

# Uso combinado de software libre y de técnicas analíticas para facilitar la comprensión de los diagramas de equilibrio químico

## Combined use of freeware and analytical techniques to improve the understanding of chemical equilibrium diagrams

Emma María Ortega Navarro 

Universitat Politècnica de València  
eortega@iqn.upv.es

Manuel César Martí Calatayud 

Universitat Politècnica de València  
mcmarti@iqn.upv.es

Valentín Pérez Herranz 

Universitat Politècnica de València  
vperez@iqn.upv.es

Montserrat García Gabaldón 

Universitat Politècnica de València  
mongarga@iqn.upv.es

Jordi Carrillo Abad 

Universitat Politècnica de València  
jorcarab@upvnet.upv.es

Recibido: 25/07/2019

Aceptado: 4/12/2019

Publicado: 1/06/2020

### RESUMEN

En el presente trabajo se han investigado las ventajas resultantes del uso combinado del software libre Spana para la realización de diagramas de equilibrio junto con diferentes técnicas experimentales de análisis químico. El software Spana se ha utilizado para representar diagramas de distribución de especies de diferentes disoluciones de ácido fosfórico y sus sales. Los diagramas resultantes se han relacionado con los resultados obtenidos mediante conductimetría y colorimetría, bajo el contexto de la realización de un trabajo fin de Máster por parte de un alumno de Ingeniería Química. Los resultados alcanzados demuestran que el uso de técnicas experimentales junto con un software fácil de usar contribuye a mejorar la comprensión de los alumnos de la relevancia que tienen los desplazamientos del equilibrio químico sobre diferentes procesos ingenieriles. La metodología propuesta reduce el tiempo del proceso de aprendizaje por parte de los alumnos y puede resultar de utilidad, no solamente para la realización de trabajos fin de máster, sino también en la realización de prácticas de laboratorio en asignaturas relacionadas con el análisis químico.

### PALABRAS CLAVE

Equilibrio químico; química analítica; software libre; ingeniería química; conductimetría.

## ABSTRACT

In the present work, the advantages of combining the use of the freeware Spana to plot equilibrium diagrams with different laboratory analytical techniques have been investigated. The software Spana has been used to plot speciation diagrams of different solutions of phosphoric acid and its salts. The resulting diagrams have been correlated with the results obtained by conductimetric titration and colorimetry under the framework of the realization of a Master Thesis by a student of Chemical Engineering. The results achieved demonstrate that the combined use of experimental techniques and user-friendly software aid in the comprehension of the relevance that shifts in the chemical equilibrium could have on different engineering processes by students of Chemical Engineering. The proposed methodology reduces the time that students need to understand problems related to chemical equilibria and could be implemented, not only during the completion of Master Thesis, but also in laboratory courses related with subjects of Chemical Analysis.

## KEYWORDS

Chemical equilibrium; analytical chemistry; freeware; chemical engineering; conductometry.

## CITA RECOMENDADA

Ortega, M., Martí, M.C., Pérez, V., García, M., Carrillo, J. (2020). Aplicación del software libre Spana combinado con diferentes técnicas analíticas para explotar la utilidad de los diagramas de equilibrio químico por parte de alumnos de Ingeniería Química. *Revista Interuniversitaria de Investigación en Tecnología Educativa*, 8, 1-16. <http://dx.doi.org/10.6018/riite.391411>

## Principales aportaciones del artículo y futuras líneas de investigación:

- La combinación de técnicas experimentales y el software Spana han facilitado la comprensión del equilibrio químico.
- El uso del software libre Spana acelera el proceso de aprendizaje.
- Se plantea su uso futuro en las asignaturas relacionadas con el análisis químico.

## 1. INTRODUCCIÓN

La formación de profesionales en el ámbito de las enseñanzas universitarias técnicas y de ingeniería (conocidas en inglés por las siglas STEM, *Science Technology Engineering Mathematics*) se ha caracterizado tradicionalmente por tener unas tasas de finalización de estudios más reducidas que en otras áreas de la enseñanza superior (Eastman et al., 2017). En el caso de los estudios en ingeniería química, algunos autores destacan la relación entre los alumnos que encuentran dificultad en aprobar las asignaturas de química general y los que abandonan los estudios prematuramente (Lou & Jaeggi, 2020). Sevia y Talanquer apuntan que una de las principales causas de la dificultad por parte de alumnos de ingeniería química para asimilar conceptos básicos reside en que el enfoque docente en asignaturas de química se ha basado tradicionalmente en el aprendizaje de conceptos aislados, sin aportar una visión práctica que refleje la relevancia de dichos conocimientos para la resolución de problemas importantes de la sociedad (Sevia & Talanquer, 2014).

Entre las consecuencias negativas de la falta de asimilación de conceptos fundamentales en los primeros cursos de grado se encuentra la dificultad para superar asignaturas de cursos posteriores en las que se aplican dichos conceptos. Esto es especialmente constatable durante la realización de trabajos fin de grado/master, donde en muchos casos, los alumnos no esperan necesitar recordar conceptos estudiados más allá de los últimos cursos del título para la resolución de problemas de tipo ingenieril y tecnológico. El desarrollo de las TIC (tecnologías de la información y la comunicación) y su utilización en los cursos de química ha demostrado

tener un elevado potencial para mejorar el aprendizaje profundo de competencias, aumentar la motivación de los alumnos, y establecer conexiones entre los conocimientos adquiridos durante sus estudios y los problemas reales que deberán afrontar en su futuro profesional (Lou & Jaeggi, 2020). Además, el uso de simuladores, programas y entornos web para la resolución de problemas prácticos introduce un factor de dinamismo durante las clases y permite agilizar los tiempos de aprendizaje. No obstante, la mera introducción de herramientas TIC no implica necesariamente una mejora directa de la asimilación de conocimientos (Cabero Almenara, 2016; Gros, 2009). Para ello suele ser necesario que dichas herramientas vayan acompañadas de una explicación teórica previa, así como de una contextualización de la herramienta y de su aplicación en el tema de estudio. Asimismo, es altamente recomendable el diseño de ejercicios basados en casos prácticos, los cuales permitan al alumno situarse en un contexto real. En el campo de las ciencias experimentales como la química, es común incluir prácticas de laboratorio en la metodología de aprendizaje, mediante las cuales el alumno participa activamente y lleva a cabo los procesos estudiados, constatando así los resultados obtenidos de forma visual y directa.

