 5, 6, 14, 4, 2, 13, 7) mostraron una mejor cristalinidad sobre los obtenidos a partir de MO según los difractogramas de la figura VI.1 (16, 17, 19, 20, 22, 25).

Respecto de los CA logrados con uno de los gases activantes, el dióxido de carbono, mostraron mejores señales en las zonas cercanas a los 26°

cuando las condiciones de activación fueron, temperatura de activación de 900 °C y tiempo de reacción de 1 h y ½ h (tratamientos 4 y 5) y cuando la temperatura activación fue de 700 °C y 1 h (tratamiento 2) se evidenció un comportamiento similar.

Si comparamos los difractogramas de los tratamientos 13 y 14, se observa que para las muestras de HA activados con vapor de agua a la misma temperatura 850 °C y diferentes tiempos de activación (1 y 2 hs respectivamente), los picos aparecen en las mismas posiciones con una menor intensidad los de las muestras con mayor tiempo de reacción (figura VI.2.).

En el difractograma de la muestra 7 empleando como activante aire a 200 °C y 1 hora de activación los picos presentan leve corrimiento hacia la izquierda (figura VI.1).

Respecto de los tratamientos empleando MO activados con dióxido de carbono a diferentes tiempos de activación y a 750 °C se observa que la intensidad de los picos es mayor cuando el tiempo de reacción es menor. (16 y 17), (Figura VI.1).

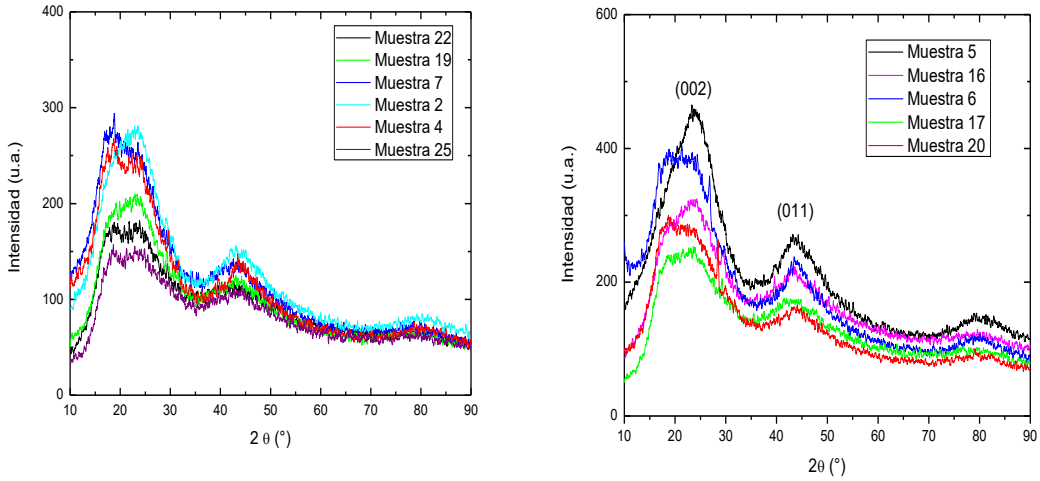

Figura VI.1. Difractogramas de Rayos X de las muestras de CA de MO y HA donde se observan los picos en las posiciones 2θ de 26° y 44°.

