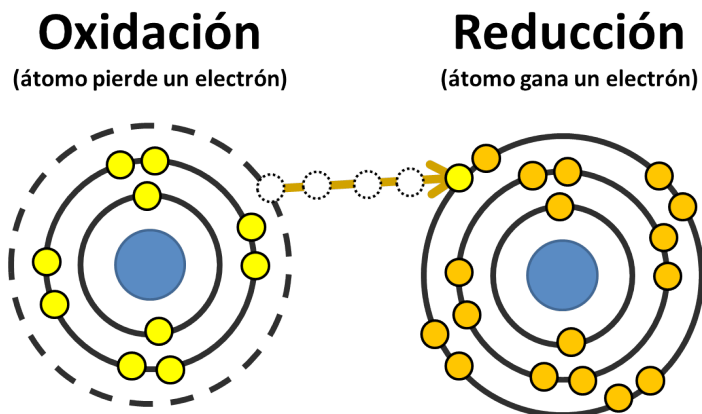


EL VAIVÉN DE LOS ELECTRONES

Jorge G. Ibáñez-Cornejo



Una gran parte de las reacciones químicas involucra el intercambio de partículas, principalmente de protones, electrones y ligantes. En el presente trabajo, titulado con referencia a la frase de la canción popular mexicana titulada En el mar (“...y al vivén de las olas tranquilas los peces de colores nos lleven a pasear”), enfatizaremos la presentación de experimentos que hemos desarrollado sobre el tema. Incluiremos también algunas otras estrategias didácticas para la mejor comprensión por parte de los estudiantes de fenómenos con intercambio de electrones que se lleven a cabo o no sobre una interfase electrificada. Por conveniencia, estos ejemplos se clasificarán en los siguientes rubros:

1. Remoción, recuperación, detoxificación, y mineralización de contaminantes
2. Aprovechamiento, conversión, emisión y absorción de luz
3. Producción de desactivadores alternos de microorganismos
4. El uso más seguro de algunas sustancias y técnicas químicas

En primer lugar, es importante ayudar a que los estudiantes clarifiquen una situación de nomenclatura: el ánodo en una celda electroquímica —ya sea galvánica o electrolítica— es el electrodo en donde ocurre una oxidación mientras que el cátodo es donde ocurre la reducción. Una manera de enseñar

esta mnemotecnica bautizada por mí hace cerca de 30 años como la “regla de la rana” (es decir, la rana CROA: en el Cátodo ocurre la Reducción, mientras que la Oxidación ocurre en el Ánodo) consiste en hacer una especie de “prueba oral” preguntando cómo se llaman los sonidos emitidos o la voz de diferentes animales, para lo cual es excelente el pequeño poema de Unamuno llamado “La ronda de los animales” (*Cuenta la Luna*, 2012). Para mi sorpresa, la mayoría de los estudiantes desconocen casi todos los nombres, y aquí hay que aprovechar para introducir la idea de CROA.

A continuación se describen de una manera general varios experimentos que hemos desarrollado, de tal modo que si el lector está interesado en las condiciones específicas de cada uno puede consultar las referencias anotadas. La mayoría se pueden llevar a cabo en sesiones de laboratorio de 2-3 horas y la mayoría de las que son electroquímicas se pueden llevar a cabo con una pila de 9 V o con un convertidor sencillo de AC a DC.

I. Remoción, recuperación, detoxificación, y mineralización de contaminantes

Muchos contaminantes pueden convertirse en especies menos peligrosas mediante la transferencia de electrones, la cual puede llevarse a cabo o no sobre una interfase electrificada (electrodo), ser directa o indirecta, consistir en una oxidación o reducción, usarse para tratar líquidos, gases, suelos, etc. (Ibáñez, 2013; Rajeshwar, 1997). Las técnicas electroquímicas ofrecen ventajas en casos específicos en relación con otras tecnologías para esquemas diferentes de remediación ambiental, incluyendo compatibilidad ambiental, versatilidad, eficiencia energética, selectividad, proclividad a la automatización y rentabilidad (Ibáñez, 2014; Frontana, 2010; Rajeshwar, 1994; Ibáñez, 2004a). Hemos desarrollado una serie de experimentos de laboratorio destinados a demostrar algunas de las aplicaciones de técnicas electroquímicas en la remediación de desechos peligrosos, el tratamiento de líquidos coloreados, los

suelos contaminados, las emisiones de gases contaminantes y la producción electroquímica de oxidantes-desinfectantes. Las principales estrategias electroquímicas discutidas en el presente documento y utilizadas para esta remediación ambiental implican las siguientes opciones.