Centrándonos en el marco contextual del presente trabajo, realizado en la Universitat Politècnica de València, cabe destacar que la convergencia al EEES (Espacio Europeo de Educación Superior), ha conllevado una reestructuración sustancial de asignaturas en los planes de estudio. En el título de ingeniería química anterior al plan Bolonia (BOE 01/11/97), los alumnos desarrollaban las competencias relacionadas con el análisis químico en una asignatura de 4,5 créditos denominada “Química Analítica”, que se impartía en el tercer semestre. De forma paralela, existía una asignatura completamente experimental de 9 créditos, “Experimentación en Química”, donde se aplicaban dichos conocimientos mediante la realización de prácticas de laboratorio. En el plan actual del grado de ingeniería química (RD 1393/2007), las competencias relacionadas con el análisis químico se imparten íntegramente en una asignatura, denominada “Experimentación en análisis químico”, la cual consta de 6 créditos (5 de prácticas de laboratorio y 1 crédito de prácticas informáticas). Es evidente, que la condensación de conocimientos en un número inferior de créditos supone un reto para el docente, y una dificultad añadida para los estudiantes. Es en este escenario en el que las herramientas TIC pueden desempeñar un papel central como reductoras de la curva de aprendizaje y como conectores entre teoría y praxis.

Dentro del grado de ingeniería química, entre los resultados de aprendizaje a desarrollar relacionados con la química analítica se encuentran la construcción y utilización de diagramas de equilibrio. Las reacciones de equilibrio químico no sólo son importantes en los grados de ingeniería química y de química; sino que también son relevantes en otras disciplinas como la biología, la ingeniería medioambiental o la medicina. Existe una amplia variedad de situaciones, en las cuales se producen cambios en el equilibrio de disoluciones químicas, siendo destacables las siguientes:

- Reacciones ácido-base
- Equilibrios de precipitación
- Reacciones de oxidación-reducción
- Equilibrios de formación de complejos

Pese a que las reacciones de equilibrio químico tienen lugar en procesos con un carácter marcadamente dinámico, parte del alumnado de ingeniería química concibe con dificultad la utilidad de los diagramas de distribución de especies para interpretar cambios en el equilibrio químico de una disolución. Un componente de dicha dificultad radica en que los métodos de aprendizaje tradicionales se suelen basar en la construcción en pizarra o en formato papel de los diagramas de equilibrio. Dicha metodología requiere de numerosos cálculos, es laboriosa y limita la disponibilidad de tiempo durante las clases para analizar la evolución de un sistema químico frente a cambios en las condiciones de operación. Ante este reto, resulta necesaria la introducción de cambios con respecto a la metodología tradicional del proceso enseñanza-aprendizaje.

Con el fin de facilitar la construcción rápida de diagramas de equilibrio químico, el departamento de química de la Universidad KTH de Estocolmo desarrolló un software de acceso libre basado en Visual Basic, conocido como Medusa (*Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms*). En su última versión, los creadores del *freeware* han cambiado el nombre de Medusa a Spana (<https://sites.google.com/site/chemdiag/home>). Dicho software utiliza constantes de equilibrio de una amplia base de datos para la construcción de distintos tipos de diagramas: logarítmicos, diagramas de predominancia de especies o diagramas redox, entre otros. El programa también permite variar las propiedades de las disoluciones (rango de pH, concentración total de especies, mezclas de diferentes compuestos, fuerza iónica, etc.), con lo cual, facilita el análisis de sistemas dinámicos.

La utilización del software de acceso libre Spana hace compatible la construcción de diagramas de equilibrio de forma sencilla y rápida con la experimentación en laboratorio de forma simultánea, facilitando así la comprensión por parte de los alumnos de las implicaciones que conllevan los cambios en las condiciones de equilibrio en un sistema químico determinado. En contraposición, la combinación de la experimentación en el laboratorio con el uso de técnicas tradicionales como la realización y modificación de múltiples diagramas de equilibrio en formato papel no resulta factible debido a las limitaciones de tiempo. La motivación de esta investigación parte del planteamiento de que la participación activa del alumnado en prácticas de laboratorio sin dejar de lado el contexto teórico puede contribuir a aumentar su nivel de asimilación de conceptos y constituye una forma visual de aprendizaje profundo. En el presente trabajo se ha utilizado el software Spana bajo el marco de la realización de un trabajo fin de máster, de modo que el alumno pudo comprobar, in situ, la validez de sus resultados experimentales con el programa. El uso del software también permitió al alumno recordar conocimientos aprendidos durante los primeros semestres del grado en ingeniería química de forma rápida. Las ventajas constatadas en el caso de estudio han motivado un replanteamiento en la metodología utilizada en la asignatura del grado en ingeniería química en la cual se trabaja con diagramas de equilibrio. La metodología docente propuesta se basa en la combinación teoría-laboratorio-software en una misma clase en el laboratorio químico, la cual resulta factible gracias a las ventajas ofrecidas por el software libre Spana.

## 1.1. Trabajos relacionados

Numerosos trabajos previos han tratado la introducción del uso de herramientas informáticas en cursos de ingeniería química (Cress et al., 2012). El uso de programas como Matlab, Statistica o Excel es común en sesiones prácticas de cursos de ingeniería química (Briones & Escola, 2019; Brown, 2009; Láng-Lázi et al., 1999). No obstante, la integración de herramientas de software se suele llevar a cabo principalmente en asignaturas específicas de simulación y optimización de procesos químicos (González-Zafrilla et al., 2019). En dichas asignaturas, el estudiante desarrolla competencias instrumentales mediante el aprendizaje de diferentes tipos de software de programación, al mismo tiempo que desarrolla competencias específicas del grado/máster. Además, la utilización de software de simulación en prácticas informáticas puede ser complementada con el uso de objetos de aprendizaje como vídeos screencast o laboratorios virtuales, los cuales son accesibles por parte del alumno desde casa y en cualquier momento (González Zafrilla, J.M. Santafé Moros, 2016; M. Santafé Moros, 2008). Serrano Pérez exploró el uso de laboratorios virtuales relacionados con el campo de la física y la química como recurso de *gamificación*, destacando la idoneidad del carácter “abierto” de dichos recursos para alcanzar objetivos didácticos muy variados (Serrano-Perez, 2018). En este sentido, Paricio Royo destaca el aprendizaje basado en metodologías activas como una de las 15 dimensiones asociadas a las buenas prácticas y concepciones docentes; y la contrapone con la concepción tradicional de la enseñanza, donde es el profesor el que “recita” unos conocimientos en la clase magistral mientras el alumno escucha (Paricio Royo, 2018). El uso de herramientas TIC en clases de prácticas, bien sean de laboratorio o de informática, conlleva de forma implícita la participación activa del alumno.