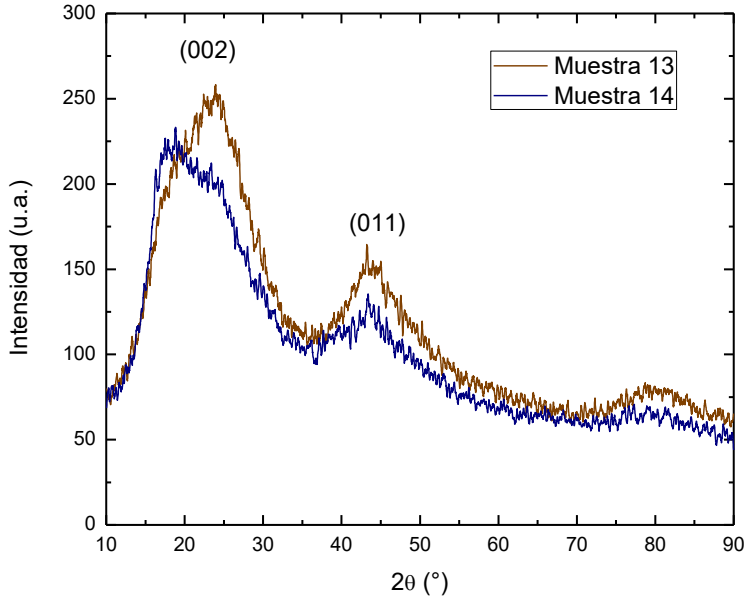

Figura VI.2. Difractogramas de los CA obtenidos en los tratamientos 13 y 14 con HA.

Analizando solo los tratamientos de HA activados con dióxido de carbono, con la misma temperatura (900 °C) y diferentes tiempos de activación (½, 1 y 2 horas); tratamientos 4, 5 y 6 respectivamente; y a 700 °C durante 1 h, tratamiento 2, se concluye que el mejor de los tratamientos es el 5 (figura VI.3.).

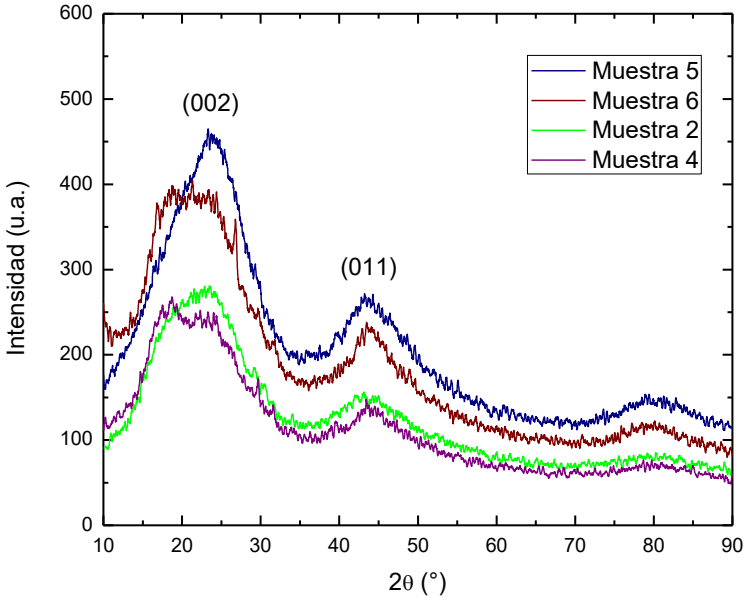

Figura VI.3. Difractogramas de las muestras obtenidas con los tratamientos 2, 4, 5 y 6.

En general los difractogramas indican una forma de carbón amorfo típico que es comparable con los difractogramas del grafito. Estos muestran dos bandas asimétricas correspondientes a 26 y 45 °C las cuales pueden ser asignadas al grafito desordenado en el plano 002 y en el plano 011 respectivamente, resultados similares se obtuvieron en otros estudios empleando diferentes biomasas residuales tales como hueso y cascara de vegetales (Ensucho *et al.*, 2015; Contreras *et al.*, 2008). También en algunas publicaciones se observan la aparición de picos anchos alrededor de 26º y 43º que muestran signos de formación de una estructura cristalina carbonosa lo que se traduce en una mejor alineación de capas (Yang & Lua, 2006). Algunos resultados de difractogramas fueron informados por Peña *et al*. (2012); Tongpoothorn *et al.* (2011), Pechyen *et al.* (2007) para CA de diferentes biomasas y comparándolos con los logrados para los CA a partir de HA y MO presentaron un comportamiento semejante.

Por lo expuesto anteriormente se podría emplear los CA logrados como materia prima para la construcción de electrodos de baterías tipo BILs realizando previamente los ensayos a escala laboratorio pertinentes con la posibilidad de encontrar resultados similares en baterías Litio-Azufre empleando materiales adsorbentes de precursores como HA (Moreno Villegas, 2016).

VI.2. Análisis de las características de los carbones activados con factibilidad de su empleo en tratamientos de purificación y potabilización de agua.

