



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MINAS, METALURGIA Y

GEOLOGÍA

Electrosorción de litio en superficie de carbón activado con cáscara de coco

Tesis para obtener el grado de Ingeniería Metalúrgica

Presenta

Michell Valentina López Rojas

Dirección científica:

Dra. Lucía Guadalupe Alvarado Montalvo

Guanajuato, Gto., octubre, 2025





UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MINAS, METALURGIA Y

GEOLOGÍA

Electrosorción de litio en superficie de carbón activado con cáscara de coco

Tesis para obtener el grado de Ingeniería Metalúrgica

Presenta

Michell Valentina López Rojas

Dirigido por

Dra. Lucía Guadalupe Alvarado Montalvo

SINODALES

Dra. Guadalupe Vázquez Rodríguez

Dr. Juan Carlos Baltazar Vera

Dr. Martín Caudillo González





Campus Guanajuato

División de
Ingenierías

Guanajuato, Gto., 9 de mayo de 2024
Asunto: Modalidad de Trabajo de Tesis

C. MICHELL VALENTINA LÓPEZ ROJAS
NUA 435285
Presente

En respuesta a su petición presentada ante esta dirección de la División de Ingenierías del Campus Gto, de la Universidad de Guanajuato, mediante la cual pide la autorización de titulación bajo la **Modalidad de Trabajo de Tesis**; al respecto le informo que se autoriza la modalidad con el *Tema de Tesis*: **"ELECTROSORCIÓN DE LITIO EN SUPERFICIE DE CARBÓN ACTIVADO DE CÁSCARA DE COCO"**, para obtener el título de **Ingeniera Metalúrgica**, asimismo hago de su conocimiento que se ha designado como **Directora de Tesis** a la **Dra. Lucía Guadalupe Alvarado Montalvo** y como **Codirectora** a la **Dra. Ma. Mercedes Salazar Hernández**.

Sin otro particular por el momento, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

Atentamente,
"La verdad os hará libres"
El Director


Dr. Gilberto Carreño Aguilera



Universidad de Guanajuato
División de Ingenierías
Campus Guanajuato
DIRECCIÓN

C.c.p.digital. Directora de Tesis: **Dra. Lucía Guadalupe Alvarado Montalvo**. Para su conocimiento y seguimiento correspondiente.
Codirectora: **Dra. Ma. Mercedes Salazar Hernández**. Para su conocimiento y seguimiento correspondiente.
DR. GCA/LASR

Guanajuato, Gto., octubre 2025

Asunto: Aprobación de Trabajo
de Titulación.

DR. GILBERTO CARREÑO AGUILERA
DIRECTOR DE DIVISION DE INGENIERIAS
CAMPUS GUANAJUATO
P R E S E N T E.

Los que suscriben, revisores del trabajo, que, como requisito para obtención de Título Profesional, fue presentado a revisión por:

C. Michell Valentina López Rojas

Pasante del Programa Educativo de Ingeniero Metalúrgico de la División de Ingenierías del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato, en la modalidad de *Trabajo de Tesis* con el Título:

*"Electrosorción de Litio en superficie de Carbón Activado
De Cáscara de Coco."*

Una vez leído, analizado y revisado el trabajo, ha sido aprobado para que continúen con los trámites requeridos para solicitar fecha y sustente examen.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

Atentamente
"La Verdad Os Hará Libres"

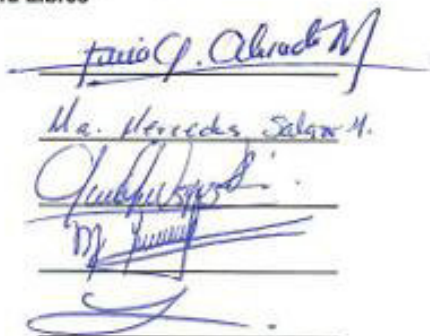
Dra. Lucía Guadalupe Alvarado Montalvo
Directora del Trabajo

Dra. Ma. Mercedes Salazar Hernández
Codirectora del Trabajo

Dra. Guadalupe Vázquez Rodríguez
Sinodal del Trabajo

Dr. Martín Caudillo González
Sinodal del Trabajo

Dr. Juan Carlos Baltazar Vera
Sinodal del Trabajo



DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN MINAS, METALURGIA Y GEOLOGIA
Ex-Hacienda San Matías s/n, 36200, Guanajuato, Gto., Tels. (473) 732 22 91, Fax (473) 732 38 64
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CAMPUS GUANAJUATO

Agradecimientos

Gracias infinitas a mi mamá que sin importar la locura que piense y realice, siempre me apoya y está para mí; gracias, papá, porque aprendí que el que persevera, alcanza y este trabajo es la prueba de ello. A mi hermano por inspirarme a ser mejor, sin importar las circunstancias.

Un enorme y gran agradecimiento a la Dra. Lucía Guadalupe Alvarado Montalvo por inspirarme, enseñarme, acompañarme, aconsejarme y corregirme durante toda mi estancia en la universidad, guío mi camino cuando me sentí pérdida.

A mi abue y mi abuelo, nunca llegaron a ver esto terminado, pero sin duda sé que han estado conmigo de inicio a fin, gracias por siempre haber creído en mí.

Mis amigos, que se convirtieron en mi familia de 7, gracias por las risas, distracciones, enseñanzas, apoyo y amor que he recibido, gracias eternas.

Agradezco inmensamente a todos y cada una de las doctoras, doctores, maestras y maestros que me transmitieron todos sus conocimientos, experiencias y enseñanzas.

Por último, este trabajo se realizó en las instalaciones del Departamento de Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato.

Resumen

En el presente trabajo se evaluó la capacidad de electro-sorción que tiene el carbón de cáscara de coco orgánico para captar el ion de Litio, en donde se aplicaron tres técnicas electroquímicas (voltametría cíclica, cronoamperometría y cronocoulombimetría) para conocer el comportamiento y captación de ion en el carbón activado.

Se utilizaron soluciones de LiCl en tres diferentes concentraciones: 10 ppm, 50 ppm y 100 ppm; se aplicó un potencial de -1V a 2V en las voltametrías cíclicas y una velocidad estándar de 100 mVs^{-1} . Mientras que en las cronoamperometría y cronocoulombimetrías se establecieron diferentes ciclos de 10 s cada uno y de esta manera tener diferentes escenarios donde se explicará el comportamiento de la especie electroactiva.

Siendo así se tiene que a menor concentración (10 ppm) y velocidad (10 mVs^{-1}) tiene una mayor capacidad faradaica de 4 Fg^{-1} que la solución de 100 ppm (2 Fg^{-1}); mientras que la solución de mayor concentración (100 ppm) tiene una mejor carga capacitiva almacenando 5.44 mC.

Índice

Agradecimientos	V
Resumen	VI
Índice de Figuras.....	IX
Capítulo 1	1
Introducción	1
Justificación	3
Objetivo general	4
Objetivos específicos.....	4
Capítulo 2	5
Antecedentes.....	5
2.1 Fenómenos de adsorción	6
2.2 Fenómenos de electro-sorción	9
2.3 Materiales utilizados en fenómenos de electro-sorción	10
2.4 Aplicaciones de la electro-sorción.....	11
2.5 Técnicas electroquímicas de caracterización.....	11
2.5.1 Voltametría cíclica	12
2.5.2 Cronoamperometría	14
2.5.3 Cronocoulombimetría	15
2.6 El carbón activado	16
2.7 Sistema de estudio: Li-H ₂ O	18
Capítulo 3	20
Metodología	20
3.1 Proceso de adsorción	21
3.2 Electro-sorción	21
3.2.1 Voltamperometría cíclica	23

3.2.2 Cronoamperometría	23
3.2.3 Cronocoulombimetría	23
Capítulo 4	24
Resultados	24
4.1 Electro-sorción: Voltametría cíclica.....	24
4.1.1 Efecto de la concentración a 100mVs^{-1}	25
4.1.2 $[\text{Li}^{+1}]$ 10 ppm.....	26
4.2 Electro-sorción: Cronoamperometría	28
4.2.1 $[\text{Li}^{+1}]$ 10 ppm	28
4.2.2 $[\text{Li}^{+1}]$ 50 ppm	30
4.2.3 $[\text{Li}^{+1}]$ 100 ppm	30
4.3 Electro-sorción: Cronocoulombimetría	32
4.4.1 $[\text{Li}^{+1}]$ 10 ppm	32
4.4.2 $[\text{Li}^{+1}]$ 50 ppm	33
4.4.3 $[\text{Li}^{+1}]$ 100 ppm	33
Conclusiones.....	36
BIBLIOGRAFÍA.....	37
ANEXO	39

Índice de Figuras

Capítulo 2

Fig. 2. 1 Ejemplo gráfico de la adsorción de una sustancia	6
Fig. 2. 2 Ejemplo de sustancia adsorbida por quimisorción y fisisorción	7
Fig. 2. 3 Celda electrolítica de tres electrodos, (Rábago, 2017)	12
Fig. 2. 4 Voltamograma cíclico típico (Flores, 1995)	13
Fig. 2. 5 Cronoamperograma, (Bard & Faulkner, 2001)	15
Fig. 2. 6 Cronocoulograma, (Bott & Heineman, 2004)	16
Fig. 2. 7 Diagrama Eh-pH de sistema Li-H ₂ O	18
Fig. 2. 8 Diagrama Eh-pH de sistema Li-H ₂ O	19

Capítulo 3

Fig. 3. 1 Ejemplo del experimento de Adsorción.....	21
Fig. 3. 2 Celda electrolítica de tres electrodos	22

Tabla 3. 1 Especificaciones generales de los Experimentos	22
---	----

Capítulo 4

Fig. 4. 1 Voltametría cíclica obtenida de un intervalo de -1V a 2 V, [Li ⁺]: 10ppm, 50ppm, 100ppm.....	25
Fig. 4. 2 Capacitancia específica obtenida de voltametría cíclica de un intervalo -1V a 2V, [Li ⁺]: 10ppm, 50ppm, 100ppm.....	26
Fig. 4. 3 Voltametría cíclica obtenida de un intervalo -1V a 2V, [Li ⁺]: 10ppm	27
Fig. 4. 4 Capacitancia específica obtenida de una voltametría cíclica de un intervalo -1V a 2V, [Li ⁺]: 10ppm	28
Fig. 4. 5 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 1V, [Li ⁺]: 10ppm	29
Fig. 4. 6 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 1V, [Li ⁺]: 10ppm	29
Fig. 4. 7 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 2V, [Li ⁺]: 10ppm	30
Fig. 4. 8 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 2V, [Li ⁺]: 10ppm	31
Fig. 4. 9 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 2V, [Li ⁺]: 100ppm.....	31

Fig. 4. 10 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 2V, [Li+1]: 10 ppm, 50ppm, 100ppm.....	32
Fig. 4. 11Cronocoulombimetría obtenida de un intervalo de 0.5V a 1.5V, [Li+1]: 10 ppm	33
Fig. 4. 12 Cronocoulombimetría obtenida de un intervalo de 0.5V a 1.5V, [Li+1]: 50 ppm	34
Fig. 4. 13 Cronocoulombimetría obtenida de un intervalo de 0.5V a 1.5V, [Li+1]: 100 ppm.....	34
Fig. 4. 14 Cronocoulombimetría obtenida de un intervalo de 0.5V a 1.5V, [Li+1]: 10 ppm, 50 ppm,100 ppm	35

Capítulo 1

Introducción

El litio (Li) es el metal más liviano que encontramos dentro del grupo IA de los metales alcalinos; siendo este uno de los únicos elementos que se produjeron en el Big Bang junto con el hidrógeno y el helio, ocupando así el tercer lugar en la tabla periódica. Este metal es de color blanco platinado, blando, liviano y con una gran capacidad electroquímica, es decir, es un elemento que tiene un elevado rendimiento para almacenar y entregar energía y que sea útil dentro de la industria energética; de tal suerte que hoy en día se ha convertido en el llamado “petróleo

blanco”, por su desempeño como protagonista dentro de la industria energética y de salud. (Calvo E. , 2017)

El litio se obtiene de minerales como la espodumena, lepidolita, petalita, eucryptita y amblygonita, que son yacimientos de pegmatitas, granitos asociados, arcillas y zeolitas enriquecidas. (Calvo E. J., 2020) La extracción del litio desde el mineral es un proceso complejo y caro, mientras que su obtención a partir de salmuera o salares de cuencas cerradas, petroleras o geotermales es el proceso más sencillo hasta ahora que existe para la recuperación de este metal, consistiendo en el bombeo del agua y posterior distribución a estanques de evaporación, esperando así el tiempo necesario para su concentración y así se vayan precipitando las sales de litio, para ser purificadas posteriormente. Esta es una operación sencilla en comparación con su recuperación de desde el mineral, pero conlleva mucho más tiempo.

En cuanto sus las aplicaciones, la importancia del litio radica en su importante rol en los sistemas galvánicos (baterías) utilizándose así, dentro de la industria energética, en procesos electroquímicos de “carga-descarga”, de tal manera que en una batería recargable se promueve el movimiento de iones litio desde el ánodo hacia el cátodo a través de un electrolito, dando a lugar a una diferencia de potencial eléctrico, que a su vez inducirá una corriente eléctrica. Es así, como este tipo de baterías, basadas en iones litio, actualmente son utilizadas en: celulares, automóviles eléctricos, pilas de marcapasos, relojes, así como almacén de energía producida por un sistema solar. Por todo lo anterior, el estudio de los fenómenos de superficie se vuelve importantes, así como la capacidad superficial para captar iones, lo que se vuelve un parámetro sumamente relevante durante los procesos carga-descarga. De ahí, que es de esperarse que dentro de estas baterías se utilice un material que tenga la capacidad de almacenar estos iones cargados eléctricamente para su “carga-descarga”.

Hablando sobre el tipo de materiales, uno que posee características de alta área superficial y bajo costo es el carbón activado, el cual ha sido utilizado en procesos de adsorción desde tiempos ancestrales con diferentes propósitos. Las principales características observadas en el carbón activado, son su elevada área superficial, microporosidad elevada y bajo costo, entre otros. El término “carbón activado”, por su parte, se refiere a carbones muy porosos producidos a partir de materiales ricos en carbono que se activan en formas químicas o físicas.