Al contrario que en las asignaturas específicas de simulación, la utilización de un software de apoyo en asignaturas donde se tratan conceptos fundamentales resulta más compleja e indirecta. Tales asignaturas, en titulaciones STEM, están relacionadas normalmente con la física, química o matemáticas, y se suelen impartir en los primeros semestres de grado. Tal es

el caso de la asignatura “Experimentación en análisis químico”, sobre la cual se centra el presente trabajo. Un aspecto importante para considerar en este tipo de asignaturas es la dificultad y el tiempo que supone para los alumnos el aprendizaje y manejo de nuevas herramientas informáticas. Cabe tener en cuenta, que al contrario que en las asignaturas específicas de simulación, el aprendizaje de un lenguaje de programación o el manejo de un software determinado no constan entre las competencias a desarrollar. Por tanto, la utilización de programas ya conocidos o de programas con una interfaz fácil de usar es esencial para asegurar un aprovechamiento máximo de las sesiones prácticas (A. Santafé Moros et al., 2019). En caso contrario, la utilización de programas cuyo aprendizaje y familiarización requieren de tiempos elevados podría ser contraproducente para el proceso de aprendizaje, desviando al alumno del objetivo fundamental de la asignatura.

Otro de los factores a tener en cuenta a la hora de introducir el uso de un software determinado en una asignatura son la accesibilidad al software, el posible coste asociado a la adquisición de licencias de uso, y la posibilidad de que los alumnos puedan practicar desde casa, fuera del campus universitario. La generación de archivos adaptados con software disponible en la universidad, como Excel, para analizar casos de estudio relacionados con la asignatura puede solventar el problema asociado al coste de licencias de programas más específicos. No obstante, también puede suponer una tarea ardua que consume mucho tiempo del profesorado. En estos casos, la disponibilidad de software de uso libre es altamente recomendable, siempre y cuando se ajuste a los objetivos de la sesión de clase (Martín & Mato, 2008; Rowe, 2017).

En general, la mayoría de los trabajos previos coinciden en concluir que el uso de TICs sirve de gran ayuda para aumentar el interés de los estudiantes y facilitar su comprensión de los contenidos teóricos de las asignaturas. No obstante, Selmer et al. también concluyó que la utilización de herramientas informáticas no puede sustituir el trabajo práctico y activo por parte de los estudiantes en el laboratorio de química (Selmer et al., 2007). En el caso de las prácticas de laboratorio químico, el uso de técnicas colorimétricas en las cuales se percibe un cambio en la materia de forma visual constituye un recurso valioso para aumentar el aprendizaje cognitivo de los alumnos y su motivación (Ibanez et al., 2011; Wu et al., 2019). Existen múltiples ejemplos de dichas prácticas. Macey et al. usaron el fenómeno de la luminiscencia para enseñar el concepto de la cinética de las reacciones químicas (Macey et al., 2018). Tomás-Serrano y García-Molina proponen un experimento de electrólisis utilizando productos de bajo coste para la determinación de la constante de Avogadro (Tomás Serrano & Garcia Molina, 2017). Otros autores proponen partir de ideas corrientes en la vida diaria, por ejemplo, un proceso de fabricación de pinturas, como estrategia de acercamiento de la química a los alumnos (Martínez Pons, 2017). L. Rowe combinó el uso de freeware en clases prácticas de bioinformática (Rowe, 2017). En referencia a la puesta en práctica de conocimientos relacionados con el análisis químico, existen distintos trabajos sobre el uso de software, si bien, no consta su integración en laboratorios químicos (Kim et al., 2019; Vander-Griend, 2011). En la Universitat Politècnica de València también existen experiencias previas de uso de programas para la construcción de diagramas de equilibrio; en concreto, se desarrolló un software específico llamado ChemGraph (García-Antón et al., 2001). No obstante, dicho software no realiza diagramas de distribución de especies para mezclas multicomponente, ni permite variar otras propiedades de las disoluciones, limitando así las posibilidades de comparación a tiempo real con las disoluciones utilizadas normalmente en prácticas de laboratorio químico.

## 2. MÉTODO

### 2.1. Metodología empleada

La metodología que se explica a continuación se ha implementado durante la realización del trabajo fin de máster de un estudiante de ingeniería química. La investigación parte de las dificultades encontradas previamente en alumnos de ingeniería química en la fase de realización del trabajo final de grado y final de máster cuando necesitan aplicar conceptos de ciencias básicas tratados en asignaturas de los primeros semestres del grado. El trabajo fin de

máster en el que se desarrolló la presente investigación se centraba en la búsqueda de una solución tecnológica a un problema medioambiental global y su demostración mediante ensayos de laboratorio. En concreto, el tema del trabajo fin de máster es el estudio del transporte de ácido fosfórico a través de membranas de intercambio iónico utilizadas en celdas de electrodiálisis. La aplicación práctica de dicho estudio consiste en la recuperación de fósforo a partir de efluentes terciarios para su revalorización como fertilizante vegetal.

Se detectó una falta de asimilación de conceptos fundamentales por parte del alumno, los cuales están relacionados con la química analítica. También se observó cierta dificultad en el alumno a la hora de encontrar una conexión entre los resultados experimentales obtenidos y un proceso de equilibrio químico. Puesto que dichas limitaciones requieren de un esfuerzo considerable para reforzar los conocimientos, se optó por instruirle en la utilización del software libre Spana. La sencillez y facilidad de utilización del software, unidos a su carácter libre, y a su potencia para la obtención de diagramas de equilibrio en sistemas altamente complejos son los principales motivos para su elección.

Otra de las limitaciones observadas en el alumno fue la dificultad en encontrar una relación directa entre los cambios en el equilibrio químico en sistemas de electrodiálisis y su repercusión sobre el consumo energético del proceso. Esta dificultad indica una falta de aprendizaje cognitivo. Con el motivo de eliminar dichas limitaciones se planteó la realización de ensayos experimentales con diferentes técnicas analíticas, con las cuales los alumnos se encuentran más familiarizados. Dichas técnicas son la conductimetría y la colorimetría mediante la utilización de indicadores de pH.

Finalmente, se identificó un elevado potencial en el software libre Spana, dado que puede ser utilizado de forma combinada con la realización de los experimentos en el laboratorio químico. De este modo, la utilización de Spana de forma simultánea a la realización de experimentos visuales permite reforzar la conexión entre teoría y práctica en el aprendizaje de conceptos relacionados con el equilibrio químico.