Los usos de los recursos hídricos se encuentran diversificados y se pueden enumerar los más relevantes: para abastecimiento público, uso industrial, riego, navegación, recreación, entre otros. Los mismos generan impactos y deterioro sobre la calidad de las reservas de aguas dulces superficiales, principal fuente de suministro de agua potable. Una de las consecuencias de los impactos antrópicos en los ecosistemas acuáticos es la aceleración de los procesos de eutrofización, causados por el enriquecimiento

artificial en nutrientes, principalmente compuestos nitrogenados y fosfatados provenientes de las aguas residuales domésticas e industriales y escorrentías de actividades agrícolas y ganaderas. Condiciones análogas se dan a nivel mundial, en la Argentina y en la provincia de Catamarca en particular.

El grado de eutrofización de los dos espejos de aguas del Valle Central de la Provincia de Catamarca, dique El Jumeal y dique Las Pirquitas han sido y son objeto de estudio de modo sistemático (Navarro *et al.*, 2008).

La eutrofización genera los blooms o floraciones, crecimiento explosivo de cianofitas, que ocurre cuando la luz, temperatura y nutrientes favorecen el desarrollo de especies algales, resultando densidades celulares de más de 5000 células por mililitro. Las floraciones de cianobacterias representan un problema ecológico, sanitario y económico que se ha incrementado en los últimos años a nivel mundial; producen aumento del costo de tratamiento de agua potable, riesgos para la salud pública por exposición directa o prolongada a productos del metabolismo de estas algas: las cianotoxinas (Echenique & González, 1998).

El otro aspecto de interés sanitario, radica en la capacidad de las Cianophytas de generar toxinas, produciendo la muerte del ganado y severas intoxicaciones en el hombre. Las cuales al ser neuroparalizantes, causando parálisis respiratorias y de otros órganos. Otros tipos de toxinas bloquean la función hepática, hipertrofiando este órgano (Margalef, 1983).

El agua es un bien natural de carácter fundamental, por lo tanto, todas las actividades humanas que emplean este recurso deberían ser planificadas de modo de garantizar su disponibilidad y calidad, con mayor énfasis en los territorios áridos como la provincia de Catamarca (Navarro *et al.*, 2008; Silverio Reyes, 2001)

El 80 % de las aguas residuales mundiales no reciben un tratamiento adecuado para evitar la contaminación y la propagación de enfermedades, una situación que perjudica sobre todo a los países menos desarrollados y que refleja el informe *Gestión de Aguas Residuales*, elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). En el informe se señala que el daño ocasionado por las aguas residuales a los ecosistemas y la biodiversidad

es grave y advierte que supone una amenaza para la salud humana y la actividad económica.

Los CA, en particular los obtenidos en el presente estudio, poseen propiedades que dependen de la naturaleza de los precursores, las condiciones utilizadas en el proceso de obtención, el tipo de activante elegido, y del tratamiento final del producto. Resulta importante destacar entre sus aplicaciones de este producto aquellas tendientes a potabilizar, purificar, mejorar la calidad del agua y tratar los efluentes como son las siguientes: a) Eliminación de impurezas que causan color, olor y sabor en el agua potable, b) Tratamiento de aguas residuales e industriales, c) Depuración de aguas subterráneas y de piscinas, d) Refinamiento de las aguas residuales tratadas, e) Potabilización de agua superficial y de pozo, f) Eliminación de cloro libre en agua potable (Rodríguez, 2003).

En Estados Unidos se aplica la adsorción en el tratamiento de aguas potables y residuales, especialmente, con el objeto de controlar su color, sabor y olor. También se considera este proceso para la eliminación de compuestos químicos orgánicos, clorados, así como de los co-productos resultantes de la desinfección. Por otro lado, ciertos compuestos inorgánicos perjudiciales para la salud, como algunos metales pesados, también se pueden separar por métodos de adsorción (Calle Chumo & Rodas Soto, 2013).

En Europa existe una gran experiencia con carbón activo granular para el tratamiento de aguas procedentes de ríos contaminados. Se espera que en el futuro las aplicaciones de la adsorción para el control de la contaminación de las aguas potables debida a compuestos tóxicos o cancerígenos en pequeñas concentraciones aumenten progresivamente (Sirilumduan & Kaewsarn, 2010).