Electrólisis directa: estos procesos están limitados a menudo por la difusión, y si se desean altas eficiencias deben usarse bajas densidades de corriente. Además, los altos sobrepotenciales requeridos suelen necesitar de metales nobles u otros materiales de electrodo costosos de operar.

Electrólisis indirecta: para superar estas dificultades, se han diseñado procesos redox mediados que son homogéneos o heterogéneos, catódicos o anódicos, y que generalmente se pueden llevar a cabo a temperaturas y presiones ambiente. La idea es utilizar un reactivo redox generado por vía electroquímica para convertir a los contaminantes en productos menos dañinos. Este reactivo redox actúa entonces como un intermediario para realizar trayectos de electrones entre el contaminante de destino y el electrodo. Estos procesos indirectos pueden realizarse: a) reversiblemente (donde el mediador puede actuar como catalizador), y b) irreversiblemente.

Electrocoagulación: como un ejemplo de experimento para ilustrar dichos procesos, se puede llevar a cabo la electrocoagulación de una solución de algún tinte o colorante en un vasito de precipitados con dos clips metálicos para papel insertos en la pared del vasito, uno enfrente del otro a manera de electrodos. Al aplicar un potencial con una pila de 9 V o con un convertidor de corriente, se generan especies catiónicas de hierro polivalente en una solución de electrolito inerte (por ejemplo Na_2SO_4) que al encontrar a los OH^- producidos en el cátodo, generan un gel tridimensional de oxi-hidróxidos de Fe que es capaz de adsorber contaminantes. Si se desea un efecto de alternancia de colores (al cual le hemos llamado el “semáforo electroquímico” por cambiar de rojo a verde), se pueden añadir los indicadores rojo de metilo y verde de bromocresol. Se ajusta el pH de la solución resultante (a 3 o 4) con H_2SO_4 diluido, con lo cual queda de color rojo, y

se conectan los electrodos a la fuente de voltaje. Si ahora se agita repentinamente y vigorosamente con una barrita magnética, la solución se vuelve verde. Si se deja de agitar, la solución vuelve a ponerse roja otra vez; si se agita de nuevo, se convierte en verde. (Santoyo, 2006). Se puede repetir el ciclo a voluntad hasta que la solución se haga parduzca como consecuencia de la disolución del ánodo (que forma especies de Fe (II y III), y la producción de OH^- en el cátodo. Al suspender el experimento, se puede filtrar la mezcla de reacción con un filtro finísimo (por ejemplo, una membrana Millipore de 0.45 micras), ajustar el pH al valor inicial y comparar los colores antes y después de la electrocoagulación. La solución tratada debe ser mucho más transparente que la inicial (Ibanez, 2015; Ibanez, 1995; Ibanez, 1998a).

Oxidación indirecta de un contaminante orgánico: para demostrar la oxidación indirecta de un contaminante orgánico se puede usar el sistema Co(II)/Co(III). En un vasito de precipitados se prepara una solución de CoSO_4 en H_2SO_4 diluido. Si se añade un poco de contaminante orgánico (por ejemplo, glicerina) y se introduce una barrita de grafito (como cátodo) y una barrita de Pb (como ánodo), se tiene una celda con un sistema mediado. Al colocarla en un baño de agua a 40-50°C y conectar los electrodos a la fuente de poder se empieza a producir Co(III) en el ánodo, el cual es capaz de oxidar a la glicerina en la solución. Se puede dejar a la electrólisis proceder hasta que la solución de Co(II) —que inicialmente es rosa— se vuelva gris azulada, color característico del Co(III). Esto señala el final de la oxidación del compuesto orgánico. Si se desea un efecto dramático, a la solución resultante de Co(III) se le puede añadir una gota de glicerina pura con lo que el Co(III) pasa a Co(II) y la solución regresa a su color rosa (Ibanez, 1997). Si además se desea demostrar la producción de CO_2 debida a esta oxidación, se puede hacer el mismo procedimiento, pero usando una pipeta Beral (o pipeta de transferencia de plástico) en vez del vasito como celda electroquímica. Se introducen los electrodos a través de las paredes de plástico, y el vástago de la pipeta se introduce en una solución saturada de cal (es decir, CaO) para recoger cualquier CO_2 producido, formando CaCO_3 insoluble.