De los resultados obtenidos con el alumno que realizó el trabajo fin de máster surgieron varias reflexiones: ¿existe una falta de enfoque en la asignatura de análisis químico hacia situaciones de la vida cotidiana? ¿Supone la realización de diagramas de equilibrio en formato papel un buen método para lograr el aprendizaje profundo de conocimientos de análisis químico, teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo de la asignatura? ¿Sería positivo introducir cambios en la metodología de aprendizaje utilizada hasta el momento con el fin de aumentar la relación que los alumnos perciben entre las prácticas de laboratorio y la clase magistral? De todas estas reflexiones surgió la idea de implantar el procedimiento utilizado en la asignatura de grado "Experimentación en análisis químico".

En conclusión, la metodología seguida se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Realización de ensayos de electrodiálisis en una celda electroquímica
2. Utilización combinada del software libre Spana junto con técnicas analíticas con el fin de reforzar el aprendizaje profundo y cognitivo del alumno referente al análisis químico. En el caso de estudio, este procedimiento facilitó al alumno la justificación de sus resultados experimentales obtenidos con celdas electroquímicas.
3. Realización de una encuesta/entrevista al alumno con el fin de obtener su opinión acerca del procedimiento seguido e identificar ventajas e inconvenientes.
4. A partir de las conclusiones de la entrevista, y una vez identificadas las limitaciones en alumnos cercanos a la finalización de sus estudios, se propuso una nueva metodología en la organización de las prácticas de laboratorio de la asignatura "Experimentación en análisis químico".

## **2.2. Breve descripción del software y de las técnicas analíticas empleadas**

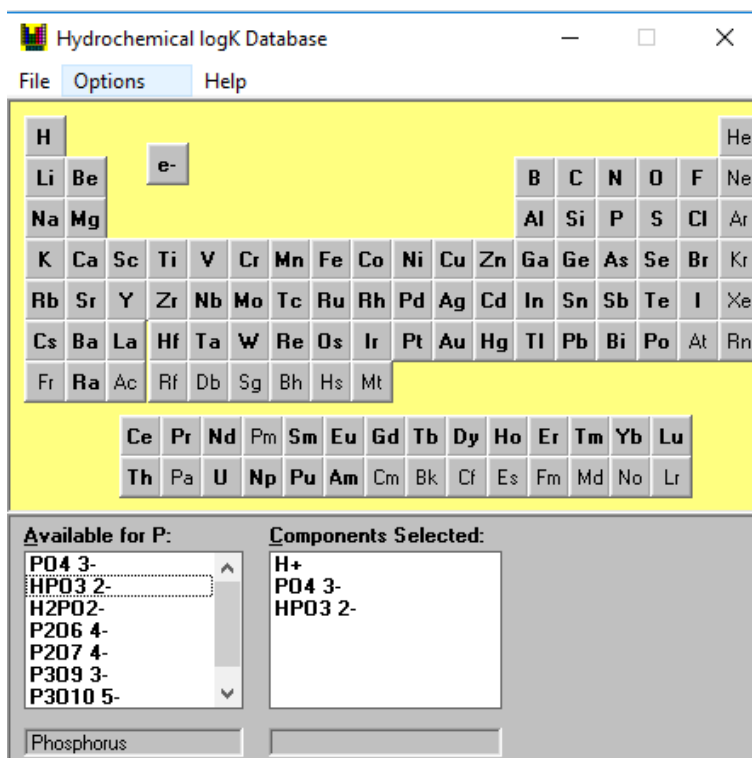
La herramienta de software libre Spana se ha aplicado para la obtención de los diagramas de distribución de especies de disoluciones de ácido fosfórico y sus correspondientes sales. Posteriormente, se ha combinado la información obtenida a partir del programa con el uso de

diferentes técnicas analíticas para la interpretación de los experimentos de electrodiálisis. La metodología empleada se basa en la utilización conjunta de herramientas informáticas y técnicas analíticas, las cuales se enumeran a continuación:

- Uso de la base de datos de Spana: la base de datos incluye los datos de las constantes de equilibrio para la formación de diferentes especies en disoluciones de ácido fosfórico y sus sales.

Figura 1. Selección de compuestos químicos y especies iónicas del sistema químico a tratar.

- Uso del software libre Spana: Spana permite construir los diagramas de distribución de especies para distintas situaciones.



- Valoración conductimétrica: el cambio en el equilibrio que se produce en disoluciones de ácido fosfórico y sus sales conlleva la desaparición de especies iónicas con diferente conductividad. Dichos cambios de conductividad se pueden medir mediante valoración con medición simultánea de pH y conductividad.
- Colorimetría: el uso de indicadores de pH, cuya coloración varía en función del pH de la disolución, permite comprobar de forma visual y directa el efecto que puede conllevar un desplazamiento en el equilibrio de un sistema químico.

En primer lugar, el estudiante aprende a utilizar el programa Spana. A partir de una tabla periódica, el alumno selecciona los elementos que contienen las especies a estudiar (Figura 1). A continuación, tal como se muestra en la Figura 2, se puede seleccionar el tipo de diagrama, así como el rango de presentación de datos de cada eje y las concentraciones o actividades de los compuestos elegidos anteriormente. Una vez creado el diagrama deseado, éste se puede copiar en el portapapeles o exportar en diferentes formatos (bmp, metafile, etc.).