Por la importancia del tema de potabilización del agua y la posibilidad de generar un insumo (CA) que puede producirse en la provincia de Catamarca a partir de residuos agrícolas y agroindustriales para su tratamiento es que se realiza un estudio de sus propiedades para determinar la viabilidad de su aplicación.

Los filtros de CA son utilizados cuando se desean remover malos olores, sabores o color desagradable del agua, compuestos orgánicos volátiles,

plaguicidas e incluso radón. El CA tiene una gran área superficial y por lo tanto alta capacidad de adsorción de compuestos, que quedan adheridos a la superficie del mismo. Estos filtros son económicos, fáciles de mantener y operar, por lo que su uso es muy común.

Estudios recientes sobre este tema concluyen que el CA activado (en polvo, CAP) constituye un medio eficiente para adsorción a microcistina y geosmina (metabolitos algales tóxicos) con óptima eficiencia de remoción y de fácil aplicación en plantas de tratamiento de agua (Otaño *et al.*, 2017).

El CA granular (GAC) se suele utilizar en una columna como medio de contacto entre el agua a tratar, en la que el agua entra por la parte inferior y asciende hacia la superior. Se utiliza para eliminar elementos traza, especialmente orgánicos, que pueden estar presentes en el agua, y que habitualmente han resistido un tratamiento biológico. Son elementos, que a pesar de su pequeña concentración, en muchas ocasiones proporcionan mal olor, color o sabor indeseable al agua. Se aplica para adsorción de sustancias no polares como:

- Aceite mineral
- BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno)
- Poli-hidrocarburos aromáticos (PACs)
- (Cloruro) Fenol
- Adsorción de sustancias halogenadas: I, Br, Cl, H y F
- Olor
- Gusto
- Levaduras
- Varios productos de fermentación
- Sustancias no polares (sustancias las cuáles no son solubles en agua)

El carbón activo en polvo (CAP) se emplea en procesos biológicos, cuando el agua contiene elementos orgánicos que pueden resultar tóxicos. También se suele añadir al agua a tratar, y pasado un tiempo de contacto, normalmente con agitación, se deja sedimentar las partículas para su separación previa. Son operaciones llevadas a cabo en modo discontinuo.

En general para evaluar la calidad de los CA empleados en la potabilización de aguas se tienen en cuenta ciertas propiedades y características las cuales se encuentran plasmadas en la siguiente tabla:

Tabla VI.1. Principales parámetros cono lo que se especifica un CA granular para el tratamiento de aguas y normas de análisis.

Parámetro	Unidades	Rangos típicos	Norma que aplica
N° de Yodo	mg/g de CA	500-1200	ASTM D-4607
Área Superficial	m^2/g	500-1200	Adsorción de N_2 (método BET) ATSM D-3037
Radio medio de poro y volumen total de poro	nm y cm^3	0,7-500 0,2 a 1	Porosimetría con mercurio y adsorción de N_2, ASTM C-699
Densidad aparente	g/cm^3	0,26 a 0,65	ASTM D-2854
Tamaño de partícula	mm	0,4-3,3	ANSI/AWWA B604-90
Contenido de cenizas	% en base seca	3-15	ASTM D-2866
pH del extracto acuoso	pH	2 a 11	ASTM D-3838
Humedad	%	2-15	ASTM D-2867

Nota: tabla extraída de Fombuena y Valentín, 2010

Analizando los valores obtenidos para los índices de yodo en los carbones activados de HA, de los 14 tratamientos, 11 se encuentran dentro de los valores aceptables según la tabla VI.1 (2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13 y 14) siendo los mejores tratamientos el 4, el 6 (activación con dióxido de carbono), el 12 y el 14 (activación con vapor de agua) con valores superiores a 1000 mg/g de CA (Figura V.12. y V.13.)

Los índices de yodo para los CA obtenidos a partir de MO mostraron que 9 de los 12 tratamientos se encuentran dentro de la norma (15, 16, 18, 19, 20, 23, 24, 25 y 26) y los que mostraron mejores valores fueron las muestras 15 y 25 (activadas con dióxido de carbono y vapor de agua respectivamente) ;(Figura V.14. y V.15.).