Electrorremediación: cuando hay suelos contaminados con iones metálicos (o incluso con otros contaminantes) se puede llevar a cabo la aplicación de campos eléctricos para lograr lo que se llama *remediación electrocinética de suelos*. Los principales fenómenos que pueden estar involucrados aquí incluyen la electroósmosis, electroforesis y electromigración. Para ello, se colocan estratégicamente cátodos y ánodos enterrados en el suelo y se aplica un campo eléctrico de una fuente DC. La técnica también se llama *electrorreclamación*, *limpieza electroosmótica*, *electrorremediación*, *electrorrestauración* o *procesamiento electrocinético*. Aquí se puede realizar una serie de experimentos sencillos para demostrar: a) la migración de iones; b) la creación de un frente ácido y uno básico, y c) el secado de suelo por electroósmosis (Ibanez, 2015; Ibanez, 2007; Ibanez, 1998b). Si se desea utilizar una cantidad muy pequeña de reactivos, se pueden llevar a cabo estos tres fenómenos en portaobjetos de microscopio. Se hace una pasta mezclando las especies objetivo con caolín (como simulador de suelo) y con una pequeña cantidad de una solución diluida de Na_2SO_4 como electrolito. Se pueden usar alambres de platino, de acero inoxidable o incluso simples clips metálicos para papel. Se añaden indicadores como se especifica a continuación, y se hace un “sándwich” con dos portaobjetos y una pequeña cantidad de pasta en medio y los electrodos acostados sobre una de ellas. Se aplica un potencial con una fuente de alimentación (por ejemplo, 9-12 V). Indicadores: a) para observar la electromigración: se mezclan una solución diluida de CuSO_4 y otra de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ con caolín puro y un poco de la solución de Na_2SO_4 . Al aplicar el potencial a la pasta verde, los iones azules de cobre empiezan a migrar hacia el cátodo y los iones amarillos de dicromato hacia el ánodo. PRECAUCIÓN: debido a la toxicidad del dicromato, esta parte debe ser realizada como una demostración por parte del instructor, usando guantes protectores; b) para observar la creación de un frente ácido y uno básico, se añaden al caolín puro unas gotas de indicador rojo de metilo con indicador de azul de bromotimol, así como unas gotas de la solución de Na_2SO_4 . Al conectar a la fuente

de voltaje, la creación y movimiento de un frente ácido y de un frente básico deberán ser obvios en pocos minutos; c) para observar el secado de un suelo por electroósmosis, a un poco de caolín puro se le añaden unas gotas de indicador fenolftaleína y un poco de la solución de Na_2SO_4 . Al conectar los electrodos a la fuente, el indicador hace evidente la generación de base alrededor del cátodo y el flujo electroosmótico de agua desde el ánodo hacia el cátodo, que se observa como un aumento de humedad en el lado catódico y la resequeidad generada en las inmediaciones del ánodo.

Remediación de gases: para simular el tratamiento electroquímico de corrientes gaseosas conteniendo H_2S , se preparan unos mililitros de este gas en una jeringa con el método de Mattson (Mattson, 2005) adaptado por nosotros. Este procedimiento consiste armar el sistema de jeringas mostrado en la Figura 1. Entonces, se agrega HCl de la jeringa 1 a través de una válvula de tres vías a la jeringa 2 que contiene a un sulfuro metálico (por ejemplo, ZnS), cuyo pistón se deslizará hacia fuera conforme el gas se produce dentro. Cuando ya cesa de moverse el pistón, se transvasa el H_2S a una jeringa vacía y limpia (jeringa 3) para enviarlo posteriormente a la jeringa 4 que contiene una solución de KI, I_2 y HCl diluidos. Esto produce un cambio de color, de un café-morado (típico del yodo en forma de triyoduro) a un amarillo lechoso (ocasionado por el azufre elemental que se produce). Cuando la solución ya esté blanca-amarillenta, se pasa por el filtro 5 hasta la jeringa 6 que tiene conectadas dos agujas tapadas (para impedir el escape de gases) y que servirá como celda electroquímica. Se conectan entonces dos caimanes a una pila de 9 V y a las agujas para llevar a cabo una electrólisis, lo cual oxida a los iones yoduro procedentes de la oxidación del ion sulfuro, hasta un cambio de color en la solución a café-marrón oscuro. Esto señala la regeneración del yodo en el ánodo, mientras que se libera hidrógeno en el cátodo. Esta solución está lista para recibir más H_2S y reiniciar el ciclo completo. El resultado final es que un gas venenoso se convierte en sus dos elementos constitutivos en alta pureza.