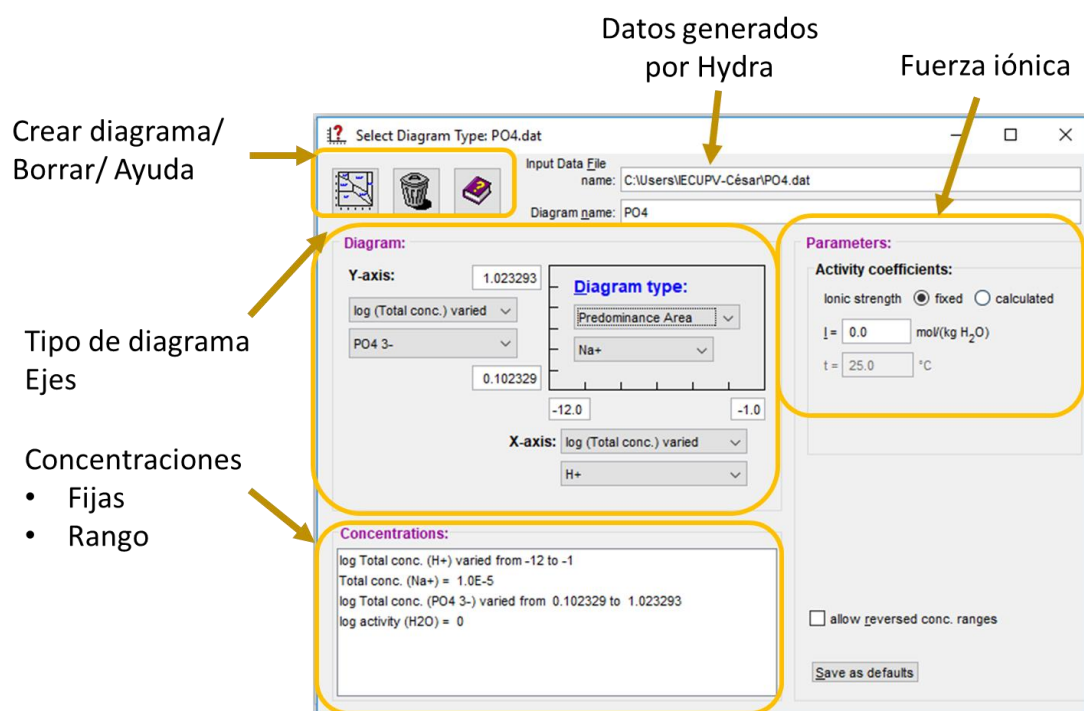


Figura 2. Pantalla de creación de diagramas de equilibrio. En dicho menú se pueden seleccionar las condiciones de la disolución (pH, concentraciones, fuerza iónica, etc.) tal y como se indica en la figura.

Tal como se puede apreciar en las Figura 1 y Figura 2, el programa Spana es muy fácil de utilizar, de modo que con sólo 3 pasos se pueden generar diagramas de equilibrio. La construcción de diagramas adicionales para condiciones de operación distintas se realiza también de forma directa mediante la modificación de los parámetros que aparecen en el panel de la Figura 2.

Como complemento a la creación de diagramas de equilibrio mediante Spana, el alumno aplicó diferentes técnicas analíticas. La resistencia eléctrica en los sistemas de electrodiálisis está relacionada con los iones presentes en disolución y es uno de los parámetros que determina el consumo energético asociado a un proceso de electrodiálisis (Martí-Calatayud et al., 2012). Los cambios en el pH de la disolución ocurren comúnmente en los procesos de electrodiálisis debido a la disociación de agua cuando se opera a densidades de corriente elevadas o debido a que se alcanzan concentraciones muy bajas en los compartimentos de dilución. Dichos cambios de pH implican un desplazamiento en el equilibrio que puede causar un cambio en las especies iónicas predominantes. Con el fin de determinar el efecto del cambio de pH sobre la conductividad iónica de disoluciones de  $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{PO}_4^{3-}$ , se procedió a valorar una disolución 0.05M de  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  añadiendo volúmenes graduales de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  como valorante. La valoración se siguió mediante un conductímetro y un pH-metro, obteniéndose una curva conductividad-pH como resultado.

Otra forma de identificar cambios en el equilibrio de una disolución es la utilización de indicadores de pH. Los indicadores son compuestos que adquieren diferente color en función del pH de la disolución. En el presente caso se utilizó el indicador rojo Congo, cuyo  $\text{pK}_a$  es cercano a 4, de forma que adquiere un color anaranjado a pH ácido y azulado a pH neutro y básico. Se prepararon disoluciones de ácido fosfórico y fosfato de sodio en diferentes proporciones, y se realizaron fotografías de cada una de ellas para relacionarlas con las curvas conductimétricas y con los diagramas de distribución de especies.

### 2.3. Método de recolección de datos



Los datos recogidos en esta investigación se obtuvieron mediante la realización de una encuesta/entrevista al alumno que realizó el trabajo fin de máster siguiendo la metodología propuesta. La entrevista se realizó siguiendo las recomendaciones de Creswell (Creswell, 2013) y Seidman (Seidman, 2006), de forma que además de las preguntas formuladas al entrevistado, se le permitió realizar reflexiones acerca de la metodología seguida y plantear inquietudes y sugerencias de mejora. La entrevista se enfocó para obtener información sobre las carencias más importantes respecto a los conceptos de análisis químico en el alumno y a la utilidad de los procedimientos seguidos para superar dichas carencias. Las preguntas fueron analizadas por los autores del presente trabajo y, como fruto de dicho análisis, surgió la propuesta de utilización de la metodología en la asignatura “Experimentación en análisis químico”.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Efecto de la dilución en la capa límite de un sistema de electrodiálisis: utilidad del software Spana

En el marco de la explicación de los fenómenos que ocurren durante la electrodiálisis de disoluciones de ácido fosfórico y sus sales mediante el uso de diagramas de equilibrio, el alumno realizó diagramas de distribución de especies para la concentración inicial utilizada en los experimentos de electrodiálisis ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$  0.05M), y para una concentración 10 veces inferior ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$  0.005M). Con la representación de dichos diagramas se pretende obtener información útil sobre los cambios de especies que se pueden producir en las proximidades de una membrana de intercambio iónico. Como se puede observar en la Figura 3, al comienzo de un proceso de electrodiálisis llevado a cabo con fosfato sódico en un rango de pH entre 8 y 12, dos especies aniónicas pueden ser transportadas a través de la membrana de intercambio aniónico:  $\text{HPO}_4^{2-}$  y  $\text{NaHPO}_4^-$  (ver Figura 3(a)). No obstante, a medida que disminuye la concentración de electrolito, se produce un cambio en la distribución de especies, de modo que  $\text{HPO}_4^{2-}$  será la especie principal transportada a través de las membranas para valores de pH entre 8 y 12 (ver Figura 3(b)). Por tanto, la construcción de diferentes diagramas de equilibrio permite al estudiante identificar si un cambio en la resistencia de la membrana puede ser debido a cambios en el equilibrio químico en la disolución, y a un cambio en las especies transportadas a través de las membranas.