En lo referido a las áreas superficiales los CA de HA que presentaron valores dentro de las exigencias de la norma son 9 de los 14 tratamientos (4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13 y 14) y los más destacados por ser superiores o iguales a

900 m^2/g son las muestras 4 y 14 (tabla V.9.). Para los CA de MO respecto de este mismo parámetro 6 de los 12 tratamientos cumplimentan con la norma de Adsorción de N_2 (método BET) ATSM D-3037 (15, 16, 20, 24, 25 y 26) y tres de estos presentan valores superiores a 700 m^2/g (tabla V.10.).

En general los CA mostraron volúmenes de poro promedio para los tratamientos de HA que evidencian una marcada microporosidad y en menor proporción mesoporosidad y en los tratamientos de MO también, y solo en los que se empleó como activante el aire se detectó la presencia de macroporosidad.

Las densidades aparentes para los CA de HA se encuentran todos dentro de la norma (0,25 a 0,65 g/cm^3), no sucede lo mismo con este parámetro en los CA de MO, lo cual resulta coherente ya que esta norma es aplicable a CA granulares y estos se encuentran en forma de polvo (tabla V.7.).

El tamaño de partícula para los CA de HA se ubica en el intervalo 2,36 a 3,32 mm y los CA de MO 1,17 a 2,62 mm, estos productos logrados se encuentran dentro de la norma (Figura V.5.).

El pH de los CA de HA posee valores 7,5 y 10 y para los CA de MO entre 7,2 y 10,1 es decir todos cumplimentan con la norma ASTM D-3838 (tabla V.7.)

El intervalo de humedad aceptable para el envasado del CA para potabilización de agua exige valores entre 2 y 15 %, en los CA obtenidos se encuentran valores entre 2 a 10 %, y en algunos casos menores al 2 %(tabla V.7.).

Comparando los parámetros con los CA comerciales (tabla VI.2.), los CA logrados en el presente estudio logran cumplimentar con los valores de humedad exigidos excepto en algunos casos cuando se necesita tener valores iguales o menores al 2 % (caso de los CA Calgón y Cabot).

Respecto del índice de yodo 20 muestras de CA cumplirían con valores superiores a 500 mg/g (Clarimex 0,46), 4 muestras con valores superiores a 1000 mg/g (Clarimex CG1000) y 8 muestras con valores superiores a 850 mg/g.

Tabla VI.2. Características de CA de uso comercial para tratamientos de potabilización de agua.

Marca de CA/parametros	Clarimex 0,46 (en polvo) Certifica ANSI/NSF Standart	Clarimex -CG 1000 Certifica Standart AWWA B604 (cáscara de coco)	Calgón Filtrasob	Cabot Norit GAC 40S
Humedad (%)	8 máx.	5 máx.	2 máx.	2 máx.
N° de Yodo (mg/g CA)	500 min.	1000 min.	850 min.	850 min.
Densidad aparente (g/cm^3)	0,25 min.	2 min.	0,550 min.	0,54 min.
pH	-	8-10	8-10	-
Tamaño de partículas (mm)	-	-	0,8-1	5 máx.

Nota: tabla elaborada con datos extraídos de las páginas web referidas a los productos comerciales Clarimex, Calgón y Cabot Norit

Las densidades aparentes en todos los CA de HA poseen valores cercanos a 3 g/cm^3 similares a los CA comerciales marca Clarimex, y solo 3 CA de MO cumplimentan con el mínimo del 2 g/cm^3.

Los valores de pH en los extractos acuosos de los CA logrados se encuadran con los valores de CA comerciales considerados, solo tres de ellos dan valores menores a 8.

Los tamaños de partículas de los CA obtenidos poseen tamaños menores a 5 mm con lo cual tendrían valores similares al CA comercial NORIT GAC 40S.

Se infiere del análisis realizado que los tratamientos aplicados pueden generar CA de buena calidad para ser empleados en métodos de purificación y potabilización de aguas y que poseen características similares a los CA existentes en el mercado.