De acuerdo con lo anterior, hoy en día, existe la necesidad de, por un lado, innovar en los métodos de la recuperación del litio, y por otro lado estudiar capacidad de adsorción en ciertas superficies con posibilidad de aplicarse en la industria de la energía. Por ello, en el presente trabajo se discute la caracterización de material carbonoso (carbón activado) comercial para estudiar el fenómenos electro sorción de litio, a partir de soluciones sintéticas.

Justificación

La gran demanda de litio para el almacenamiento de energía ya sea en la industria automovilística o de la producida por las tecnologías renovables intermitentes ha llevado a que el precio de una tonelada de litio sea de 4500 USD (año 2020) y posteriormente a 72000 USD (marzo 2022) siendo entonces que el consumo global de litio para baterías se incrementó del 23% en el 2010 al 65% en el año 2020, traduciéndose en 440000 toneladas y que para el año 2030 se prevé que se de 1793 millones de toneladas, por lo que se espera la alza de precio en los próximos años (Calvo, 2020).

Por su parte, la Agencia Internacional de Energía estimó que se invirtieron 2,8 billones de dólares en energía en el 2023, de los cuales 1,7 billones de dólares fueron destinados a energía limpia, incluida la energía renovable, nuclear, redes, almacenamiento, combustibles de bajas emisiones y electrificación; el resto, alrededor de un billón de dólares, se destinó al suministro constante de combustibles fósiles y energía, de los cuales 15% se destinó al carbón, mientras que el resto al petróleo y gas, calculándose entonces, que por cada dólar gastado en combustibles fósiles ahora se gastan 1.7 dólares en energía limpia, mientras que hace 5 años la proporción era 1:1 (IEA, 2023).

Ahora bien, hablando de tecnologías de separación iónica, procesos tales como desalinización o deionización, han mostrado ser una alternativa competente para el tratamiento de efluentes líquidos, basándose principalmente en el uso de materiales de alta área superficial, donde mediante la aplicación de una pequeña diferencia de potencial eléctrico se provoca la adsorción de iones y por lo tanto la deionización de este.

De esta manera, el presente proyecto se enfoca en la evaluación capacidad del carbón activado para almacenar el ion de litio, como referente de su uso en futuras investigaciones y se considere viable este material como contenedor de energía limpia, por ejemplo: en las baterías de ion litio como ánodos o cátodos según convenga o en su uso dentro de tecnologías destinadas a la recuperación de este elemento de efluentes acuosos.

De esta manera, en el presente proyecto se desea realizar la caracterización electroquímica del carbón activado durante el proceso adsorción-desorción de iones de litio presentes en un sistema acuoso.

Objetivo general

Evaluar la capacidad de electro-sorción de la superficie de carbón activado de cáscara de coco orgánico con respecto al ion litio.

Objetivos específicos

1. Conocer la capacidad de electro-sorción que tiene el carbón activado de cáscara de coco orgánico comercial, utilizando como analito cloruro de litio.
2. Determinar la reversibilidad de la electrosorción para el sistema estudiado.
3. Evaluar la factibilidad del material adsorbente para su posible uso en sistema de almacenamiento de energía o de tratamiento de efluentes.

Capítulo 2

Antecedentes

La electro-sorción o bien, deionización capacitiva es un método electroquímico que almacena utilizado para adsorber iones acuosos en la superficie de un material, actuando, así como un supercondensador (Baizán, 2012); el funcionamiento de este proceso se basa en aplicar una pequeña diferencia de potencial entre dos electrodos que se encuentran inmersos en un electrolito. De esta manera, el estudio de la electro-sorción sienta las bases para el entendimiento del almacenamiento de energía y la deionización.

2.1 Fenómenos de adsorción

La adsorción (Fig. 2.1) es un proceso en el cual los átomos, iones o moléculas (líquidas, gaseosas o sólidas) que se encuentran disueltas en un sistema son “atrapados” o retenidos en una superficie de un sólido, entonces se puede definir como la transferencia de una sustancia de una fase a la acumulación o concentración en la superficie de otra; esta superficie, donde queda atrapada la sustancia se denomina adsorbente, mientras que el material concentrado o adsorbido es llamado adsorbato. Siendo de este modo, el proceso inverso de la adsorción se le como desorción, es decir, las moléculas retenidas en el adsorbente se desprenden de este (Bard & Faulkner, 2001).

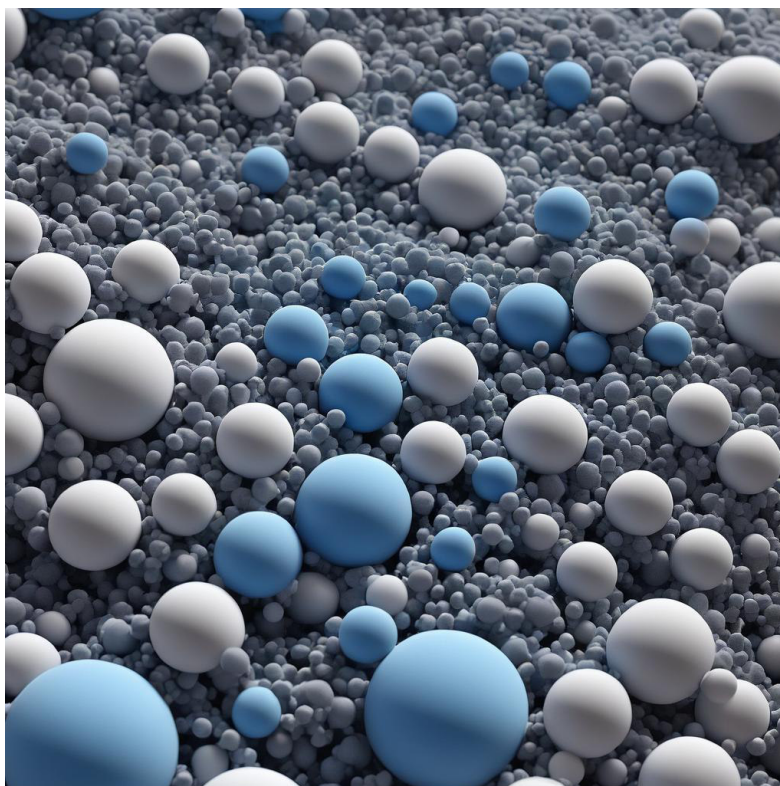


Fig. 2. 1Ejemplo gráfico de la adsorción de una sustancia

La adsorción se puede clasificar en dos grupos:

- a. **Adsorción física o fisisorción**: es un proceso donde las especies pueden adsorberse en varias capas consecutivas de una forma rápida y reversible; este proceso depende principalmente del pH que hay en la solución, así como en las propiedades químicas innatas del adsorbato. Este tipo de

adsorción se debe a las fuerzas de Van Der Waals y a las interacciones electrostáticas de dispersión, dipolares e inducción que hay entre las moléculas del adsorbato y los átomos que componen la superficie del adsorbente; este proceso es exotérmico y bastante lento en comparación con el de quimisorción (Baizán, 2012).

- b. **Adsorción química o quimisorción:** el desarrollo de este proceso depende la temperatura, naturaleza química del sólido y el nivel de concentración de la especie del adsorbato, es decir, se caracteriza por ser una interacción más fuerte que la fisisorción, ya que las entalpías son mayores en la formación y roturas de fuerzas que se dan dentro del sistema, lo que implica que las moléculas adsorbidas no mantienen la misma estructura electrónica (Baizán, 2012).

Ambos tipos de adsorción, física y química, (Fig. 2.2) no necesariamente, se presentan de manera independiente, de hecho, en sistemas naturales se dan diversas formas de adsorción dentro de la misma superficie sólida, por ejemplo, una quimisorción entre el adsorbato y el adsorbente, formando una monocapa en la superficie, y después producir nuevas capas del adsorbato debido un proceso de fisisorción (Baizán, 2012).

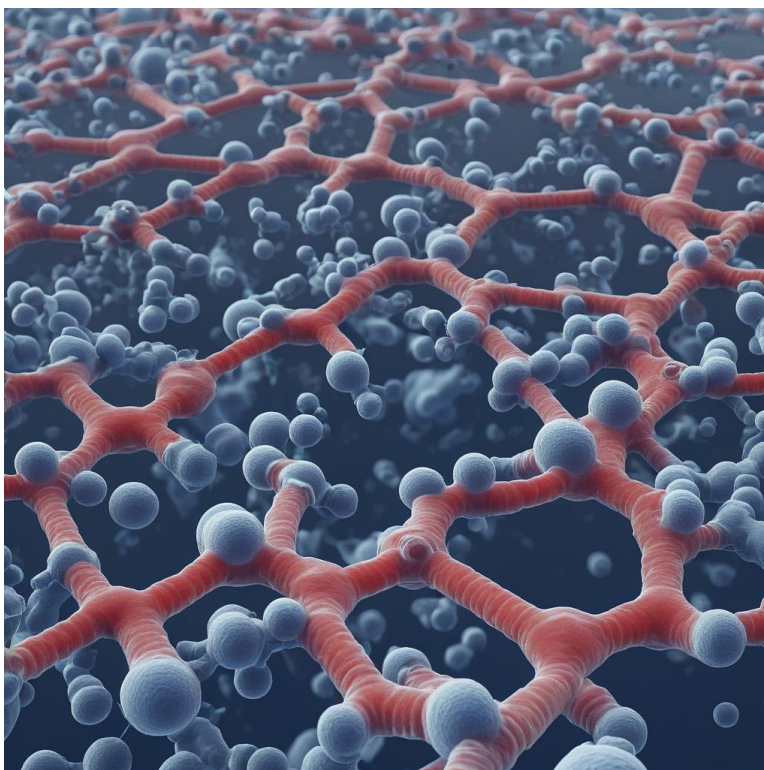


Fig. 2. 2 Ejemplo de sustancia adsorbida por quimisorción y fisisorción

Existen distintos factores de los que depende la adsorción como lo son: la temperatura, la polaridad de la solución, el tipo de compuesto que será adsorbido, la concentración, la presencia de otros compuestos o contaminantes y el pH de la sustancia.

Para poder estudiar los fenómenos de adsorción, existen las isothermas de adsorción, mediante las que el fenómeno de la adsorción puede ser comprendido. A continuación, se citan algunas de las más conocidas (Beltran & Núñez, 1988) :

- I. **Langmuir**, es donde se produce el llenado de los microporos o monocapa, es decir, la superficie proporciona un cierto número de posiciones para la adsorción y todas son equivalentes así que solamente se adsorbe una molécula sobre cada posición y así cada posición es independiente una de la otra y las moléculas que componen al adsorbato.
- II. **BET**, llamada así por el análisis de S. Brunauer, P. Emmett y E. Teller en 1938 (Beltrán et Al., 1988) y es característico en procesos de sólidos no porosos o macroporosos; representa una adsorción en monomulticapas o sea que todos los centros de adsorción de la superficie son equivalentes, la capacidad de adsorción de un centro no depende del grado de ocupación de los centros vecinos y sobre cada centro pueden adsorberse varias capas de moléculas, siendo el calor de adsorción para todas ellas equivalentes excepto para la primera.
- III. Este tipo es característico en procesos de adsorción en sólidos no poroso en los que la interacción adsorbente es débil, el estudio de estos procesos es bastante difícil porque no existe prácticamente una interacción superficial sólido-gas o sólidos-líquidos, muy comunes en los metales.
- IV. Se caracteriza por la presencia de ciclos de histéresis, su parte inicial es semejante a la isoterma tipo II, pero a presiones medias comienza la condensación capilar en mesoporos, con este tipo de isoterma es muy sencillo determinar la distribución de tamaños de los poros; por ejemplo: las sílices y alúminas.
- V. Son pocos comunes y con una difícil interpretación ya que la finalidad de adsorbente por el adsorbato es baja y la histéresis enlaza con el llenado de los poros, además que nunca se obtienen superficies específicas, ni de

distribuciones de tamaño de poros que sean fiables. Este tipo se da en el vapor de agua con respecto a los carbones, por ejemplo.

- VI. **La isoterma escalonada**, se da en con la adsorción en multicapas de los gases nobles sobre superficies altamente uniformes, entonces cada una de las primeras capas se adsorbe dentro de un cierto rango de presiones correspondiendo cada escalón al llenado de una capa, hasta un total de dos a tres capas o sea que cada capa contribuye a la formación de la siguiente mediante a las interacciones laterales que hay entre las moléculas.

Existen diferentes tipos de isothermas con los que se puede describir la adsorción, pero al mismo tiempo es complejo modelar los resultados de una adsorción y es por lo que de manera empírica se describe con **la isoterma de Freundlich** que describe los comportamientos en una curva donde se relaciona la concentración de un soluto en la superficie de un adsorbente, con la concentración del soluto en el líquido con el que está en contacto.

2.2 Fenómenos de electro-sorción

La electrosorción se puede definir como un fenómeno de adsorción inducida por una diferencia de potencial sobre la superficie de un electrodo (Tabti, 2014). Esto es posible por el campo eléctrico externo que se le induce a través de los electrodos que se encuentran inmersos en el electrolito, así, de este modo los iones son atraídos hacia el electrodo que tenga carga opuesta a ellos, dando así lugar a la separación de especies cargadas a través de la interfaz electrodo-disolución. En esta interfaz, se establece una doble capa eléctrica (EDL, del inglés Electrical Double-Layer) donde se hace referencia a la acumulación, ordenamiento y separación de cargas eléctricas que hay en la superficie del sólido que se encuentra sumergido en la disolución electrolítica (Santos, 2017) o sea que la carga de electrodo se compensa con la contra-carga iónica que hay en el electrolito.

Otra forma de nombrar a la electrosorción es deionización capacitiva (CDI), históricamente el pionero de este fenómeno fue Grahame, que realizó estudios sobre la adsorción a un potencial controlado de un agente tensoactivo no iónico en 1946. Después en los 60's y 70's, cuando los grupos de investigación de Blair y Murphy usaron electrodos de carbón poroso para llevar a cabo la electrosorción de iones procedentes de un electrolito acuoso, en estos primeros trabajos se le denominaba *desmineralización electroquímica o procesos de electrosorción para desalinización de aguas* (Santos, 2017). Luego en 1980 Bán et. Al., utilizaron la electroadsorción aplicando el carbón activado como tratamiento en la eliminación de contaminantes que procedían de efluentes industriales, después en los años 90

Johnson et. Al., publicaron estudios sobre la deionización, la formación de la doble-capa electroquímica y sobre los mecanismos en los cuales se lleva a cabo la retirada de iones en materiales porosos; un grupo investigadores de Lawrence Laboratory, encabezado por Farmer, desarrollaron estudios sobre la deionización capacitiva mediante electrodos de aerogeles de carbón y así publicaron el primer análisis teórico sobre el consumo de energía usando clorato de amonio (NH_4ClO_3) en un medio acuoso en el que se puso en evidencia el bajo requerimiento energético que suponía realizar la deionización mediante CDI (Santos, 2017).