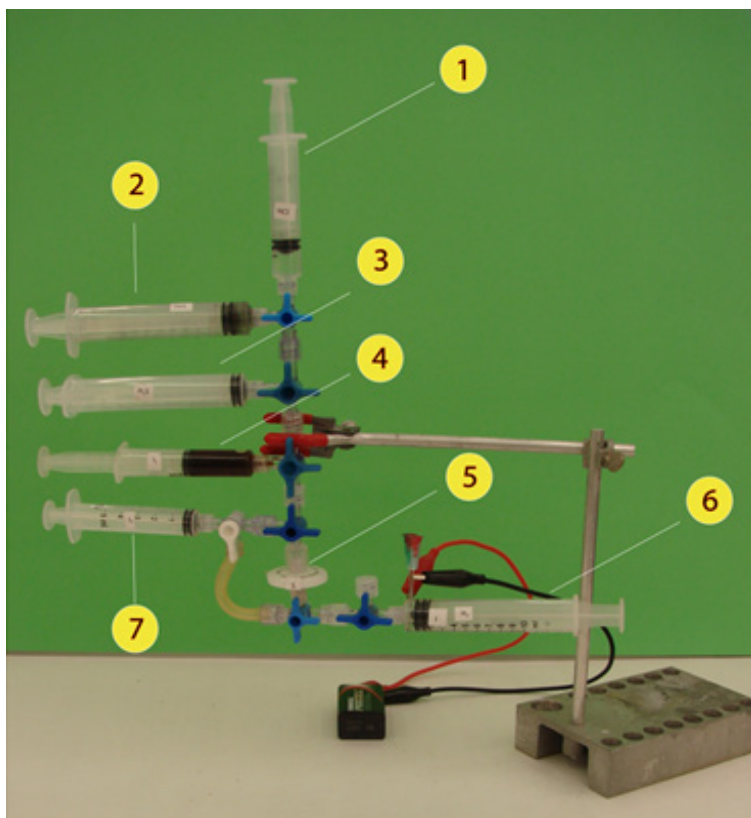


Figura 1. Sistema electroquímico cerrado para la remediación de H_2S .

2. Aprovechamiento, conversión, emisión y absorción de luz

Remoción fotocatalítica de contaminantes: la luz con energía mayor a la de la banda prohibida de partículas semiconductoras (por ejemplo, TiO_2) puede excitar a un electrón de su banda de valencia a la banda de conducción. Este proceso también crea un hueco positivo en la banda de valencia que puede reaccionar con especies oxigenadas adyacentes para producir radicales $\cdot\text{OH}$. Éstos son bien conocidos como potentes oxidantes capaces de degradar una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos e incluso de destruir bacterias. Al mismo tiempo, el electrón excitado es capaz de reducir especies en contacto con el semiconductor directa o indirectamente. A esto se llama la fotocatalisis. La fotocatalisis con TiO_2 se ha utilizado principalmente para mineralizar contaminantes orgánicos tóxicos en el aire, agua o suelos convirtiéndolos en moléculas inorgánicas pequeñas, no tóxicas tales como CO_2 , H_2O , HCl . En

algunos casos se ha utilizado para la reducción y eliminación de iones metálicos a partir de soluciones acuosas, por ejemplo, $\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) - \text{Cu}^+ - \text{TiO}_2(\text{s})$. Los procesos fotocatalíticos casi siempre se han centrado sólo en un lado del fenómeno (de manera típica el componente anódico) y esencialmente desperdician la energía de la reacción complementaria. Hemos desarrollado un experimento en el que la oxidación simultánea de un compuesto orgánico (por ejemplo, ácido cítrico) y la reducción de un ion metálico (por ejemplo, cobre 2^+) se realizan fotocatalíticamente en una suspensión acuosa de TiO_2 que se irradia con luz UV (Ibanez, 2005).