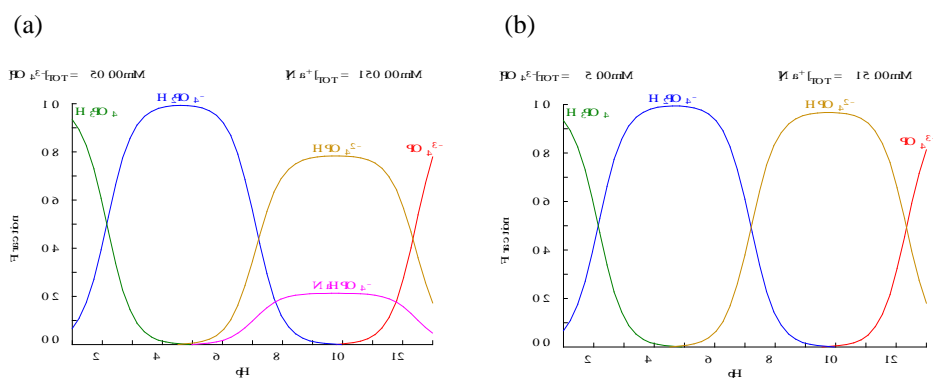


Figura 3. Diagramas de distribución de especies obtenidos para disoluciones de fosfato de sodio (a) 0.05M y (b) 0.005M.

#### 3.2. Efecto de cambios de pH en la interfase membrana-electrolito durante un proceso de electrodiálisis: combinación del software Spana con diferentes técnicas analíticas

Además de los efectos causados por los cambios en la concentración de la disolución en las proximidades de una membrana de intercambio iónico, también es posible que se produzcan alteraciones en el pH de la disolución, que conlleven un cambio en las especies iónicas predominantes (Martí-Calatayud et al., 2018). Como se ha mencionado en el apartado

anterior, tanto la disminución de la concentración en las proximidades de la membrana como la disociación de agua a densidades de corriente elevadas pueden originar cambios en el pH. Con el fin de identificar dichos cambios de pH de forma visual, así como de identificar si implican una alteración en la conductividad de la disolución, el alumno realizó una valoración conductimétrica y analizó la evolución del color de las disoluciones utilizando el indicador rojo Congo. En la Figura 4 (a) se demuestra que, efectivamente, existe una correlación directa entre las especies predominantes en disolución y la conductividad iónica de la disolución (línea azul en el gráfico). Asimismo, en la Figura 4 (b) también se puede observar la correspondencia entre la evolución del color de las disoluciones y el pH. Tanto los cambios en la conductividad como los cambios en el color de la disolución durante los experimentos permitieron al alumno identificar que una de las causas del aumento de la resistencia eléctrica de las celdas se debía a los desplazamientos del equilibrio químico como consecuencia de los cambios en el pH de la disolución.

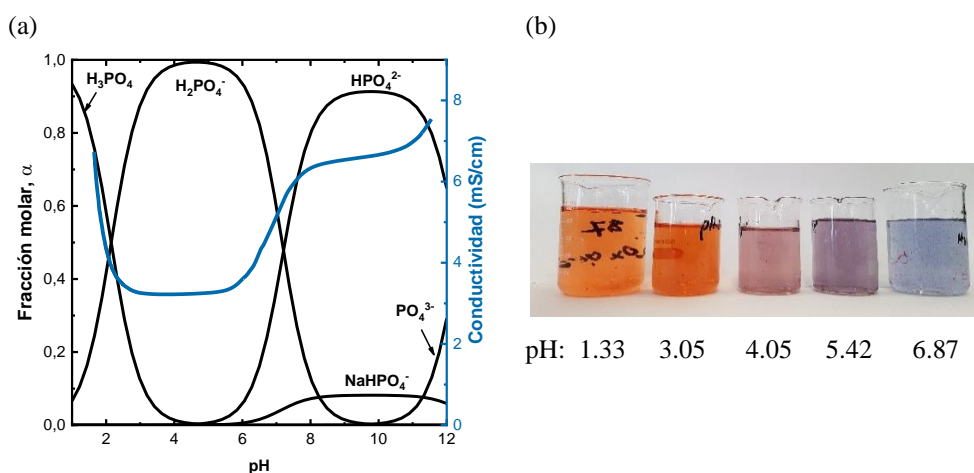


Figura 4. (a) Superposición del diagrama de distribución de especies ( $H_3PO_4-PO_4^{3-}$ ) con la valoración conductimétrica y (b) resultados del experimento colorimétrico para diferentes valores de pH.

### 3.3. Opinión alumno

Al alumno se le realizó una encuesta/entrevista para conocer tanto su opinión como su experiencia con la metodología expuesta en este trabajo. De la entrevista se obtienen las siguientes observaciones:

- El alumno destaca que el uso del programa Spana no sólo ha facilitado la realización de su trabajo fin de máster, sino que también ha facilitado la comprensión de los equilibrios químicos.
- El uso del software le supuso un ahorro de tiempo con respecto a la realización de los diagramas de equilibrio de forma convencional (p.ej. mediante Excel o directamente mediante el uso de formato papel).
- El alumno destaca que la interfaz del software es muy intuitiva, lo cual le permitió entender muy rápidamente su funcionamiento. Preguntado por la posible aplicación en una clase de 2 horas de duración, el alumno considera que, con 10 minutos de explicación previa, sería capaz de utilizar el programa y realizar diagramas de equilibrio. La rapidez en el aprendizaje del software permitiría el tratamiento de casos prácticos durante el tiempo restante de clase.
- El alumno también destacó la utilidad de que el programa sea ejecutable desde una unidad usb, de forma que permite su utilización en diferentes dispositivos, sin necesidad de instalación.

- Como mayor inconveniente, el alumno observó la dificultad que presenta el software para la importación de los datos obtenidos a otros programas como Excel u Origin, para su posterior adaptación al formato de la memoria del trabajo fin de máster.
- El alumno también quiso enfatizar que las técnicas analíticas empleadas son muy visuales y le permitieron comprender la implicación que puede tener en un sistema químico dinámico la variación en el equilibrio y la aparición de nuevas especies. Mediante dichas técnicas, consiguió encontrar una correlación entre el desplazamiento del equilibrio y la eficiencia de las celdas de electrodiálisis bajo distintas condiciones de operación.

### **3.4. Propuesta del uso combinado de Spana con técnicas analíticas experimentales como metodología de aprendizaje para cursos de grado**

Tras la realización de la encuesta, los autores del presente trabajo nos planteamos la siguiente reflexión: “Si un alumno en el último semestre de sus estudios universitarios, con dificultades para la aplicación de conceptos fundamentales de química analítica, ha superado dichas limitaciones mediante el uso simultáneo de experimentación en el laboratorio químico y del software libre Spana, ¿supondría una mejora general en la asimilación de conceptos básicos por parte de alumnos de ingeniería química la utilización de dicha metodología en la asignatura de grado “Experimentación en Análisis Químico”?”