En el siglo XX y XXI se produjo un aumento exponencial en el estudio y publicaciones relacionadas con el desarrollo de esta tecnología, siendo de este modo que la mayoría ha sido por la mejora de la electro-adsorción y, así, desarrollar mejores materiales que tengan mejor superficie específica, conductividad eléctrica, respuesta carga-descarga, estabilidad en la variación del pH y la oxidación que se produce; así como en el diseño de CDI, parámetros energéticos, estabilidad y operación de este método.

2.3 Materiales utilizados en fenómenos de electro-sorción

Hoy en día, para evaluar la eficiencia de un material en su desempeño con respecto a la electro-sorción se deben de tomar condiciones estándar que engloben el sistema a tratar, es decir, el tipo de celda, el material de los electrodos, el modo, condiciones de operación y los tipos de iones con los que se están trabajando.

En 2008 Oren realizó una revisión de las características que definirían que material sería ideal aplicar en el proceso de CDI, las cuales se citan a continuación (Gállego, 2016):

- a. **Elevada superficie accesible a los iones que se quiere eliminar**, es decir, mientras mejor accesibilidad haya a la superficie, mayor será la adsorción de iones en el material; el material debe tener un poro diferente al del radio iónico de la especie que será adsorbida.
- b. **Elevada movilidad iónica en la red porosa**, se necesita una red porosa interconectada y amplia en comparación con el tamaño iónico de las especies adsorbidas.
- c. **Elevada estabilidad química en el rango de pH y potenciales al opera la CDI**.
- d. **Alta mojabilidad**, así se asegura el transporte iónico por toda la red y elimina las resistencias del solvente.
- e. **Elevada movilidad electrónica**.
- f. **Bajo coste y producción escalable**.
- g. **Versatilidad de fabricación**.
- h. **Elevada inercia biológica**, así se evitan la formación de biopelículas.

- i. **Baja resistencia de contacto con el colector de corriente**, de esta manera se evita altas caídas de potencial en el electrodo que comprometen energéticamente el proceso.

La superficie accesible a los iones y la movilidad iónica en el interior del material están ligadas a las propiedades nanotexturales, es decir, la superficie específica del material, así como la distribución de los tamaños de los poros. Otro aspecto importante es la conductividad eléctrica, es decir, que tan sencillo es transportar la carga almacenada bajo un campo eléctrico.

La mayoría de estas características determinaran en gran medida la capacidad de electro-sorción y la cinética que habrá en el proceso.

2.4 Aplicaciones de la electro-sorción

La deionización capacitiva o electro-sorción se ha popularizado en los últimos años como una importante línea de investigación, por lo que se ha comenzado a estudiar bajo los siguientes enfoques (Gállego, 2016).

- **Desarrollo y caracterización de materiales para electrodos CDI**, los cuales tendrán la función de desalinizar los electrolitos relacionados a su capacidad de adsorción y área superficial, buscando obtenerse un alto grado de conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión.
- **Diseño de celdas y dispositivos**, donde se centra en la ingeniería de las celdas.
- **Modo de operación**, sistemas galvanostáticos o potencioestáticos.

Por último, cabe mencionar que una ventaja del uso de esta tecnología es que los movimientos que se dan entre los iones y el efluente que conforman el sistema no requieren de altos voltajes o densidades de corriente, al mismo tiempo, no se generan presiones hidráulicas altas, como otro tipo de sistemas convencionales a los que estamos acostumbrados, como lo puede ser la osmosis inversa.

2.5 Técnicas electroquímicas de caracterización

Existen diferentes técnicas electroquímicas para que nos permiten caracterizar superficies y brindar datos sobre capacidad de electro-sorción de un material ante

cierto sistema termodinámico. A continuación, se citan algunas de las técnicas útiles para tales fines, así como su principio.

2.5.1 Voltametría cíclica

La voltamperometría o voltametría, fue desarrollada en 1922 a partir de la polarografía (método electroquímico que da información cualitativa y cuantitativa de sustancias electro-reducibles y electro-oxidables) por Jaroslav Heyrovsky (Rábago, 2017). La voltamperometría o voltametría cíclica es una técnica electroquímica que se basa en la investigación de las especies electroactivas donde los resultados se plasmaran en voltamogramas cíclicos (Fig. 2.4 Voltamograma cíclico) que es una gráfica de corriente vs voltaje aplicado que reflejaran la reducción y oxidación que hay dentro de la solución analizada, es decir, el comportamiento reversible o irreversible que hay dentro del sistema, así como determinar cantidad de transferencia de electrones que hay dentro de la especie en cuestión.

La celda (Fig. 2.3 Celda electrolítica de tres electrodos) en donde se realiza este estudio se conforma de tres partes principales:

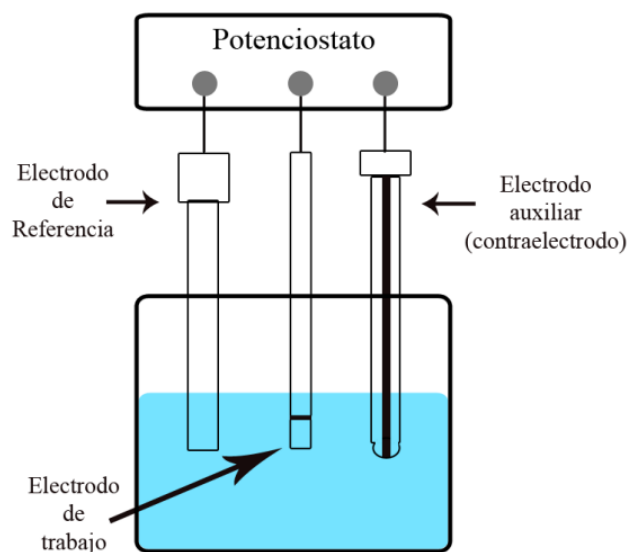


Fig. 2. 3 Celda electrolítica de tres electrodos, (Rábago, 2017)

- **Electrodo de trabajo**, es donde tiene lugar las reacciones de interés y se forma de un material inerte y el área que será expuesta en donde se llevará a cabo la reacción.
- **Electrodo de referencia**, este tiene un potencial conocido que sirve para medir el potencial aplicado en la celda.

- **Contraelectrodo o electrodo auxiliar**, encargado de cerrar o completar el circuito que se crea en la celda.

Para comenzar con las corridas o experimentos, los electrodos se conectan a un potenciostato, que será el instrumento que controla el potencial aplicado y la medición de la corriente que resulte. Los electrodos se sumergen en el electrolito para que de esta manera se propague la conductividad que hay dentro de la solución y de esta manera iniciar la corrida aplicando un potencial.

El potencial que se aplica al experimento debe de ser más positivo que el potencial del electrodo de referencia y así asegurar la efectividad de la reacción redox y de esta manera tener la corriente resultante del potencial que fluye del electrodo de trabajo al contraelectrodo y así mostrar los resultados en un voltamograma que muestre la variación de corrientes que hubo dentro de la corrida.

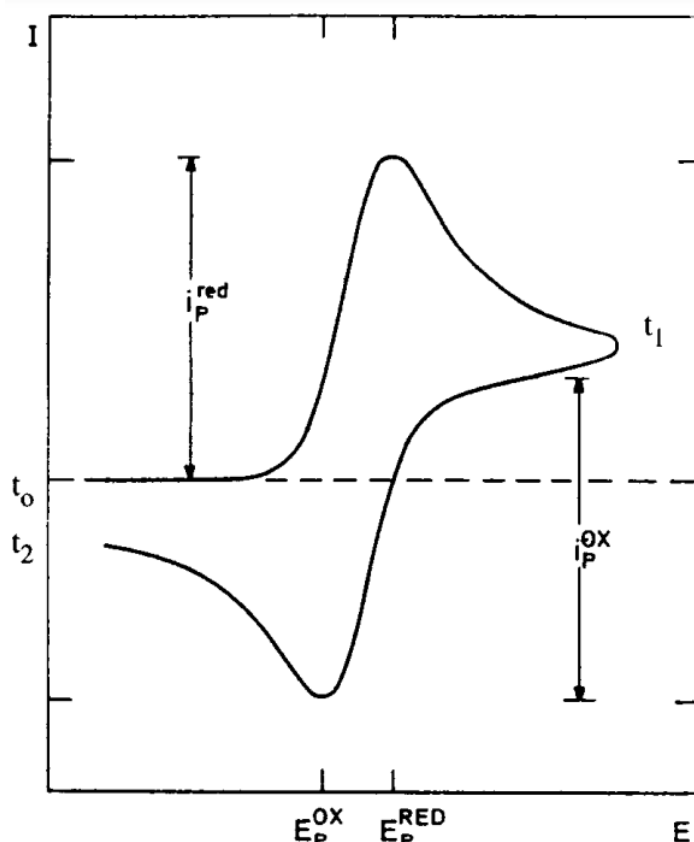


Fig. 2. 4 Voltamograma cíclico típico (Flores, 1995)

Un voltamograma cíclico típico (Fig. 2.4 Voltamograma cíclico) posee zonas donde los resultados de intensidad de corriente obtenidos, respecto al potencial aplicado se plasman en una curva, encontrando así un el punto máximo de intensidad de corriente para un potencial específico (E_p^{RED} , potencial de pico catódico) y el

punto mínimo (E_p^{OX} , potencial de pico anódico), es decir, E_p^{RED} es donde la sustancia se encuentra en estado de reducción, mientras que en el punto E_p^{OX} la solución se oxida y de este modo se tienen los valores de reducción y oxidación que hay dentro del sistema.

El voltaje que se aplica se va reflejando en la curva, eje x, donde se comienza con una onda catódica en el incremento de la corriente obtenida, eje y, mientras que el potencial crece la corriente comienza a disminuir hasta obtener el potencial máximo (t_1) y una señal mínima de corriente; posteriormente el barrido se va a invertir ya que el potencial se vuelve negativo y así comienza la reducción de la sustancia cerrar el circuito (t_2).

Entonces, para conocer la reversibilidad de la reacción se miden los valores de la corriente del pico catódico (I_{pc} o i_p^{RED}) y de la corriente del pico anódico (I_{pa} o i_p^{OX}) los cuales deben de ser iguales para catalogarla de este modo (Flores, 1995).

2.5.2 Cronoamperometría

La cronoamperometría, es una técnica electroquímica bastante simple, donde se le aplica un pulso simple en forma de potencial inicial bajo poniendo como límite la reacción redox que se busca lograr en el experimento, es decir, hay que aplicarle un potencial constante al electrodo de trabajo y se mide la corriente en función del tiempo (crono) de esta manera realizar los procesos faradaicos (oxidación o reducción); los primeros experimentos se llevaron a cabo en 1956 por L.C. Clark donde media el oxígeno que se encontraba disuelto en la sangre (Marín, García, de Santiago, & Baeza, 2014).

En una celda electrolítica (Fig. 2.3) se lleva a cabo la cronoamperometría o amperometría también se le conoce como electrólisis masiva de potencial constante doble y se realiza midiendo en cuanto tiempo la intensidad de la corriente es producida por un potencial aplicado y es utilizada para estudiar la cinética de las reacciones químicas, procesos de difusión.

En un cronoamperograma típico (Fig. 2.5 Cronoamperograma) se puede observar que la corriente no es una función lineal, por lo que, durante un proceso faradaico, la transferencia de carga adicional está completamente determinada por el transporte de masa y difusión, a través de una capa de difusión más gruesa y es así como la dependencia del tiempo de la corriente limitada por difusión se demuestra matemáticamente por la ecuación de Cottrell, donde, la corriente cambia linealmente con el recíproco de la raíz cuadrada del tiempo y a partir de la pendiente, conociendo los demás parámetros (voltaje, tiempo, step, etc.) se calcula la corriente; siendo así que el salto de potencial, por un corto tiempo, la corriente es la suma de una corriente capacitiva y una corriente faradaica ya que es necesario cargar la doble capa electroquímica al cambio de potencial. La

corriente capacitiva, sin embargo, disminuye exponencialmente en el tiempo, cae rápidamente y la dependencia del tiempo de la raíz cuadrada es medible.

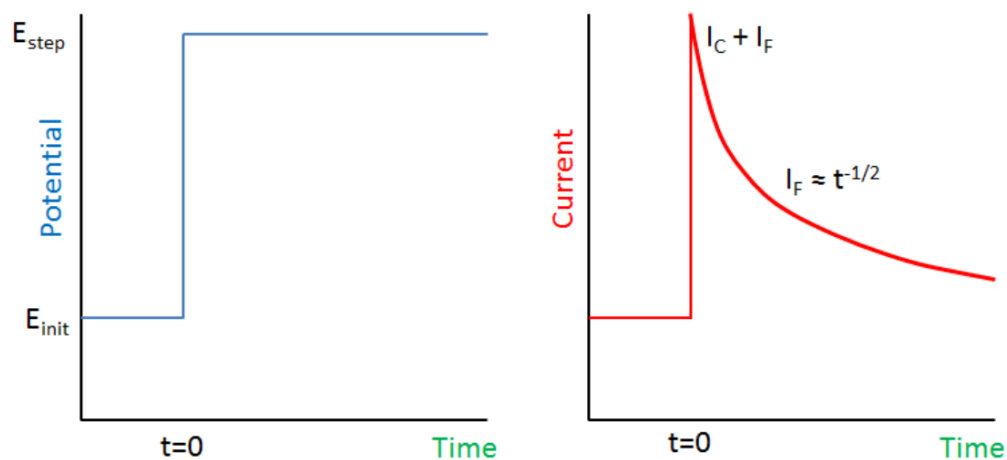


Fig. 2. 5 Cronoamperograma, (Bard & Faulkner, 2001)

2.5.3 Cronocoulombimetría

Una manera de detectar si el electrolito con el que se está trabajando es electroadsorbido es por medio de la cronocoulombimetría, apoyándose de una celda electrolítica (Fig. 2.3 Celda electrolítica de tres electrodos). Esta técnica electroquímica mide la carga que se acumula de la especie electroactiva por el potencial aplicado con respecto al tiempo (crono), es decir, que cantidad de carga se adsorbe en cierto tiempo, viniendo de allí su nombre cronocoulombimetría (Bott & Heineman, 2004).