Destrucción fotocatalítica de complejos: muchos ligandos están presentes en entornos naturales de una variedad de fuentes. La formación de complejos de iones metálicos con ligandos puede cambiar muchas propiedades de los iones metálicos, por ejemplo, su carga, solubilidad, color, potencial estándar y su estabilidad. Además, la movilidad del metal, la biodisponibilidad,

la bioacumulación, la toxicidad y la persistencia en el medio ambiente son frecuentemente dependientes de la forma química del ión metálico. Al mismo tiempo, la luz natural puede inducir muchos procesos de importancia ambiental, ya sea directamente (cuando la luz es absorbida por las especies de interés) o indirectamente (cuando las especies de interés reaccionan con un mediador previamente excitado o producido por la luz). Un ejemplo es la fotólisis de complejos de carboxilato con hierro (típicamente complejos con oxalato, aminopolicarboxilatos, citrato, ácidos húmicos y fúlvicos), que puede ocurrir con altos rendimientos cuánticos. En el presente experimento, se prepara un complejo [Fe(III)EDTA] y se expone a la luz (natural o artificial). Esto lo descompone para producir Fe(II), que reacciona con $K_3[Fe(CN)_6]$ como indicador de Fe(II) obteniéndose una solución altamente coloreada como prueba de la fotólisis del complejo (Ibanez, 2008).

Escritura fotocatalítica: hemos diseñado un experimento con el fotoblanqueo oxidativo de un colorante de jugo de frambuesa bajo irradiación con un láser de luz visible utilizando el dióxido de titanio como semiconductor. Éste utiliza el mismo principio descrito arriba (véase: “Remoción fotocatalítica de contaminantes”), pero el fenómeno de interés es la fotodecoloración a fin de producir lo que hemos llamado *escritura fotocatalítica*, pues los puntos irradiados por el láser tienen un color muy diferente de aquellos intactos (Ibanez, 2011).

Electroluminiscencia simultánea: un enfoque prometedor en electroquímica verde implica la minimización del gasto de energía a través del diseño de sistemas para realizar procesos complementarios benéficos en ambos electrodos de una celda electrosintética (es decir, procesos simultáneos) (Ibanez, 2013). Se han desarrollado muchas rutas sintéticas como es el caso exitoso del proceso comercial de cloro-álcali. Los beneficios incluyen no sólo el aspecto económico, sino también el ahorro de electricidad que ayuda a reducir la cantidad de combustibles fósiles que se queman para generarla, con la consiguiente reducción de contaminantes productos de combustión. Por lo tanto, esto favorece que los productos de electrólisis sean útiles y no haya necesidad de darles más tratamiento ni realizar disposiciones caras.

Como ejemplo, nosotros desarrollamos un proceso de electroquimioluminiscencia (ECL) simultánea a partir del uso del luminol en un medio básico en una celda electroquímica dividida. La ECL se obtiene en el anolito a través de la oxidación directa del luminol, mientras que la ECL se obtiene también en el catolito a través de un proceso indirecto mediado, que implica la reducción inicial de ClO_2^- a ClO^- , que luego reacciona con luminol y H_2O_2 para producir la especie emisora excitada. Este fenómeno de ECL es fácilmente observable por el ojo humano en un cuarto oscuro (Ibanez, 2013).

Electrocromismo: hemos desarrollado un procedimiento “casero” para la preparación de películas electrocromáticas de WO_3 a partir de materiales fácilmente accesibles. Se basa en la preparación electroquímica de tungstato de potasio a partir de filamentos de W de bombillas incandescentes en una solución de hidróxido de potasio. Se produce entonces ácido tungstico por intercambio de protones usando un polímero superabsorbente de un pañal de bebé. Cuando este ácido es secado al aire, se produce una capa de óxido de tungsteno (VI). En la superficie de una lámina de Cu se observa fácilmente una transición electrocromática de esta capa de óxido de incoloro a azul mediante la aplicación de un potencial externo en una celda electroquímica, usando al Cu como cátodo y a un electrodo de Pb como ánodo (Ibanez, 2012).