A partir de la reflexión anterior se propone adaptar la metodología utilizada en la presente investigación para su utilización en el desarrollo de la asignatura. La metodología propuesta queda esquematizada en los siguientes puntos:

1. Explicación teórica en una práctica de informática de los conceptos relacionados con el análisis químico. Introducción a los diferentes diagramas de distribución de especies y resolución de problemas con un nivel de dificultad reducido en pizarra y mediante Excel.
2. Introducción al software Spana en práctica informática. Realización de ejercicios basados en casos prácticos relacionados con procesos químicos presentes en situaciones cotidianas. Realización de problemas con disoluciones multicomponente complejas y comparación de los tiempos de resolución de ejercicios con respecto a la forma de resolución tradicional.
3. Realización de prácticas de laboratorio integradas con la utilización del software Spana con tabletas electrónicas u ordenadores portátiles en el laboratorio químico. Algunos ejemplos de los procesos a tratar en el laboratorio son la electrodeposición de cobre sobre un cátodo, el proceso de corrosión de un material metálico, la realización de volumetrías de precipitación para la determinación de cobre disuelto en una disolución, o la determinación de la concentración de ácido fosfórico presente en un refresco de cola mediante valoración ácido-base. Cabe comentar, que los experimentos de laboratorio planificados en la asignatura son distintos de los realizados por el alumno para su trabajo fin de máster, puesto que se pretende que cubran un espectro de casuísticas más amplio.

Las principales ventajas que se esperan obtener como resultado del cambio de metodología son las siguientes:

- Aumentar la conexión existente entre conceptos teóricos y las prácticas de laboratorio químico, con el fin de afianzar conocimientos teóricos y fomentar el aprendizaje cognitivo del alumnado.
- Reducción de los tiempos de la curva de aprendizaje gracias a la facilidad de utilización del software y a la rapidez con que permite generar diagramas de distribución de especies en sistemas complejos.

- Fomento del aprendizaje activo por parte del alumnado como resultado de la utilización del software Spana para asociar los cambios en la propiedad medida que se observa in situ durante la práctica de laboratorio con los cambios en el equilibrio químico.

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha combinado el uso de una herramienta de software libre para la realización de diagramas de equilibrio junto con diferentes técnicas analíticas de laboratorio. La metodología utilizada ha facilitado la comprensión por parte del alumno de ingeniería química de las implicaciones que conllevan los cambios en el equilibrio químico sobre el funcionamiento de un sistema de electrodiálisis. El uso combinado y simultáneo del software Spana y de las diferentes técnicas analíticas permitió al alumno explicar los resultados obtenidos durante la realización de su trabajo fin de máster. La facilidad de utilización del software y la rapidez en la generación de diagramas de equilibrio de sistemas multicomponentes lo convierte en un recurso adecuado para su utilización en prácticas de laboratorio. En comparación con las metodologías tradicionales de representación de los diagramas de equilibrio en formato papel, Spana puede ser utilizado en el laboratorio químico, sirviendo de nexo entre los resultados experimentales y los conceptos teóricos aprendidos en las clases magistrales; y reduciendo los tiempos en la curva de aprendizaje de conceptos relacionados con el análisis químico.

La utilización del software Spana ha facilitado el análisis de diferentes casuísticas en un tiempo relativamente corto, no necesitándose conocimientos de programación avanzados. Aunque la combinación de técnicas experimentales y el software Spana solamente se ha utilizado durante la realización de un trabajo fin de máster, las ventajas observadas han motivado un replanteamiento en la organización de la asignatura de grado “Experimentación en análisis químico”. Especialmente, el software presenta un gran potencial en su aplicación mediante el uso de tabletas o dispositivos portátiles en prácticas de laboratorio, planteadas en la nueva metodología como sesiones de teoría-laboratorio-informática. De este modo, se pueden asentar los conceptos relacionados con el equilibrio químico por parte del alumnado de ingeniería química; consiguiendo un aprovechamiento máximo de las prácticas de laboratorio. Se puede concluir que, el uso de este software libre presenta un gran potencial y versatilidad para un gran número de casos prácticos y aplicaciones.

#### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Briones, L., & Escola, J. M. (2019). Application of the Microsoft Excel Solver tool in the solution of optimization problems of heat exchanger network systems. *Education for Chemical Engineers*, 26, 41–47.
- Brown, P. (2009). Understanding Solubility through Excel Spreadsheets. *Journal of Chemical Education*, 78(2), 268–270. <https://doi.org/10.1021/ed078p268>
- Cabero Almenara, J. (2016). ¿Qué debemos aprender de las pasadas investigaciones en Tecnología Educativa? *Revista Interuniversitaria de Investigación En Tecnología Educativa*, 0, 23–33. <https://doi.org/10.6018/riite/2016/256741>
- Cress, N. L., Robinson, M. A., Corner, L., Legge, R. L., & Ricardez-Sandoval, L. A. (2012). Problem-solving and concept integration using a computational tool in first-year undergraduate chemical engineering. *Education for Chemical Engineers*, 7(3), e133–e138. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2012.05.001>
- Creswell, J. W. (2013). *Qualitative inquiry & research design : choosing among five approaches* (3rd ed.). SAGE publications.
- Eastman, M. G., Christman, J., Zion, G. H., & Yerrick, R. (2017). To educate engineers or to engineer educators?: Exploring access to engineering careers. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(7), 884–913. <https://doi.org/10.1002/tea.21389>