Este método de medición electroquímica es útil para estudiar la cinética de las reacciones químicas, procesos de difusión y adsorción, ya que se aplica un potencial al electrodo de trabajo y se observa la carga acumulativa resultante frente al tiempo, esta curva de carga-tiempo se le denomina cronocoulograma (Fig. 2.6 Cronocoulograma).

La forma más sencilla de comprender la cronocoulombimetría es asociándola con la primera Ley de Faraday, la cual señala, que la masa de una sustancia que se deposita o se libera en un electrodo es directamente proporcional a la cantidad de corriente eléctrica que circula por el electrolito; siendo de este modo, la representación de esta curva, en donde el potencial cambia paso a paso ($E_i - E_s$) hasta obtener la oxidación o reducción de la especie en cuestión hasta un potencial final (E_f).

La ecuación de Nernst para un sistema redox representa a la cronocoulombimetría de manera sencilla, ya que representa la distribución de concentración del sistema redox reversible que hay en el electrodo cuando se aplica un potencial escalonado.

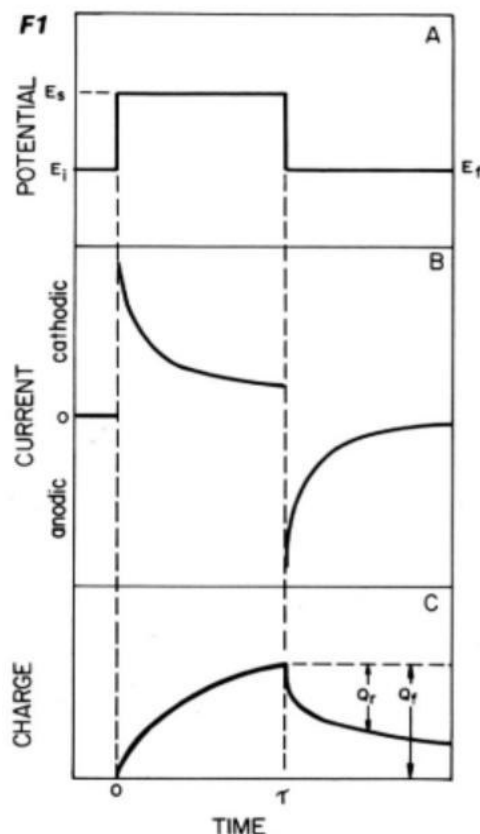


Fig. 2. 6 Cronocoulograma, (Bott & Heineman, 2004)

2.6 El carbón activado

En los procesos que involucran una electro-sorción es de suma importancia el contar con materiales que tengan una amplia área superficial, ya que para llevar a cabo dicho proceso, es primordial la formación de la doble capa eléctrica en la interfase electrodo-electrolito para tener la retención iónica, por lo que entre mayor sea esa área, mayor la posibilidad de captar iones.

Uno de los materiales que se caracteriza por tener una muy alta área superficial es el carbón activado, primordialmente aquel de origen vegetal. El uso de este producto tiene referencia del año 2000 a.C. donde los antiguos egipcios ya lo empleaban para tratamientos medicinales y purificación de agua (Carriazo, Saavedra, & Molina, 2010).

El carbón activado se utiliza como adsorbente por las características natas como lo es su la elevada capacidad de adsorción debida a su alta superficie interna, una baja selectividad de retención y los diferentes poros que hay dentro de este. La clasificación de su porosidad se suele definir de acuerdo con la IUPAC acorde a los tamaños de éstos:

- **Microporos (<2nm)**
- **Mesoporos (<2-50nm>)**
- **Macroporos (>50nm)**

De esta manera, se pueden obtener diferentes tipos de carbones activados que contengan gran variedad de formas, tamaños y morfologías, es por ello por lo que a este material se le puede encontrar en polvos, fibras, granos, pellets, telas, entre otros.

Las propiedades de los carbones activados no solamente se basan en sus estructuras sino también en su química, es decir, el oxígeno y compuestos presentes que serán parte de los grupos funcionales (C, H, O, S) los que inducirán a la polaridad de la superficie del carbón activado como absorbente. Por lo cual, pueden ser producidos por una gran variedad de materiales que sean ricos en carbono, como maderas, cáscaras de frutas, coque, carbón mineral, polímeros, lignitos, entre otros.

Es importante contar con materiales que tenga características las idóneas que son requeridas para realizar una adsorción favorable y estas son:

- **Superficie elevada (800-2000 m²/g)**
- **Distribución amplia de los poros (anchura<100 nm)**
- **Estructura porosa interconectada**
- **Buena conductividad eléctrica**

Cabe mencionar que una gran ventaja del uso del carbón activado como medio de adsorción es que, de carácter anfótero, o sea, su pH se va a comportar en función del medio en donde se utilice; por ejemplo, si estamos en un pH ácido, la carga que estará presente será positiva y al contrario de una disolución básica, será de carácter negativo.

El carbón activado es ampliamente utilizado para el tratamiento de efluentes potables, residuales e industriales, por ejemplo, en la industria alimentaria se utilizan filtros coalescentes donde se elimina impurezas que existen en el aire para evitar contaminación en equipos o procesos posteriores, purificación de productos químicos y farmacéuticos y en la recuperación de productos con valor añadido, como lo son reactivos, subproductos, metales pesados, metales preciosos, etc.

Las características buscadas en el carbón activado dependerán directamente del uso que se le dará, sin embargo, es un material en sí mismo muy versátil y económico.

2.7 Sistema de estudio: Li-H₂O

Una parte importante dentro de un proceso electroquímico es el diagrama Eh-pH del sistema en cuestión (Li-H₂O) ya que revelará la termodinámica que hay dentro del medio en el que se está trabajando, es decir, se observarán la formación de las posibles especies que podrían interferir en la electro-sorción.

En el diagrama de Pourbaix Li-H₂O (Fig. 2.7-2.8 Diagrama Eh-pH de sistema Li-H₂O) el Eh representa el potencial de oxidación-reducción que se basa en el potencial de hidrógeno estándar, mientras que el pH, revela la actividad del protón, es decir, ion hidrógeno; todo esto acompañado de posibles complejos formados, temperatura y presiones.

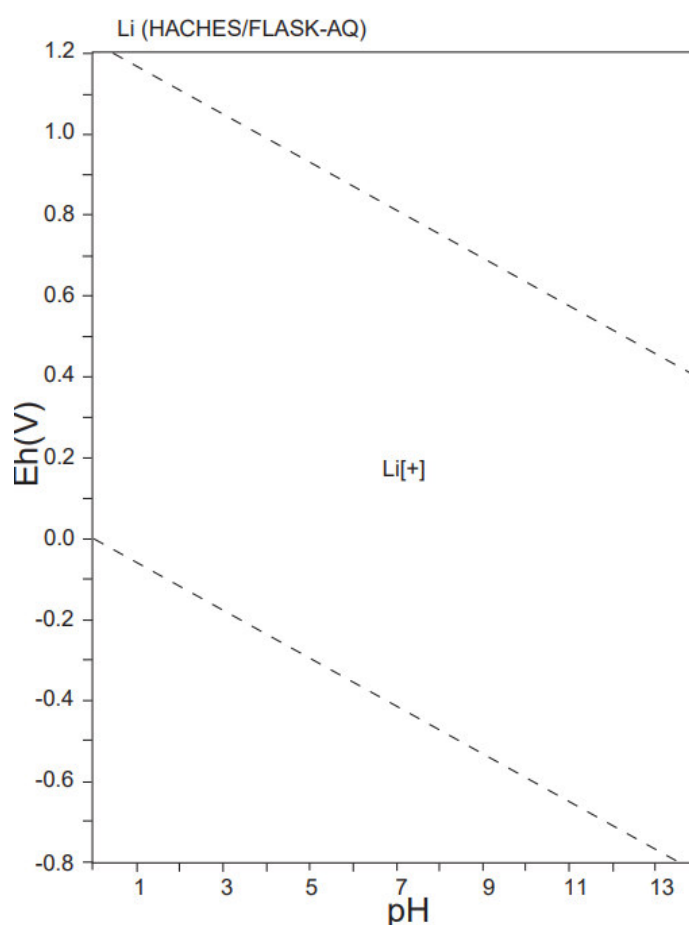


Fig. 2. 7 Diagrama Eh-pH de sistema Li-H₂O

En la Fig. 2.7 y 2.8 se trabajan con una presión 10⁵ Pa y una temperatura de 298.15K. Se puede observar que no existe la formación de ninguna especie o complejo que interfiera en la electro-sorción del ion Li ya que se mantiene estable a diferentes potenciales y pH.

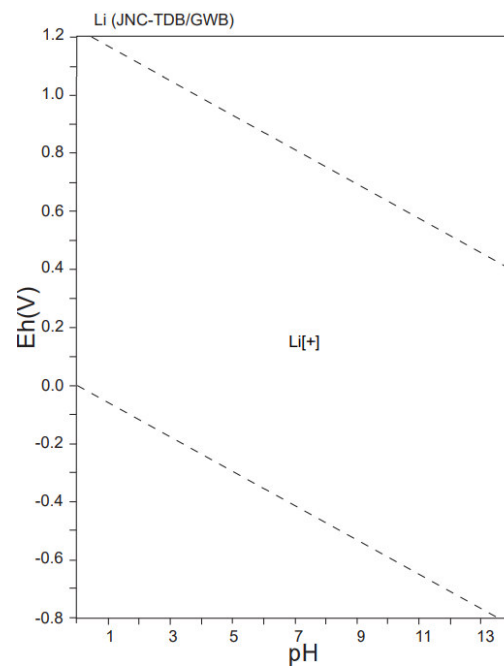
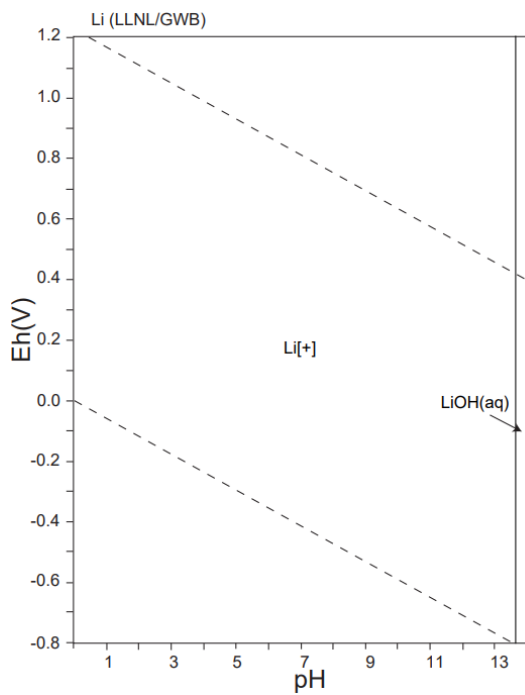
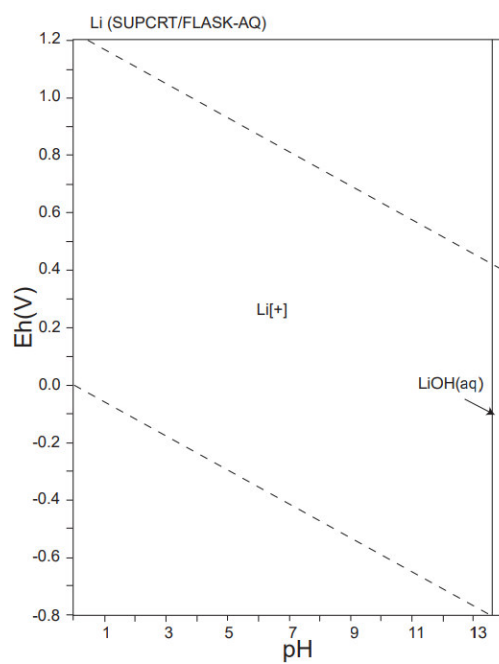
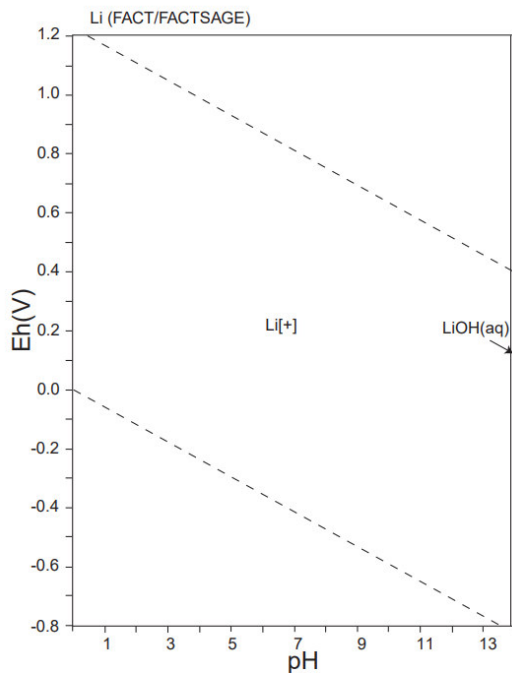


Fig. 2. 8 Diagrama Eh-pH de sistema Li-H₂O

Capítulo 3

Metodología

El análisis de la capacidad de electro-sorción del carbón activado comercial de cáscara de coco para la captación (adsorción) del ion litio, se realizó mediante una serie de experimentos, donde se abarcaron 3 técnicas electroanalíticas: voltamperometría cíclica, cronoamperometría y cronocoulombimetría.

Todos los experimentos fueron llevados a temperatura ambiente (25 °C); el agua utilizada para la preparación de soluciones fue agua deionizada (18 MΩ-cm); el reactivo utilizado fue LiCl (GFS Chemical ® >99% pureza)

Preparación de reactivo y soluciones

Al LiCl se le sometió a un proceso de secado con una temperatura de 100 °C durante 15 minutos, transcurrido dicho tiempo, se colocó en un desecador por un periodo de 15 minutos; tomando en cuenta el peso inicial y final, dicho procedimiento fue para garantizar la eliminación de humedad que pudiera contener la sal. Con el reactivo seco se procedió a la preparación de una solución madre, para a partir de esta obtener soluciones de 10, 50 y 100 ppm de Litio.