3. Producción de desactivadores alternos de microorganismos

Se pueden producir electroquímicamente potentes agentes de desinfección de agua para desactivar microorganismos no deseados. Una ventaja clave de este enfoque implica la posibilidad de producirlos *in situ*. Algunos de ellos, por ejemplo, producen menos subproductos que la desinfección que el cloro.

Producción de iones ferrato: se usa un tubo en U pequeño con NaOH concentrado utilizando como electrodos clavos de hierro (preferentemente oxidados) en cada lado, que se conectan a las terminales de una fuente de alimentación (por ejemplo, una pila de 9 V). En pocos minutos se desarrolla una

coloración violácea cerca del ánodo debido a la formación de los iones FeO_4^{2-} , que son oxidantes potentes. Se puede comprobar su presencia mediante análisis espectrofotométrico por su pico característico en las cercanías de 505 nm (Ibanez, 2004b). Una prueba más atractiva desde la perspectiva ambiental es añadir unas gotas de metanol al lado donde está el ferrato en el tubo en U y observar burbujas de CO_2 (resultantes de la mineralización de la materia orgánica) en la interfase de los dos líquidos. Después de unos minutos, los iones ferrato gastados se ponen color naranja como consecuencia de la reducción de Fe(VI) a Fe(III), que es además favorable para su uso en procesos de coagulación química.

Producción de ozono: se puede producir ozono de una manera segura, sencilla y económica mediante una celda electroquímica adaptada en una pipeta Beral (pipeta de transferencia de plástico), a la cual se le añade H_2SO_4 diluido. Se coloca esta celda electroquímica en un baño de hielo, con los electrodos insertos a través del plástico (electrodo de Pb para el positivo, de grafito para el negativo), se conectan a una fuente de alimentación y se permite que ocurra la electrólisis. Se pueden dirigir los gases de salida hacia un vaso de precipitados conteniendo una solución de KI con unas gotas de una solución de indicador de almidón recientemente preparados. El desarrollo de un color azul-negruzco es indicativo de la presencia de ozono. También se pueden realizar otras pruebas alternativas para el ozono (Ibanez, 2008; Ibanez, 2005).

4. Uso más seguro de algunas sustancias y técnicas químicas

El uso de fuentes de poder directas, especialmente de bajo amperaje, ha sido un paso hacia mayor seguridad. El uso de pilas de 9 V o de convertidores de calculadoras, celulares, etc., da un mensaje ambientalmente responsable de reusar las cosas y otorga mucha seguridad al experimentador.

Otro ejemplo en la línea de incremento de seguridad tiene que ver con la reactividad de metales

alcalinos, la cual es muy conocida y a menudo temida...¡y con razón! El experimento de laboratorio clásico de añadir un pequeño trozo de Na a un vaso de precipitados que contiene agua con fenolftaleína ha cautivado a muchas generaciones. A pesar de su relativa seguridad, se han reportado muchos accidentes (yo mismo viví uno en la Universidad de Houston, cuando una alumna sufrió una explosión —afortunadamente sin consecuencias que lamentar). Hemos buscado cómo mantener la belleza del experimento pero de modo que tales peligros se disminuyan drásticamente. Esto se logra mediante el uso de Li procedente de una batería de 3 V cuya reacción con agua produce la evolución de gas, y que si se diseña experimentalmente de modo que el Li de la pila quede “boca abajo”, esto se asemeja a un efecto del “croar” de una rana bajo el agua. Un giro cuantitativo permite la determinación de la cantidad de metal alcalino que reacciona con agua: a) por una titulación ácido-base con un ácido fuerte, o b) por diferencia de peso. Los resultados usando ambas técnicas son comparables. Estos experimentos pueden ofrecer un valor pedagógico importante para conceptos como la química ácido-base, la reactividad de metales alcalinos y la estequiometría.