VI.3. Análisis de las características de los carbones activados con factibilidad de su empleo en minería

El empleo del CA en la metalurgia extractiva se ha acrecentado en las últimas décadas, empleándose en los procesos de flotación de minerales, tratamiento de aguas industriales, purificación de electrólitos, recuperación de metales disueltos en soluciones acuosas, como modificador del potencial redox,

como catalizador, entre otras aplicaciones. Este se usa también para recuperar el oro contenido en soluciones originadas en diversos procesos de cianuración (Marsden & House, 2006).

En la actualidad se emplea el CA para la recuperación de oro desde soluciones alcalinas diluidas que contengan cantidades muy pequeñas de oro en solución, es decir, su aplicación ha permitido explotar yacimientos de baja ley, con el concurso de métodos de bajo costo de lixiviación, como es la lixiviación en pilas o para tratar pulpas provenientes de agitación sin utilizar lavado en contracorriente, como una forma de optimizar gastos en este tipo de plantas.

El CA que se emplea frecuentemente es CA granular (CAG), y con granulometría entre 3,36 mm y 0,85 mm y entre 2,38 mm y 0,85 mm, existiendo otras granulometrías en el mercado. Los carbones más usados son los fabricados a partir de la cáscara de coco, de maní y de carozos debido a su dureza y mayor poder adsorbente. El CA fabricado a partir de la concha o cáscara de coco es similar al obtenido a partir de carozo de duraznos.

Los requerimientos de mayor exigencia en cuanto a calidad del CA son el Índice de Yodo necesario para esta aplicación es de 950 (mg/g) y un 5 % de cenizas.

Se estima que el consumo anual de las mineras latinoamericanas que usan CA supera las 800 toneladas anuales, sin considerar mineras de las cuales no se pudo obtener ninguna información (por ejemplo, Grupo México, Grupo Immsa, pequeña minería en Perú, Chile, México y Brasil, entre otros); (León Martínez, 2012). En la tabla VI.3 se detalla el consumo de CA de algunas empresas latinoamericanas.

El fenómeno de adsorción ocurre cuando una molécula puede llegar a la superficie interna de la partícula del carbón por difusión dentro de los poros, como resultado, la estructura porosa puede tener una marcada influencia en la cinética de adsorción, para lo cual el carbón debe tener un área superficial entre 1000 y 1.500 m^2/g.

Tabla VI.3. Consumo en toneladas de CA por mineras latinoamericanas (León Martínez, 2012)

Minera	País	Consumo (t/año)
Queiroz	Brasil	25
Cerro Vanguardia	Argentina	80
Refugio	Chile	100
Coipa	Chile	120
Pierina	Perú	240
Yanacona	Perú	260

Generalmente la adsorción de cationes a partir de soluciones cargadas con metales, asociados con elementos orgánicos, depende de la capacidad adsortiva del CA y esta a su vez, está determinada por condiciones como: pH de la solución, tamaño del catión hidratado, su carga y las propiedades particulares del elemento catiónico.

El CA comercial es altamente selectivo para la adsorción de Au y Ag en vez de otros metales, con la excepción del Hg que es adsorbido antes que la Ag.

Las etapas de tratamiento con CA en la mayoría de las plantas de proceso de extracción de oro son:

1. Adsorción del complejo de cianuro y oro sobre el CA
2. Lavado con agua para sacar la solución de impregnación.
3. Desorción (elución), generalmente con soluciones 0.2 % Na CN y 1% Na OH a 90 °C.
4. Lavado con ácido para sacar precipitados de $CaCO_3$.
5. Lavado con agua.
6. Secado, calentamiento a 700 °C durante 30 min en ausencia de aire y templado.
7. Reciclaje a la etapa de adsorción.

Los procesos actualmente utilizados están en relación directa con las propiedades de filtración de la pulpa y la presencia de materia orgánica en el mineral.

- *Adsorción en columnas*: Cuando la pulpa es fácil de filtrar o cuando se utiliza la cianuración en pilas.
- *Carbón en pulpa (CIP)*: Cuando el mineral contiene mucha arcilla. La pulpa y los pelets de carbón son agitados en uno o varios estanques; cuando la adsorción se completó, el carbón más grueso, es separado de la pulpa por tamizaje.
- *Carbón en lixiviación (CIL):* Cuando el mineral contiene materia orgánica sobre la cual podría adsorberse el oro, con las consiguientes pérdidas que eso representa.