3.1 Proceso de adsorción

Se realizó un experimento de adsorción de litio sobre carbón activado, utilizando un sistema tipo batch (Fig. 3.1), lo que significa que una cantidad constante de carbón y solución entran en contacto por cierto tiempo. Para realizar dicho experimento, se tomaron 6 diferentes masas de carbón activado y cada uno se puso en contacto con 125 ml de solución de LiCl con una concentración de 100 ppm, agitándose de manera constante durante 1 hora con una velocidad de 400 rpm, para finalmente filtrarse. Parámetros como la concentración de la solución, pH, conductividad y la temperatura fueron registrados al inicio y final del experimento.



Fig. 3. 1 Ejemplo del experimento de Adsorción

3.2 Electro-sorción

Experimentos de electro-sorción fueron llevados a cabo bajo las técnicas de voltametría cíclica, cronoamperometría y cronocoulombimetría en la superficie de un electrodo basado en carbón activado en un sistema experimental de 3 electrodos, como se describe a continuación, Fig. 3.2:

- Electrodo de trabajo: barra de grafito con una superficie aislada y una expuesta en donde se agregó una capa de carbón de un peso de 0.1699 g
- Contraelectrodo: barra de grafito
- Electrodo de referencia de Ag/AgCl

La aplicación de las técnicas electroquímicas fue realizada en un potenciostato INTERFACE 1010T Potentiostat/Galvanostat/ZRA de Gamry Instruments, cuyas condiciones se describen a continuación, en la Tabla 3.1:



Fig. 3. 2 Celda electrolítica de tres electrodos

Tabla 3. 1 Especificaciones generales de los Experimentos

[Li ⁺]	Voltamperometría cíclica	Cronoamperometría	Cronoamperometría
10 ppm	Velocidad de barrido (mV s ⁻¹)	Potencial (-1V a 2V)	Potencial (-0.5V a 1.5V)
	10	5 ciclos	10 ciclos
	50	10 ciclos	
	100	500 ciclos	
	200		
50 ppm	Velocidad de barrido (mV s ⁻¹)	Potencial (-1V a 2V)	Potencial (-0.5V a 1.5V)
	10	500 ciclos	10 ciclos
	50		
	100		
	200		
100 ppm	Velocidad de barrido (mV s ⁻¹)	Potencial (-1V a 2V)	Potencial (-0.5V a 1.5V)
	10	500 ciclos	10 ciclos
	50		
	100		
	200		

Preparación del electrodo de trabajo

El electrodo de trabajo se preparó utilizando como base con una barra de grafito comercial a la cual se le aplicó una capa de carbón activado, hecho de la siguiente manera:

1. La barra de grafito se sometió a un proceso de secado como al LiCl hasta obtener un peso constante
2. Se agregó una mezcla de carbón activado y solución de nafion® perfluorinated, se secó en la estufa a 80 °C durante 15 minutos, se pasó al desecador y se repitió la operación de secado y enfriado hasta obtener un peso constante.

3.2.1 Voltamperometría cíclica

Se realizaron diferentes experimentos con distintas velocidades y concentraciones de la solución resumidos en la **Tabla 3.1**, aplicando 5 ciclos con una ventana de trabajo de -1 a 2 V.

En primera instancia se realizó una corrida donde se varió la concentración (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm) y se combinó una misma velocidad de barrido (100 mV s^{-1}). El uso de voltamperometría cíclica nos permitió conocer el grado de electroadsorción del Litio en la superficie de carbón, a la vez que a partir de ahí serían construidos los gráficos Capacitancia específica vs diferencia de potencial.

3.2.2 Cronoamperometría

Se hicieron corridas de 500 ciclos con una ventana de trabajo de -1.0 V a 2.0 V con un tiempo de 10 s; cabe mencionar que en las corridas se trabajó con las mismas condiciones y parámetros que se manejan en las electro-sorción. El proceso se realizó con concentraciones de 10 ppm, 50 ppm y 100 ppm variando solamente esta condición (Tabla 3.1).

3.2.3 Cronocoulombimetría

Se trabajó con una ventana de -1.0 V a -2.0 V y -1.0 V a 1.0 V con corridas de 5 y 10 ciclos a un tiempo de 10 s y con una solución de 10 ppm, 50 ppm y 100 ppm; en cada una de las corridas la condición que cambió fue la concentración (Tabla 3.1).

Capítulo 4

Resultados

De acuerdo con la termodinámica del sistema Li-H₂O, como se revisó en los antecedentes, la única especie presente a las condiciones en que se encuentran las soluciones analizadas, por su concentración y pH natural, corresponde a [Li⁺¹].

A continuación, se citan los resultados obtenidos en adsorción, como en electro-sorción mediante las diferentes técnicas electroanalíticas.

4.1 Electro-sorción: Voltametría cíclica

La voltametría cíclica proporcionó curvas en donde se permiten identificar los procesos de oxidación y reducción que ocurren en el electrodo de carbón activado.

4.1.1 Efecto de la concentración a 100mVs^{-1}

A continuación, se reportan los resultados de electro-sorción de 3 distintas concentraciones a una velocidad estándar de 100 mV/s , donde la presencia de picos anódicos y catódicos bien definidos indica la reversibilidad o irreversibilidad de los procesos electroquímicos, **Fig. 4.1**. El efecto de la concentración se compara con soluciones de: 10 ppm , 50 ppm y 100 ppm , lo que permitirá observar la respuesta en corriente y tipo esta (faradáico a o no faradáica) lo que reflejará la influencia de la concentración de Li^+ sobre la capacidad de almacenamiento y la eficiencia del proceso de electro-sorción.

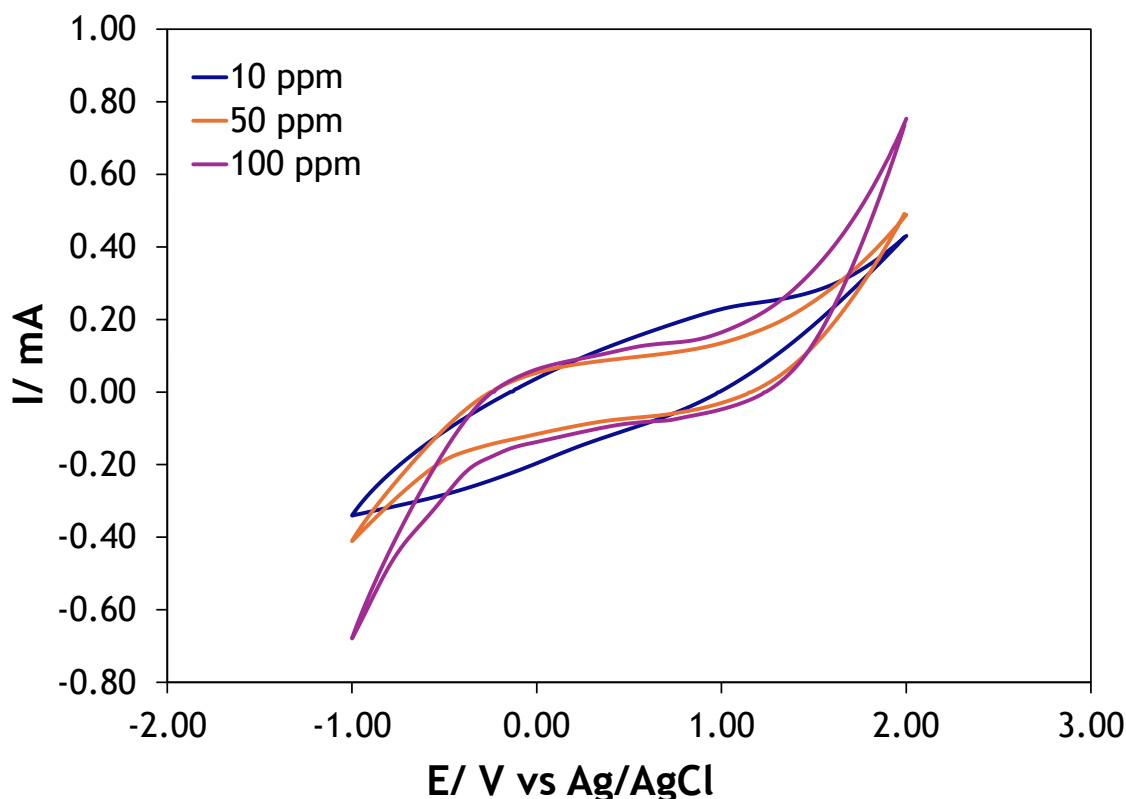


Fig. 4. 1 Voltametría cíclica obtenida de un intervalo de -1V a 2V , $[\text{Li}^+]$: 10ppm , 50ppm , 100ppm .

Como puede observarse en la **Fig. 4.1** se aprecia que existe un mayor rango de corriente no faradaica en la concentración de 10 ppm , por lo tanto, una mayor adsorción en la superficie del electrodo con respecto a las concentraciones de 50 ppm y 100 ppm , siendo así que en la **Fig. 4.2** Capacitancia específica obtenida de una voltametría de un intervalo -1V a 2V , $[\text{Li}^+]$: 10ppm , 50ppm , 100ppm se

nota que en la mínima concentración (10 ppm) se tiene mayor eficiencia en el almacenamiento del ion dentro del carbón activado.

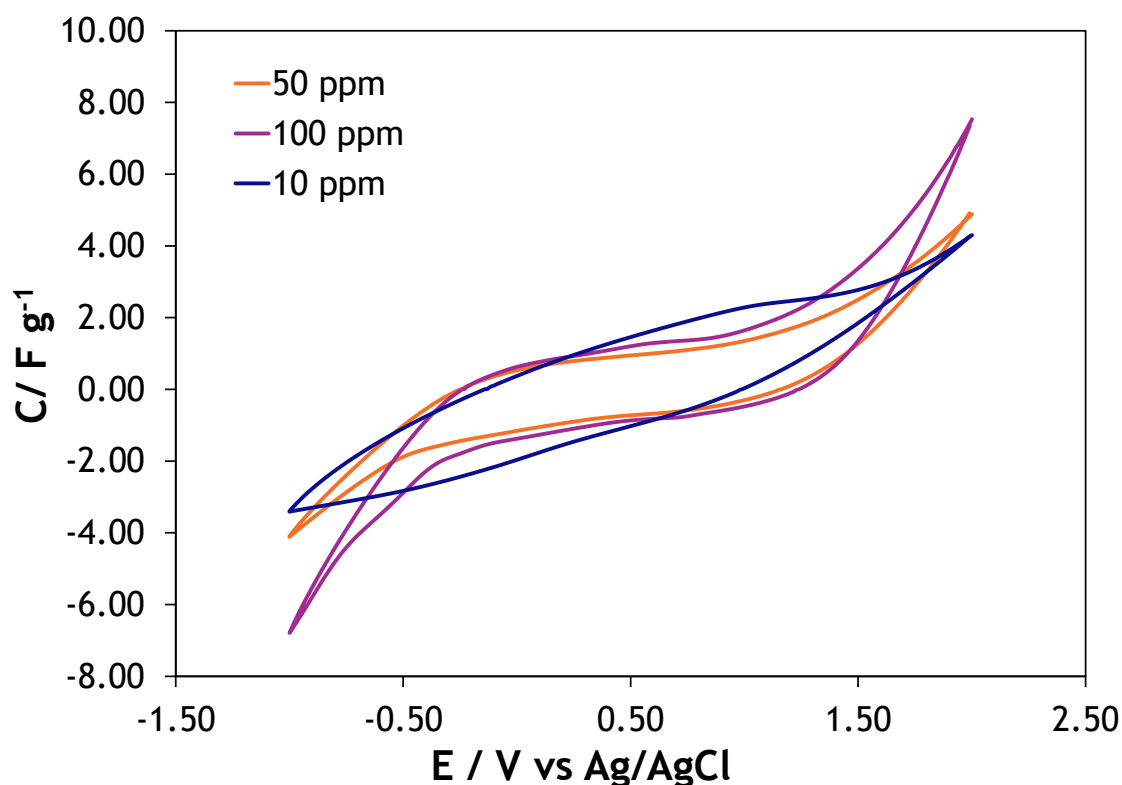


Fig. 4. 2 Capacitancia específica obtenida de voltametría cíclica de un intervalo -1V a 2V, [Li⁺]: 10ppm, 50ppm, 100ppm.

4.1.2 [Li⁺] 10 ppm

Basándose en el mejor comportamiento de electro-sorción para la solución de concentración más baja (10ppm) se experimentó con tres distintas velocidades, para observar el comportamiento del ion [Li⁺] en diferentes velocidades de barrido Fig. 4.3:

- **10 mVs⁻¹:** A baja velocidad de barrido, los procesos de transferencia de carga son más lentos, lo que permite una mejor interacción entre el ion [Li⁺] y la superficie del carbón activado, permitiendo una mayor adsorción y eficiencia en el almacenamiento de [Li⁺]. Además, la simetría habla de una reversibilidad en el proceso de electro-sorción.

- **50 mVs^{-1} :** Al aumentar la velocidad, los picos de corriente tienden a aumentar en intensidad, pero pueden ensancharse o desplazarse, reflejando una mayor influencia de la difusión de los iones y una menor eficiencia de adsorción. Los procesos siguen siendo reversibles, pero la interacción con la superficie del electrodo es ligeramente menor que a 10 mVs^{-1} .
- **100 mVs^{-1} :** Como se observa en los resultados de la **Fig. 4.3** a esta velocidad se identifican claramente los picos anódicos y catódicos, permitiendo comparar la influencia de la concentración de $[\text{Li}^{+1}]$ en la intensidad de corriente y la posición de los picos. La corriente faradaica puede disminuir respecto a velocidades menores, indicando una menor adsorción y eficiencia de almacenamiento.
- **200 mVs^{-1} :** A velocidades más altas, la corriente de pico suele incrementarse debido a la rápida transferencia de carga, pero la reversibilidad de los procesos puede disminuir. Los picos pueden volverse menos definidos y desplazarse a potenciales más altos, lo que indica que la cinética de los procesos está limitada por la velocidad de barrido y la difusión de los iones hacia la superficie del electrodo.