Conclusiones

La química redox, incluyendo por supuesto a la electroquímica, ofrece una gran variedad de fenómenos para ser estudiados a fin de mejorar la comprensión de las reacciones químicas involucradas y sus aplicaciones. Muchas de las demostraciones, conceptos y experimentos discutidos aquí son adecuados incluso para estudiantes preuniversitarios.

Agradecimientos

Agradezco a la Sociedad Química de México su valiosa invitación para organizar el Simposio: Premios Nacionales de Química, en su Congreso Nacional de 2014, así como a las siguientes instituciones su asistencia financiera, logística o experimental: CONACYT (México), Universidad Iberoamericana, programa Fulbright del U.S. Department of State, Loyola University of Chicago, Universidad Jesuita de

Creighton, Programa Linnaeus-Palme de la Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo (SAICD), Universidad de Halmstad, Universidad de Guadalajara, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (Guadalajara), y el Centro Nacional de Educación Química (UNAM). Los siguientes profesores colaboraron en el desarrollo de los diferentes experimentos presentados aquí: Elizabeth García Pintor, Alejandro Alatorre Ordaz, Rodrigo Mayen-Mondragon, Mono Mohan Singh, Ronald M. Pike, Zvi Szafran, Bruce Mattson, Michael Tausch, Claudia Bohrmann Lide, Simone Krees, Nico Meuter, Christer Gruvberg, Rubén Vásquez Medrano, Samuel Macías Bravo, Patricia Balderas Hernández, Arturo Fregoso Infante, María Teresa Morán Morán, Virginia Cervantes Nemer y varios alumnos de Ingeniería Química de la Universidad Iberoamericana.