Resulta importante considerar que una tonelada de carbón adsorbe alrededor de 10 kg de oro. Aproximadamente 4 l de solución son suficientes para la elución de 1 kg de carbón. En la actualidad, existe escasa información sobre estudios que reflejen la importancia de las propiedades físicas de los CA y su implicancia en el mecanismo y cinética de adsorción de oro, dentro del interior de la partícula del carbón estudiado.

En principio, cabría pensar que a mayor superficie específica mejores serían las características, como adsorbente, del CA, puesto que también se debería tener un mayor número de sitios disponibles para adsorber el complejo $Au(CN)^{2-}$ (complejo diciano aurato). Sin embargo, esto no siempre se cumple ya que se debe tener en cuenta el posible efecto de tamiz molecular. Así, dependiendo del tamaño de los complejos que serán adsorbidos puede suceder que parte de la superficie específica no sea accesible a dichas moléculas o que, en su defecto, sea de difícil acceso (Ramírez Muñiz et al., 2010).

Sin embargo, han sido expuestas muy pocas consideraciones del rol de la estructura y propiedades físicas del CA. Un estudio reciente sobre estos temas arribó a las siguientes conclusiones que la presencia de cationes favorece el proceso de adsorción de oro en medio cianuro, especialmente, los de mayor valencia, lo cual puede ser atribuido al mecanismo de adsorción vía par iónico. Además, que una mayor cantidad de macroporos en un CA produce una mayor adsorción de oro a tiempos cortos de contacto carbón-disolución (Vargas *et al.*, 2006).

Respecto del diámetro de poros se consideró que el aumento el diámetro promedio de poros en un CA, aumenta la carga de oro por unidad de superficie específica. En el laboratorio se logró con una menor área superficial del CA una mayor carga de oro a tiempos cortos o lejos del equilibrio (Navarro & Vargas, 2010).

Existen varios factores que afectan la eficiencia de la absorción del oro en el CA los cuales son enumerados a continuación:

1) *Temperatura*: La absorción del oro es exotérmica por lo que la capacidad de carga disminuye cuando la temperatura aumenta.
2) *Concentración del cianuro*: Cuando la concentración del cianuro libre aumenta la velocidad de carga del oro en el carbón disminuyen.
3) *Concentración del oro en la solución*: La velocidad de absorción del oro y el equilibrio de carga aumentan, cuando aumenta el contenido de oro en la solución.
4) *pH*: A menor pH mayor velocidad de absorción y capacidad de carga.
5) *Fuerza iónica*: La velocidad de absorción y la capacidad de carga aumentan al aumentar la fuerza iónica.
6) *La capacidad de carga de oro* aumenta en la presencia de cationes de calcio, magnesio, hidrógeno, litio, sodio y potasio.
7) La absorción de otros metales en el CA hace que estos compitan con el oro por los sitios activos de absorción, por lo que es importante conocer la *concentración de cada una de las especies, las propiedades del carbón que se selecciona para el proceso y las condiciones de la solución*.