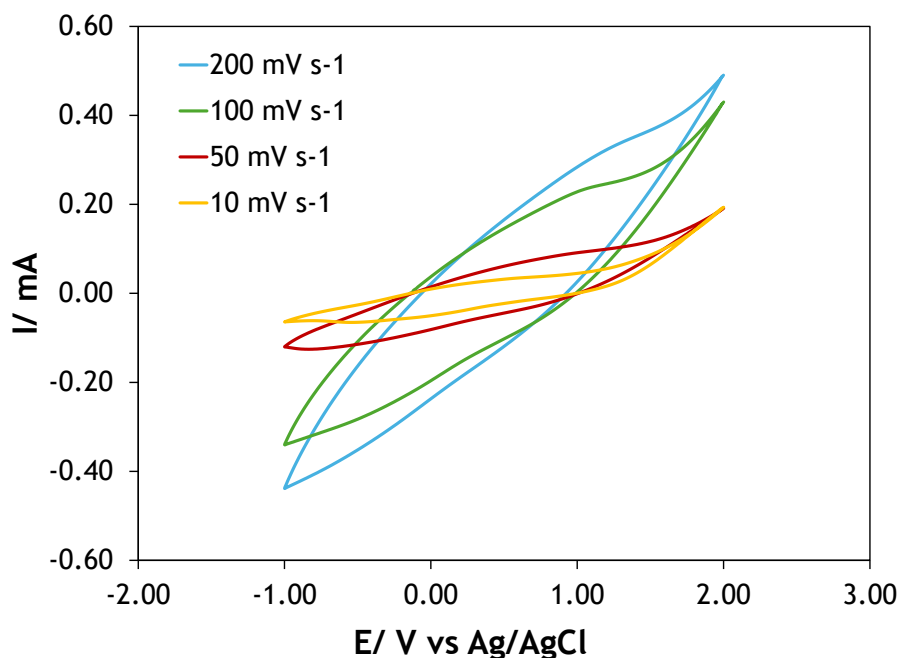


Fig. 4. 3 Voltametría cíclica obtenida de un intervalo -1V a 2V, $[\text{Li}^{+1}]$: 10ppm

A continuación, en la Fig. 4.4 Capacitancia específica obtenida de una voltametría cíclica de un intervalo -1V a 2V, $[\text{Li}^+]$: 10ppm donde la tendencia refleja que, a velocidades bajas, la transferencia de carga es más eficiente y permite una mayor adsorción de $[\text{Li}^+]$ en la superficie del carbón activado, mientras que, a velocidades mayores, la eficiencia de almacenamiento disminuye.

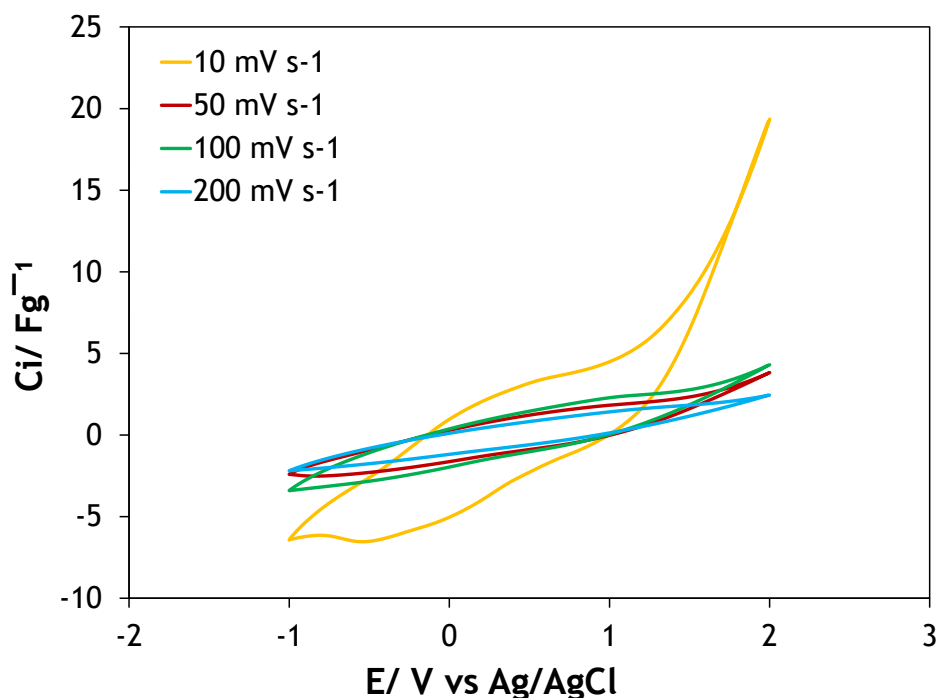


Fig. 4. 4 Capacitancia específica obtenida de una voltametría cíclica de un intervalo -1V a 2V, $[\text{Li}^+]$: 10ppm

4.2 Electro-sorción: Cronoamperometría

La cronoamperometría es una técnica electroquímica utilizada para estudiar la dinámica de adsorción y desorción de iones en la superficie de un electrodo durante la aplicación de un potencial constante.

4.2.1 $[\text{Li}^+]$ 10 ppm

A baja concentración (10 ppm), la cronoamperometría típicamente muestra una corriente inicial relativamente alta, que decae rápidamente conforme los sitios activos del carbón activado se saturan con iones $[\text{Li}^+]$, como se muestra en las Fig. 4.5 y 4.6 que representan 5 y 10 ciclos, respectivamente, siendo así se experimente con 500 ciclos Fig. 4.7 para observar y representar la estabilidad del proceso, indicando una buena reversibilidad y eficiencia de adsorción-desorción.

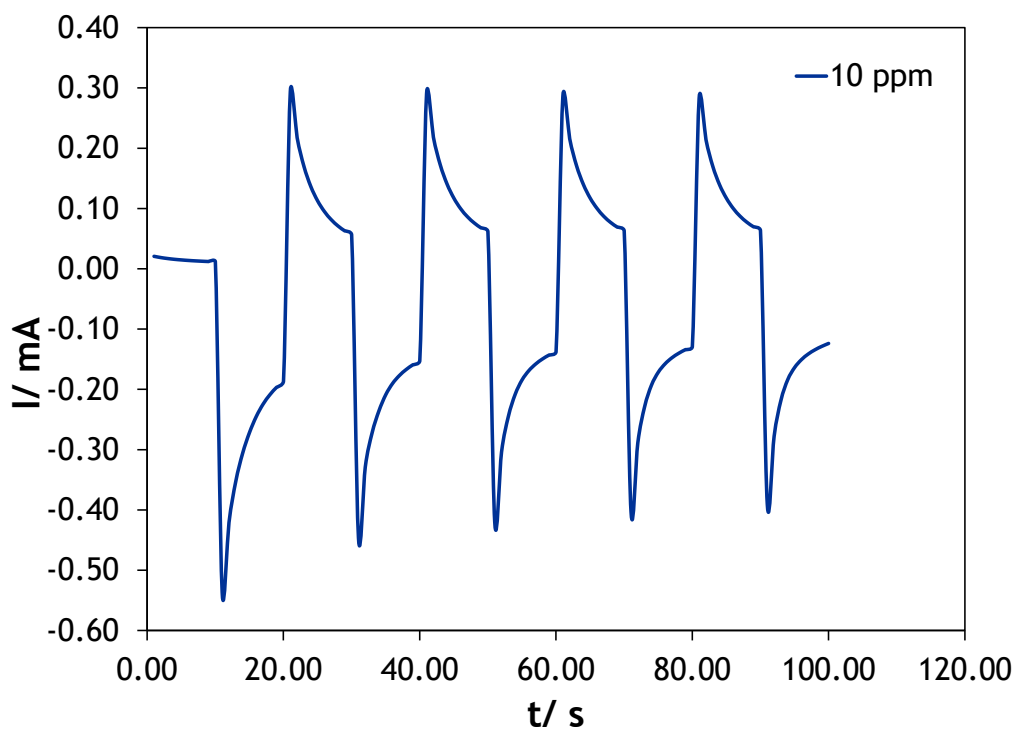


Fig. 4. 5 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 1V, [Li+1]: 10ppm

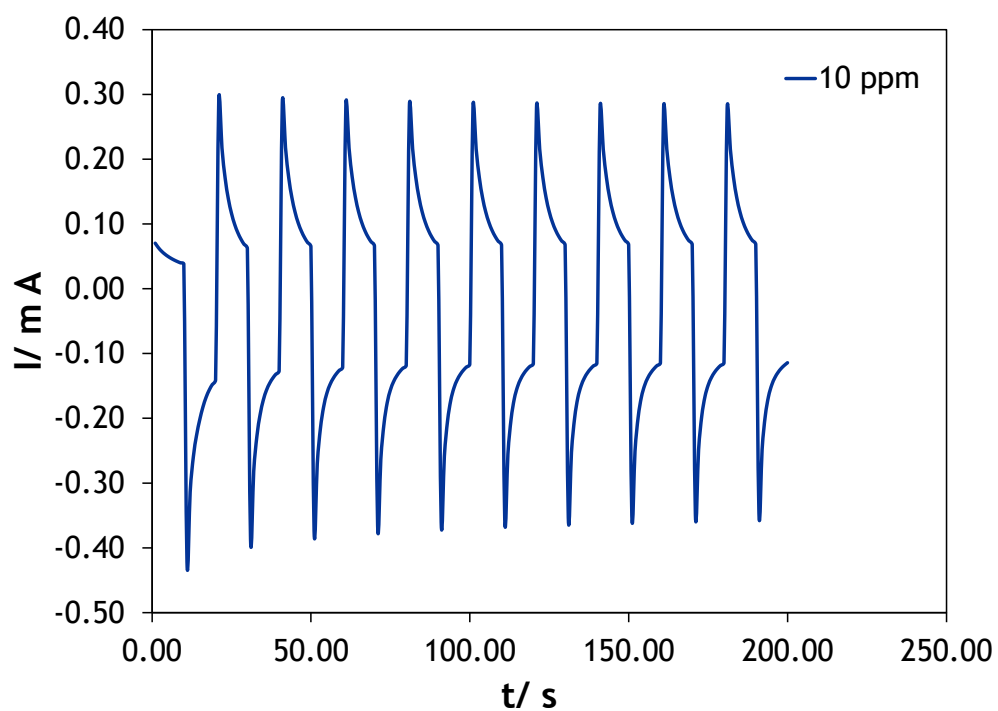


Fig. 4. 6 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 1V, [Li+1]: 10ppm

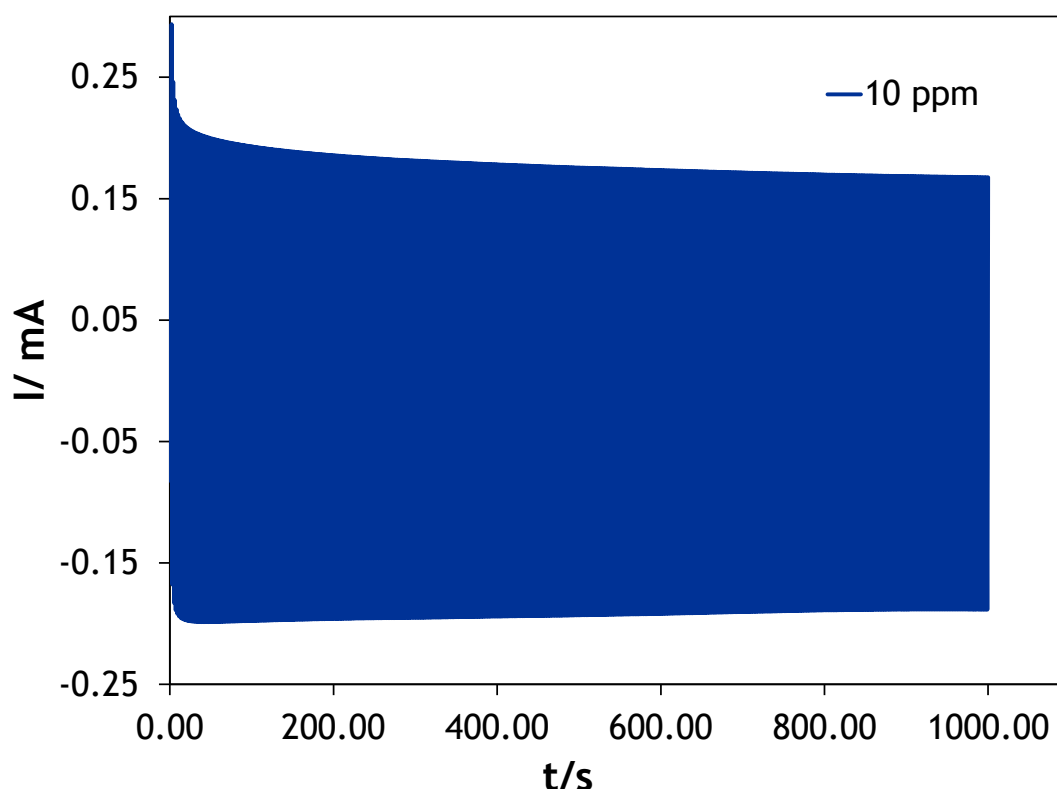


Fig. 4. 7 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 2V, $[Li^{+1}]$: 10ppm

4.2.2 $[Li^{+1}]$ 50 ppm

Al aumentar la concentración a 50 ppm, la corriente inicial en la Fig. 4.8 tiende a ser ligeramente más alta debido a la mayor disponibilidad de iones $[Li^{+1}]$, pero conforme pasa el tiempo, se estabiliza y no muestra ninguna variación durante el tiempo transcurrido.

4.2.3 $[Li^{+1}]$ 100 ppm

A la concentración más alta (100 ppm), en la Fig. 4.9 se muestra una corriente inicial que se mantiene estable durante todo el tiempo transcurrido.