Referencias

- CuentalaLuna. <http://www.cuentalaluna.com/2012/06/ronda-de-los-animales.html> Consultada: 27 de Abril de 2015.
- Frontana,-Uribe, B. A.; Little, R. D.; Ibanez, J. G.; Palma, A.; Vasquez-Medrano, R. *Organic electrosynthesis: a promising green methodology in organic chemistry*. *Green Chem.* 2010, 12, 2099-2119. <http://pubs.rsc.org/doi:10.1039/C0GC00382D>.
- Ibanez, J. G.; Takimoto, M.; Vasquez, R.; Rajeshwar, K.; Basak, S. "Laboratory Experiments on Electrochemical Remediation of the Environment: Electrocoagulation of Oily Wastewater", *J. Chem. Educ.* 72, 1050-1052 (1995).
- Ibanez, J. G.; Singh, M. M.; Szafran, Z.; Pike, R. M. "Laboratory Experiments on Electrochemical Remediation of the Environment. Part 2: Microscale Indirect Electrolytic Destruction of Organic Wastes". *J. Chem. Educ.* 74 (12) 1449-1450 (1997).
- Ibanez, J. G.; Singh, M. M.; Szafran, Z.; Pike, R. M. "Laboratory Experiments on Electrochemical Remediation of the Environment. Part 4. Color Removal of Simulated Wastewater by Electrocoagulation-Electroflotation". *J. Chem. Educ.* 75 (8) 1040-1041 (1998a).
- Ibanez, J. G.; Singh, M. M.; Szafran, Z.; Pike, R. M. "Laboratory Experiments on Electrochemical Remediation of the Environment. Part 3. Microscale Electrokinetic Processing of Soils". *J. Chem. Educ.* 75 (5) 634-635 (1998b).
- Ibanez, J. G. "Laboratory Experiments on Electrochemical Remediation of the Environment. Part 5. Indirect H₂S removal". *J. Chem. Educ.* 78, 778-779 (2001).
- Ibanez, J. G. "Environmental Electrochemistry", in: *Electrochemistry Encyclopedia*, Zoltan Nagy, Ed. Center for Electrochemical Science and Engineering. Case Western Reserve University, USA. May 2004(a). <http://knowledge.electrochem.org/encycl/art-e02-environm.htm> Consultada: 27 de Abril de 2015.
- Ibanez, Jorge G.; Tellez-Giron; Monica; Alvarez, Diana; Garcia-Pintor, Elizabeth. "Laboratory Experiments on the Electrochemical Remediation of the Environment. Part 6. Microscale Production of Ferrate". *J. Chem. Educ.* 81, 251-254 (2004b).
- Ibanez, Jorge G.; Alatorre-Ordaz, Alejandro; Mayen-Mondragon, Rodrigo; Moran-Moran, M. T.; Mattson, Bruce; Eskestrand, Scot. "Laboratory Experiments on the Electrochemical Remediation of the Environment. Part 7. Microscale Production of Ozone". *J. Chem. Educ.* 82, 1546-1548 (2005).
- Ibanez, J. G.; Hernandez-Esparza, M.; Doria-Serrano, C.; Fregoso-Infante, A.; Singh, M. M. *Environmental Chemistry: Fundamentals*. Springer, New York. 2007. 334 pp. ISBN 978-0-387-26061-7. E-book: ISBN 978-0-387-31435-8.
- Ibanez, J. G.; Hernandez-Esparza, M.; Doria-Serrano, C.; Fregoso-Infante, A.; Singh, M. M. *Environmental Chemistry: Microscale Laboratory Experiments*. Springer, New York. 2008. 238 pp. ISBN 978-0-387-49492-0. E-book: ISBN 978-0-387-49493-7.
- Ibanez, J. G.; Hernandez-Esparza, M.; Doria-Serrano, C.; Fregoso-Infante, A.; Singh, M. M. *Química Ambiental*. McGraw Hill, México. (e-book). 2013. 370 pp. ISBN 978-1-4562-1149-3.
- Ibanez, J. G.; Hernandez-Esparza, M.; Doria-Serrano, C.; Fregoso-Infante, A.; Singh, M. M. *Manual de Laboratorio de Química Ambiental*. Editorial Universidad Iberoamericana, México. En imprenta, 2015.
- Ibanez, J. G.; Fitch, A.; Frontana-Urbe, B. A.; Vasquez-Medrano, R. "Green Electrochemistry". In: *Encyclopedia of Applied Electrochemistry*, edited by Robert F. Savinell, Ken-ichiro Ota and Gerhard Kreysa. Springer, 2014, 964-971. DOI 10.1007/978-1-4419-6996-5_132. http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-6996-5_132 Consultada el 27 de Abril de 2015.
- Ibanez, Jorge G.; Mena-Brito, Rodrigo; Fregoso-Infante, Arturo. "Laboratory Experiments on the Electrochemical Remediation of the Environment. Part 8. Microscale Simultaneous Photocatalysis", *J. Chem. Educ.* 2005, 82, 1549-1551.
- Ibanez, J. G.; Tausch, M. W.; Bohrmann-Linde, C.; Fernandez-Gallardo, I.; Robles-Leyzaola, A.; Krees, S.; Meuter, N. "The Basis for Photocatalytic Writing". *J. Chem. Educ.* 2011, 88, 1116-1118. DOI: 10.1021/ed1008848. ISSN: 0021-9584.
- Ibanez, J. G.; Puente-Caballero, R.; Torres-Perez, J.; Bustos, D.; Carmona-Orbezo, A.; Sevilla, F. B. "An Inexpensive Device for Studying Electrochromism". *J. Chem. Educ.* 2012, 89, 1205-1207. DOI 10.1021/ed200592j. ISSN: 0021-9584.
- Ibanez, J. G.; Zavala-Araiza, D.; Sotomayor-Martínez Barranco, B. "Simultaneous Electroluminescence". *J. Chin. Chem. Soc.* 2013, 60, 407-411. ISSN: 0009-4536. DOI: 10.1002/jccs.201200406
- Mattson, Bruce. "Microscale Gas Chemistry", *Educ. Quim. (México)* 16, 514-528 (2005).
- Rajeshwar, K.; Ibanez, J. G.; Swain, G. M. "Electrochemistry and the Environment". *J. Appl. Electrochem.* 24, 1077-1091 (1994).
- Rajeshwar, K.; Ibanez, J. G. *Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Abatement*. Academic Press: San Diego, 1997.
- Santoyo-Cázares, Salvador; Ibanez, Jorge G.; Hernández-Rivera, Lydia; García-Sánchez, Martín Adolfo. "An Electrochemically Induced, Chemically Produced, and Mechanically Cycled Traffic Light Effect". *The Chem. Educ.* (In press, 2006).