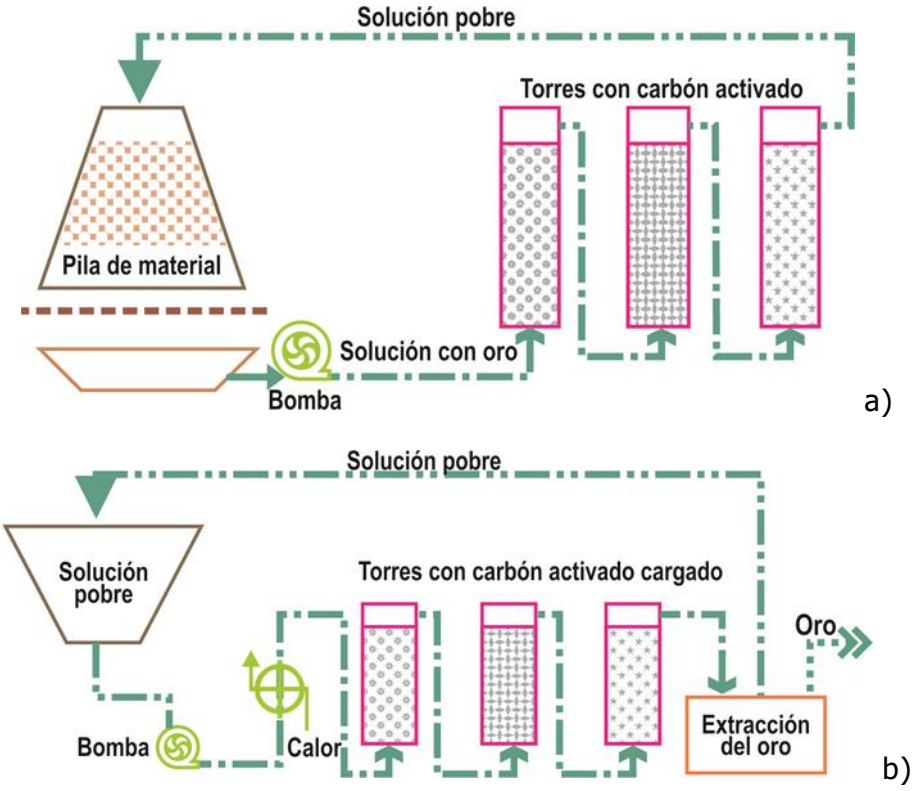

Figura VI.4. a) Diagrama de un sistema de Adsorción de oro con CA b) Diagrama de un sistema de desorción (Montenegro, 2010)

El primer diagrama (figura VI.4.a) representa el sistema de adsorción de oro, el cual consta de una bomba que impulsa la solución cianurada cargada de oro a través del sistema de torres con CA, que adsorben el oro disuelto y liberan la solución, esta solución empobrecida, se retorna nuevamente al material para seguir lixiviando.

Una vez que se han depositado el oro y los otros metales, el CA debe llevar a cabo el proceso de elución con el que se desprenderán los metales del carbón (Mancheno Posso & Muñoz Gandarillas, 2009). Al finalizar el proceso de elución se obtendrá una solución de oro a partir de la cual este podrá ser recuperado mediante un proceso de electrodeposición o por precipitación de zinc y el CA podrá ser preparado para su reutilización (figura VI.4.b).

El CA puede ser reutilizado entre 100 y 400 ciclos de adsorción y elución dependiendo de la resistencia del carbón y la eficiencia de los procesos de reactivación utilizados estos ciclos representan un ahorro de dinero por lo que hay que buscar su optimización. El proceso de selección del CA es muy

importante, debido a que conociendo las funciones y propiedades de este se puede lograr determinar si es adecuado para un proceso de extracción en específico. Dentro de las propiedades de porosidad de los CA la presencia de microporosidad, mesoporosidad y macroporosidad resultan de gran relevancia para la adsorción de diferentes tamaños de partículas de oro y otros metales. Las condiciones del proceso y el contenido de oro a extraer deben ser tomados en cuenta también para obtener los resultados deseados (Mas *et al.*, 2005).

Del análisis de parámetros exigidos para la adsorción de oro en los CA obtenidos tenemos que se adaptan mejor a estas normas los de HA como precursor por la granulometría exigida (0,85 y 3,36 mm).

El Índice de Yodo necesario para esta aplicación es de 950 mg/g como mínimo, los CA de HA que se alinean con este requerimiento son los obtenidos por activación con dióxido de carbono a 900 °C durante 30 y 90 min (6 y 4), por activación con vapor de agua a 650 °C durante 120 min (11) y a 850 °C durante 30 y 120 min (12 y 14). Un único CA de MO cumple con la exigencia (con índice de yodo cercano a 1.000 mg/g) y es el obtenido a 750 °C activado con dióxido de carbono durante 30 min (15).

Respecto del contenido de cenizas 4 de los 6 carbones que cumplimentan con los valores de índice de yodo poseen cenizas inferiores o cercanas al 5 % (5, 7, 10, 12).