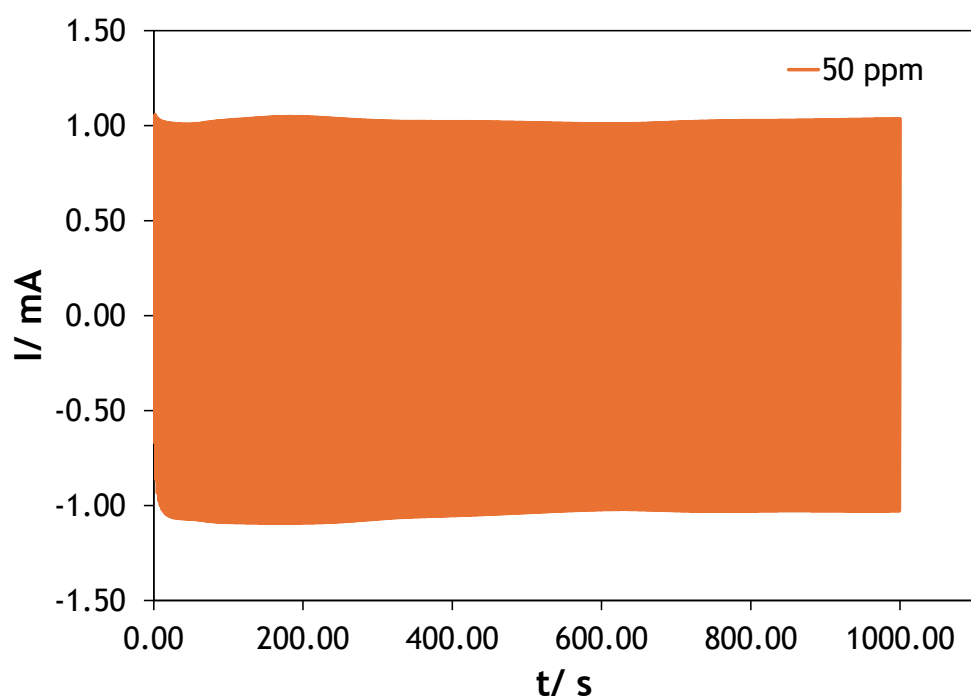


Fig. 4. 8 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 2V, [Li+1]: 10ppm

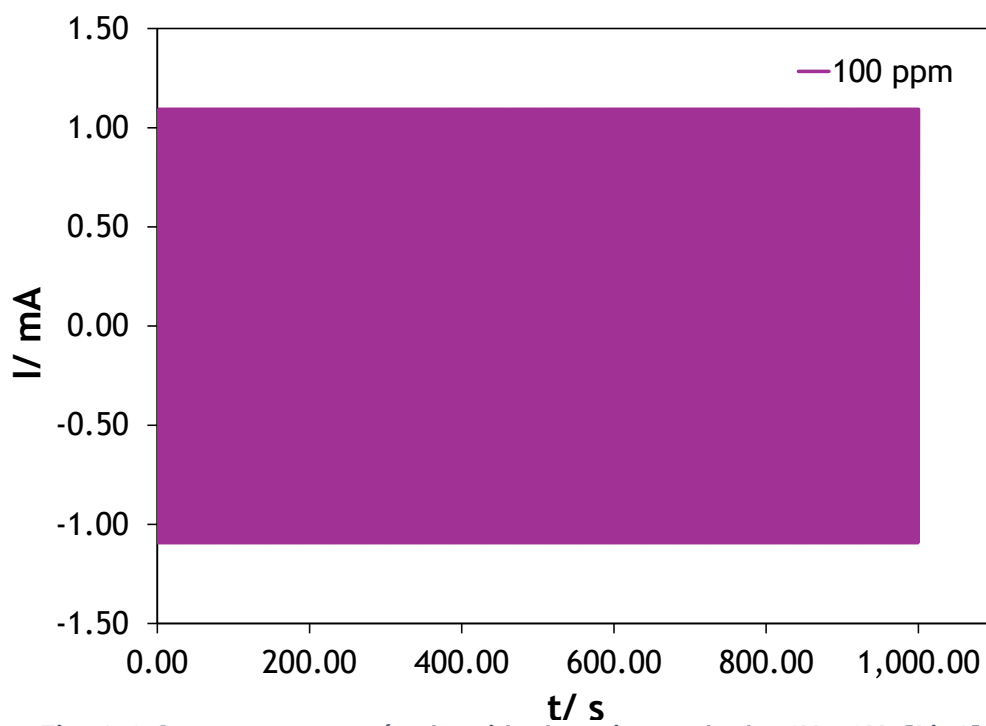


Fig. 4. 9 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 2V, [Li+1]: 100ppm

A continuación, en la **Fig. 4.10** se muestra el comportamiento de cada una de las concentraciones en menor escala y así apreciar la carga-descarga que realiza el ion $[Li^{+1}]$ dentro del sistema.

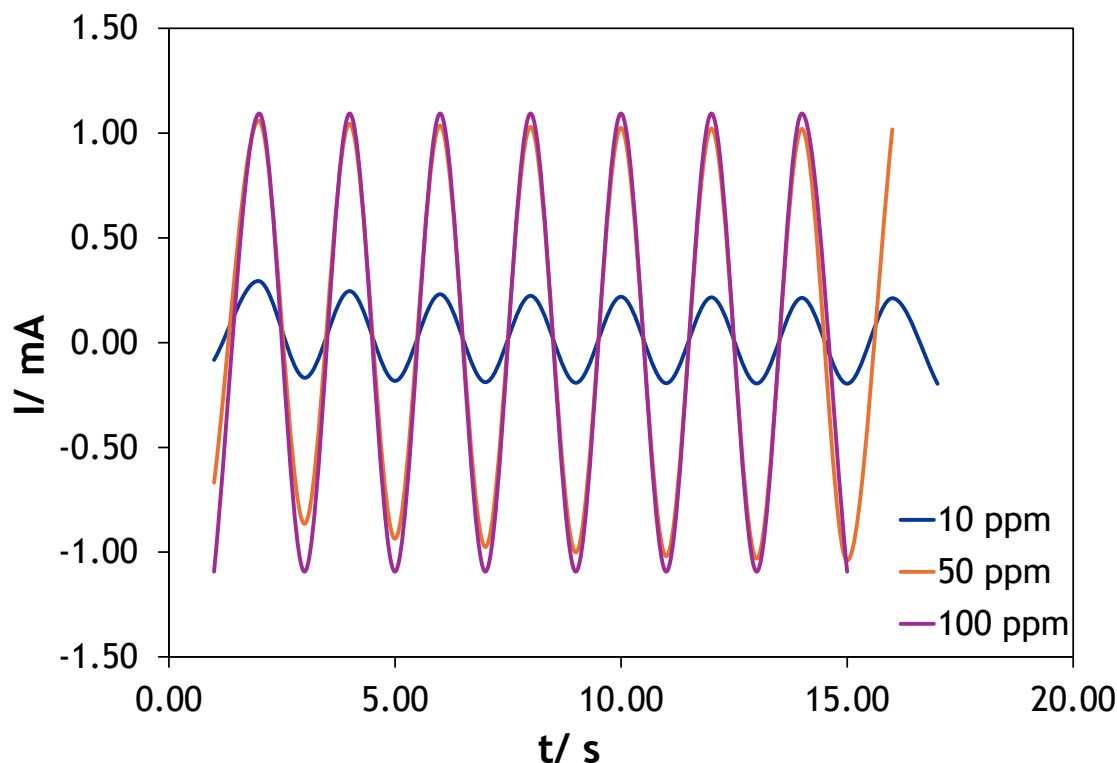


Fig. 4. 10 Cronoamperometría obtenida de un intervalo de -1V a 2V, $[Li^{+1}]$: 10 ppm, 50ppm, 100ppm

4.3 Electro-sorción: Cronocoulombimetría

La cronocoulombimetría muestra la relación que existe entre el potencial aplicado dentro de un rango de tiempo, lo que permite conocer la cantidad de carga electrónicamente disponible para considerar que tiene se tiene cargas capacitivas dentro del sistema.

4.4.1 $[Li^{+1}]$ 10 ppm

En la **Fig. 4.11 Cronocoulombimetría obtenida de un intervalo de 0.5V a 1.5V, $[Li^{+1}]$: 10 ppm** muestra que conforme aumenta el tiempo dentro la ventana de potencial aplicado, la cantidad de carga va incrementando hasta completar los 10 ciclos aplicados en la corrida del sistema.

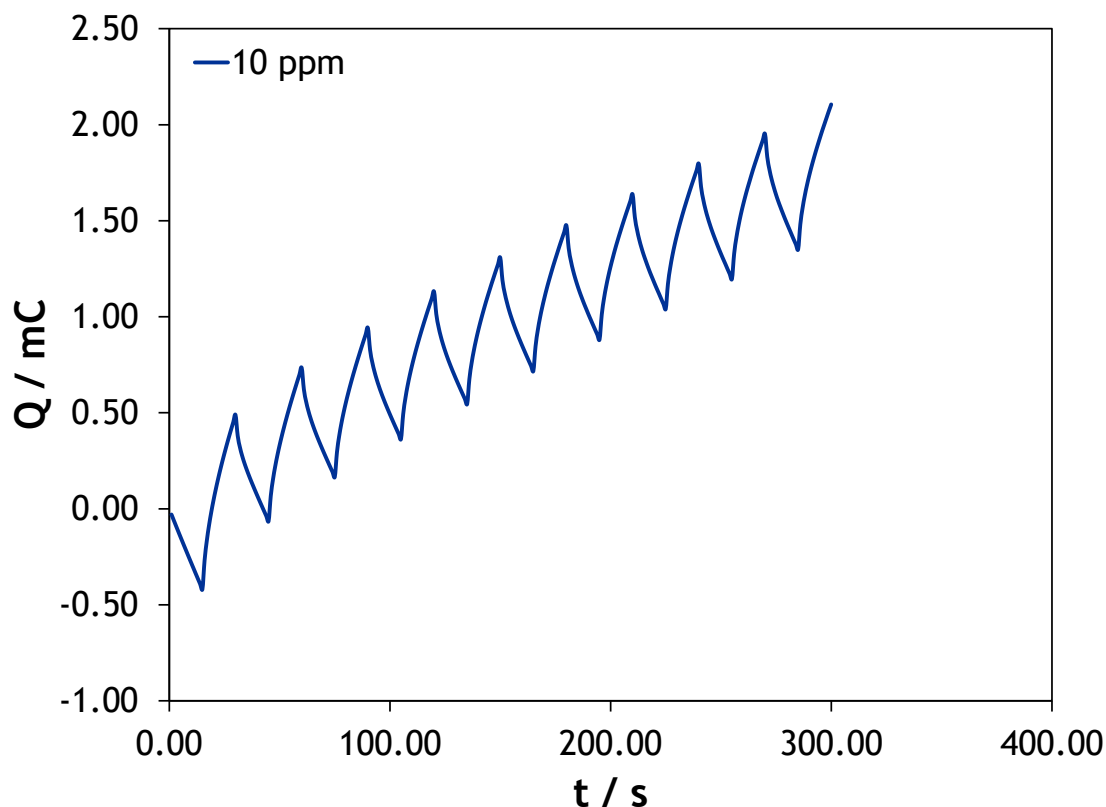


Fig. 4. 11 Cronocoulombimetría obtenida de un intervalo de 0.5V a 1.5V, [Li+1]: 10 ppm

4.4.2 [Li⁺] 50 ppm

La solución de LiCl al 50 ppm (Fig. 4.12) muestra que, con el incremento de concentración, se aumenta la cantidad de carga almacenada dentro de carbón activado en un lapso menor de tiempo en comparación con la menor concentración 10 ppm.

4.4.3 [Li⁺] 100 ppm

Con la concentración más alta (100 ppm) se observa en la Fig. 4.13 que la carga almacenada es mayor conforme aumenta el tiempo y a su vez retiene por un lapso más largo los iones de Litio, es decir, la especie electroactiva.

El incremento de la carga capacitiva se observa en la Fig. 4.14 donde se denota que a mayor concentración (100 ppm) el sistema tiene una mejor respuesta en cuenta a la electro-sorción de los iones en comparación menores concentraciones.

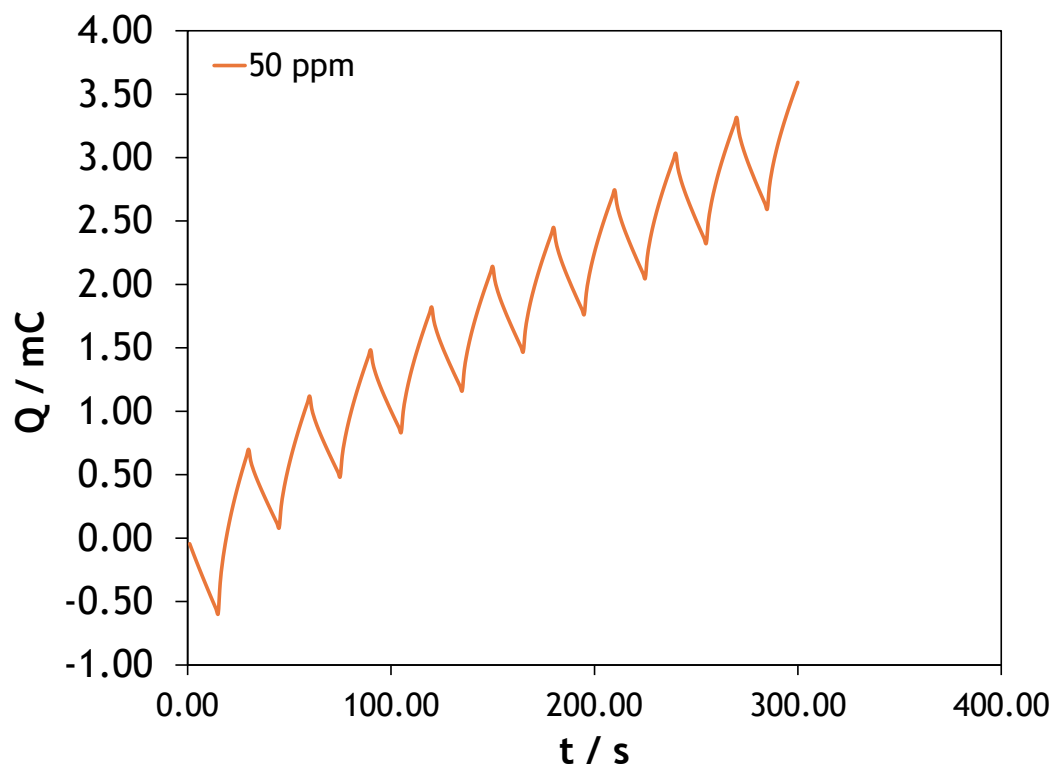


Fig. 4. 12 Cronocoulombimetría obtenida de un intervalo de 0.5V a 1.5V, [Li+1]: 50 ppm

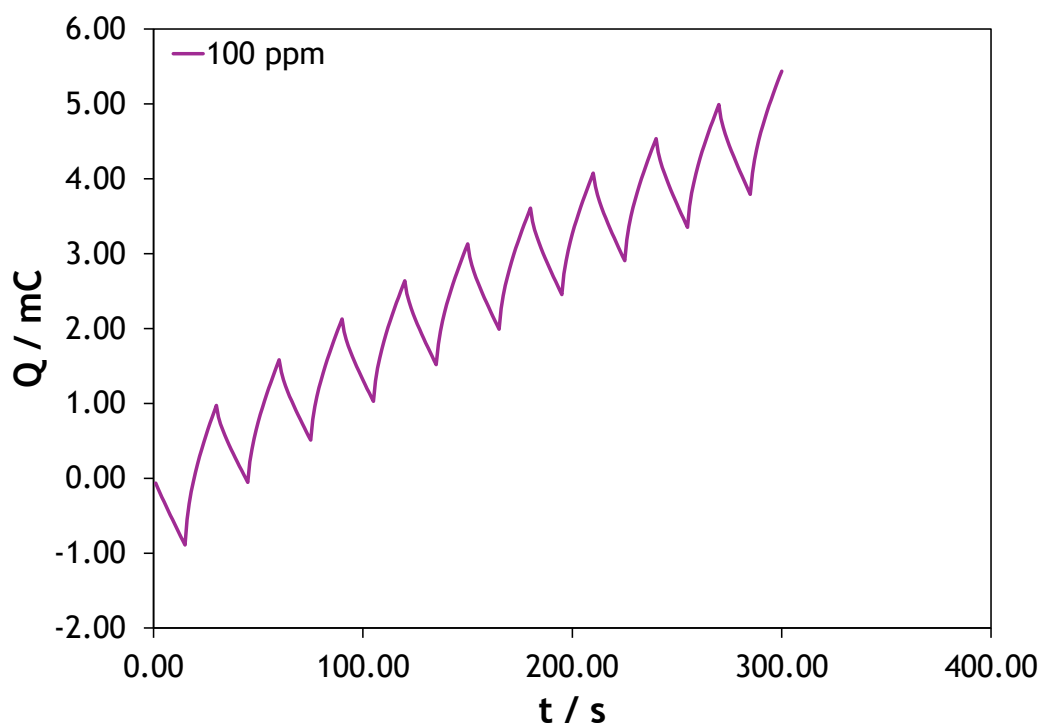


Fig. 4. 13 Cronocoulombimetría obtenida de un intervalo de 0.5V a 1.5V, [Li+1]: 100 ppm

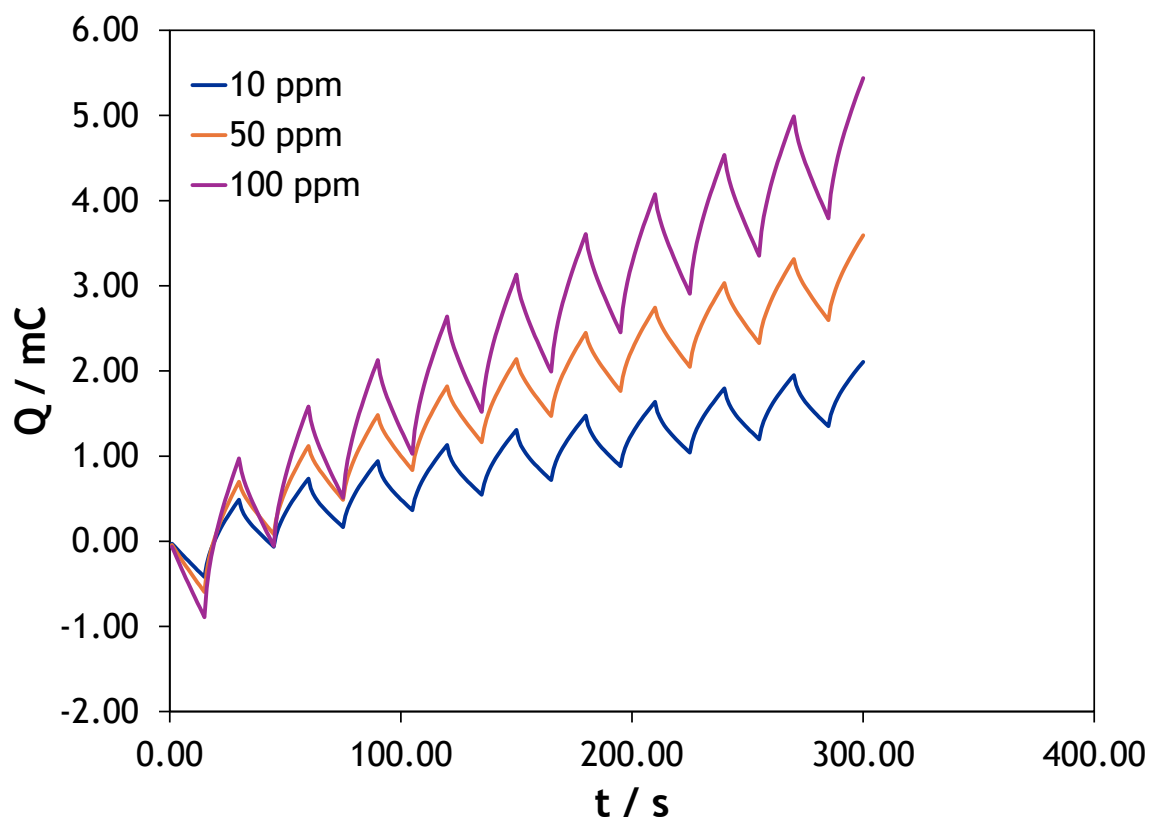


Fig. 4. 14 Cronocoulombimetría obtenida de un intervalo de 0.5V a 1.5V, [Li+1]: 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm

Conclusiones

El LiCl necesita que se le aplique un mínimo de potencial (2V máx.) para que sea realice una electro-sorción eficiente en el carbón activado de cáscara de coco orgánico, siendo que a menor concentración (10 ppm) se tiene un mayor potencial de carga capacitiva que es de 1.5V a diferencia de la mayor concentración (100ppm) que es de 0.5V y con un mínimo de intensidad que varía de -0.5 mA a 1.5 mA y -0.2 mA a 1.2 mA, respectivamente.

Por otro lado, todas las soluciones (10 ppm, 50 ppm y 100 ppm) muestran una respuesta estable de carga-descarga en donde se concluye que conforme aumenta el tiempo 0 s a 1000 s (16.67 min), este proceso se estabiliza y se realiza un proceso de sorción que va en mínimo de aumento (-1 mA a 1 mA) entre el ion y el carbón activado.

Existe una diferencia entre la concentración menor (10 ppm) y mayor (100 ppm) que se denota en las cargas faradaicas y capacitivas de cada concentración. Es decir, mientras que a menor concentración y velocidad se tiene una mejor capacidad faradaica que capacitiva, en tanto a mayor concentración se tiene una mejor carga capacitiva que es de 5.44 mC a comparación de 2.1 mC de la solución de 10 ppm como se denota en la **Fig. 4.14**.

Estos datos son una primicia para el diseño de una celda electroquímica donde el carbón activado pueda electro-absorber la especie electroactiva, sabiendo que este tiene la capacidad capacitiva y faradaica para utilizarlo para concentrar y remover diferentes especies en los efluentes a tratar.

La capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de coco orgánico demuestra ser eficiente para la electro-sorción de iones de Litio, especialmente a una alta concentración (100 ppm), donde se observa una mayor retención y almacenamiento de carga durante un prolongado tiempo. Esto indica que el material no solo es capaz de captar los iones de manera efectiva debido a la elevada cantidad de poros existentes en éste, sino que también mantiene una respuesta estable de carga-descarga en diferentes condiciones de concentración y potencial (**Fig. 4.2 y Fig. 4.4**) aplicado ya que propicia la formación de la doble capa eléctrica (EDL) necesaria para la contención de los iones existentes en el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- Baizán, P. D. (26 de Julio de 2012). *Materiales de carbono para desalinización de aguas mediante desionización capacitiva*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo : <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/4125>
- Bard, A. J., & Faulkner, L. (2001). *Electrochemical Methods Fundamentals and Applications* . JOHN WILEY & SONS, INC. .
- Beltran, J., & Núñez, J. (1988). *Física y Química 2* . Anaya .
- Bott, A. W., & Heineman, W. (2004). Chronocoulometry. *Bioanalytical Systems, Inc.* , 121-126.
- Calvo, E. (2017). Litio. Un recurso natural estrategico. En E. Calvo, *litio en Baterías* (págs. 145-161). Buenos Aires: Academia Nacional de Ciencia Exactas y Naturales.
- Calvo, E. J. (2020). Nuevos métodos de extracción directa de litio Impacto en la explotación sustentable de los salares de la puna. *Ciencia Hoy* , 51-59.
- Carriazo, J. G., Saavedra, M., & Molina, M. (2010). Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. *CÓMO SE EXPERIMENTA*, 224-229.
- Eyzaguirre, A. G., Donoso Rojas, F., & Garay Lucero , V. (2023). *El mercado de Litio- Desarrollo reciente y proyecciones al 2035*. Chile : Comisión Chilena del Cobre.
- Flores, E. (1995). Voltametría cíclica: La espectroscopia electroquímica Parte I. *Revista de Química* , 55-64.
- Gállego, C. M. (2016). *Aerogeles de carbono y compuestos funcionales híbridos con propiedades adecuadas para electrodos en desionización capacitiva*. Córdoba : UCOPress.
- García, Ó. C. (2015). *Desarrollo y Aplicación de Sensores Poliméricos con Nanopartículas de Oro para la Detección de Antioxidantes en la Industria de la Alimentación*. Valladolid : Universidad de Valladolid .
- Hou, C.-H., & Huang, C.-Y. (2013). A comparative study of electrosorption selectivity of ions by activated carbon electrodes in capacitive deionization. *Desalination* , 124-129.

- IEA. (2023). *World Energy Investment 2023*. Paris .
- Isiordia, E. G. (2013). Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. *SciELO Analytics*, 27-46.
- Japan, G. S. (Mayo de 2005). *Research Center for Deep Geolofical Environmets*. Obtenido de Atlas of Eh-pH diagraas : https://www.eosremediation.com/download/chemistry/chemical%20properties/eh_ph_diagrams.pdf
- López, J. R. (2004). *Aplicación de técnicas In Situ (Cronocoulombimetría y AFM) para el estudio de los procesos de adsorción de moléculas orgánicas y procesos de electrodeposición* . Queretaro : Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica .
- Marín, A., García , A., de Santiago , A., & Baeza, A. (2014). Diseño, construcción y caracterización de titulaciones microcoulombimétricas ácido-base con monitoreo visual y micropotencimétrico: Aproximación metrológica . *Revista Cubana de Química* , 126-136.
- Park, K.-H., & Kwak, D.-H. (2014). Electrosorption and electrochemical properties of activated-carbon sheet electrode for capacitive deionization. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 66-73.
- Rábago, S. (agosto de 2017). *Repositorio CINVESTAV*. Obtenido de Sistema portátil y reconfigurable para análisis voltamperométrico cíclico: <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/2685/SSITO014864.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Santos, C. S. (2017). *Estudio de la Desionización Capacitiva para el Tratamiento de Aguas Salobres: Evaluación de Prestaciones y Eficiencia Energética*. Madrid: Universidad Autonoma de Madrid.
- Schaller, C. (14 de marzo de 2024). 1.11: *Voltamperometría cíclica*. Obtenido de LibreTexts: <https://espanol.libretexts.org/@go/page/79209>
- Tabti, Z. (2014). *Electroadsorción de plomo sobre carbones activados en diferentes conformaciones: modificación de la química superficial por métodos electroquímicos* . Alicante : Universidad de Alicante.
- Velásquez, C. L., Koteich Khatib, S., & López González, F. (2015). *Nanopartículas: Fundamentos y Aplicaciones*. Mérida, Venezuela: Comision de Publicaiones del Departamento de Química .

UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



La División de Ingenierías del Campus Guanajuato
de la Universidad de Guanajuato

otorga la presente

CONSTANCIA

a

**Michell Valentina López Rojas, Edna Thalía Jasso Olmedo, Martín Caudillo
Gonzalez, Lucía Alvarado Montalvo**

Por su participación con el Poster titulado:

"Electrosorción de iones metálicos sobre carbón activado"

En el marco de la 3ra-Semana de Ingenierías de la División de Ingenierías, Campus Guanajuato, llevada a cabo del 5 al 9 de octubre de 2022

Dr. Gilberto Carreño Aguilera
Director de la División de Ingenierías del Campus Guanajuato

Dra. Argodi Bernal Martínez
Secretaría Académica de la División de Ingenierías
Del Campus Guanajuato

ANEXO



La AIMMGM otorga la presente

CONSTANCIA

M. V López Rojas, L. R. Araujo Ramos, E. T. Jasso Olmedo, M. Caudillo
a: González, J. C. Baltazar, Vera, G. Rodríguez Vázquez y L. G. Alvarado
Montalvo

Por la Participación del Cartel / Póster

Electrosorción de iones de litio mediante carbón activado de cascara de coco



Programada en XXXV Convención Internacional de Minería.

L. H. Vázquez

Ing. Luis Humberto Vázquez San Miguel
Presidente del CDN de la AIMMGM

J. R. Moreno

Ing. Jesús Ricardo Moreno Trousselle
**Coordinador General de la XXXV
Convención Internacional de Minería**

Acapulco Guerrero, México **23 AL 27 DE OCTUBRE 2023**



Wrocław University of Science and Technology

Department of Process Engineering and Technology of Polymer and Carbon Materials

Wrocław, 30.05.2025

Sławomir Porada, Associate Professor
Department of Process Engineering and Technology of Polymer and Carbon Materials
Wrocław University of Science and Technology
Wyb. Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław, Poland
e-mails: sławomir.porada@pwr.edu.pl
phone numbers: +48 660 464 904

University of Guanajuato, Engineering
Division, Campus Guanajuato, México.

To Whom It May Concern,

As the Conference Chair of the 7th International Conference on Electrochemical and Membrane Separations – Science and Technology, I hereby certify that Prof. Lucia Alvarado presented a poster entitled: "Evaluation of Lithium Ion Electrosorption on Activated Carbon Surface."

The co-Authors of this work are:

L. R. Araujo-Ramos a , M. V. López-Rojas, M. Caudillo-González, J. C. Baltazar-Vera,
M. M. Salazar.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Wrocław University
of Science and Technology
Faculty of Chemistry
Department of Process Engineering
and Technology of Polymer and
Carbon Materials (025W13D05)

Correspondence address:
Wybór Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław, Poland

Location:
Główna 7/9 st.
50-344 Wrocław, Poland

www.ptm.pwr.edu.pl

T: +48 71 320 6150
fax: +48 71 320 6506

REGON: 000005614
NIP: 000-000-58-51
Bank Zachodni WBK S.A.
17 1010 2402 0000 0006 1000 0434

Best regards,

Sławomir Porada

Conference Chair