- García-Antón, J., Pérez-Herranz, V., Guiñón, J. L., & Nachiondo-Farinós, T. (2001). *ChemGraph: estudio de los equilibrios químicos, tratamiento gráfico por ordenador*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- González-Zafrilla, J. M., Santafé-Moros, A., Catalán-Martínez, D., Toldrá-Reig, F., & Martí-Calatayud, M. C. (2019). Desarrollo y aplicación del software DISEVAP\_edu como apoyo al aprendizaje del diseño y análisis de procesos de evaporación de múltiples efectos. In *IN-RED 2019. V Congreso de Innovación Educativa y Docencia en Red* (pp. 1165–1177). Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/inred2019.2019.10481>
- González Zafrilla, J.M. Santafé Moros, M. A. (2016). *Cálculo con Mathcad del proceso de concentración de un tanque con una membrana*. <https://bit.ly/3bhn5YD>
- Gros, B. (2009). Retos y tendencias sobre el futuro de la investigación acerca del aprendizaje con tecnologías digitales. *RED. Revista de Educación a Distancia*, 32.
- Ibanez, J. G., Balderas-Hernandez, P., Garcia-Pintor, E., Barba-Gonzalez, S. N., Doria-Serrano, M. C., Hernaiz-Arce, L., Diaz-Perez, A., & Lozano-Cusi, A. (2011). Laboratory experiments on the electrochemical remediation of the environment. Part 9: Microscale recovery of a soil metal pollutant and its extractant. *Journal of Chemical Education*, 88(8), 1123–1125. <https://doi.org/10.1021/ed101033h>
- Kim, S., Choi, H., & Paik, S. H. (2019). Using a systems thinking approach and a scratch computer program to improve students' understanding of the brønsted-lowry acid-base model. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2926–2936. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00210>
- Láng-Lázi, M., Dióspatonyi, I., Petz, D., Viczián, Z., & Fetter, G. (1999). Computer and multimedia in chemical engineering education. *Computers & Chemical Engineering*, 23, S637–S640. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(99\)80156-2](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(99)80156-2)
- Lou, A. J., & Jaeggi, S. M. (2020). Reducing the prior-knowledge achievement gap by using technology-assisted guided learning in an undergraduate chemistry course. *Journal of Research in Science Teaching*, 57(3), 368–392. <https://doi.org/10.1002/tea.21596>
- Macey, A., Gurguis, N., Tebboth, M., Shah, P. S., Chesi, C., Shah, U. V., & Brechtelsbauer, C. (2018). Teaching reaction kinetics with chemiluminescence. *Education for Chemical Engineers*, 22, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2017.12.001>
- Martí-Calatayud, M. C., García-Gabaldón, M., & Pérez-Herranz, V. (2012). Study of the effects of the applied current regime and the concentration of chromic acid on the transport of Ni<sup>2+</sup> ions through Nafion 117 membranes. *Journal of Membrane Science*, 392–393, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.12.012>
- Martí-Calatayud, M. C., García-Gabaldón, M., & Pérez-Herranz, V. (2018). Mass Transfer Phenomena during Electrodialysis of Multivalent Ions: Chemical Equilibria and Overlimiting Currents. *Applied Sciences*, 8(9), 1566. <https://doi.org/10.3390/app8091566>
- Martín, A., & Mato, F. A. (2008). Hint: An educational software for heat exchanger network design with the pinch method. *Education for Chemical Engineers*, 3, e6–e14.
- Martínez Pons, J. (2017). Preparación de una pintura como hilo conductor de un bloque didáctico temático. *Anales de La Real Sociedad Española de Química*, 113(2), 113–120.
- Paricio Royo, J. (2018). *Marco de desarrollo profesional del profesorado universitario. Planteamiento general y dimensiones*. Red Estatal de Docencia Universitaria, REDU. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rowe, L. (2017). Green Fluorescent Protein-Focused Bioinformatics Laboratory Experiment

- Suitable for Undergraduates in Biochemistry Courses. *Journal of Chemical Education*, 94(5), 650–655. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00533>
- Santafé Moros, A., Gozávez-Zafrilla, J. M., Toldrá-Reig, F., Catalán-Martínez, D., & Martí-Calatayud, M. C. (2019). Uso combinado de VBA y Solver de Excel para la realización de ejercicios de optimización en ficheros Excel fácilmente evaluables. In *IN-RED 2019. V Congreso de Innovación Educativa y Docencia en Red* (pp. 1178–1191). Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/inred2019.2019.10482>
- Santafé Moros, M. (2008). *Determinación de la situación mínima en extracción líquido-líquido a contracorriente (Laboratorio virtual de simulación)*. <https://bit.ly/2z9VmuF>
- Seidman, I. (2006). *Interviewing as qualitative research: A guide for researchers in education & the social sciences* (3rd ed.). Teachers College Press.
- Selmer, A., Kraft, M., Moros, R., & Colton, C. K. (2007). Weblabs in Chemical Engineering Education. *Education for Chemical Engineers*, 2(1), 38–45. <https://doi.org/10.1205/ece06018>
- Serrano-Perez, J. J. (2018). Aprender física y química “jugando” con laboratorios virtuales. *Revista de La Real Sociedad Española de Química*, 114(1), 40–41.
- Sevian, H., & Talanquer, V. (2014). Rethinking chemistry: A learning progression on chemical thinking. *Chemistry Education Research and Practice*, 15(1), 10–23. <https://doi.org/10.1039/c3rp00111c>
- Tomás Serrano, A., & Garcia Molina, R. (2017). Determinación de la constante de Avogadro mediante una experiencia de electrólisis realizada con productos de bajo coste. *Anales de La Real Sociedad Española de Química*, 113(1), 47–53.
- Vander-Griend, D. A. (2011). Equilibrator: Modeling chemical equilibria with Excel. *Journal of Chemical Education*, 88(12), 1727–1729. <https://doi.org/10.1021/ed200119e>
- Wu, N., Kubo, T., Hall, A. O., Zurcher, D. M., Phadke, S., Wallace, R. L., & McNeil, A. J. (2019). Adapting Meaningful Learning Strategies to Teach Liquid-Liquid Extractions. *Journal of Chemical Education*, 97(1), 80–86. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00717>

---

## INFORMACIÓN SOBRE LOS AUTORES

### Emma María Ortega Navarro

Universitat Politècnica de València

Doctora en ingeniera química por la Universitat Politècnica de València en 2003, Emma María Ortega obtuvo la plaza de profesora titular en 2011. Sus líneas de investigación están focalizadas en la ingeniería electroquímica, especialmente en reactores electroquímicos para la eliminación de contaminantes, en la síntesis de materiales para la producción de hidrógeno mediante electrólisis alcalina y en pilas de combustible tipo PEM. Ha participado en 33 proyectos de investigación, siendo investigadora principal en uno de ellos. Tiene 62 artículos y ha realizado contribuciones científicas en 82 congresos. En referencia a sus labores docentes, imparte asignaturas en el grado y el máster de ingeniería química de la UPV (cinética química y catálisis, operaciones de separación, hidrógeno y pilas de combustible, entre otras). Es autora de 5 publicaciones docentes. Además, ha dirigido 18 proyectos final de carrera, 7 trabajos fin de grado y 2 trabajos fin de máster. También ha dirigido 2 tesis doctorales.

### Manuel César Martí Calatayud

Universitat Politècnica de València



Profesor ayudante doctor en el departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la Universitat Politècnica de València desde enero de 2019. Se doctoró en Ingeniería Química en noviembre de 2014, consiguiendo la máxima calificación y recibiendo el Premio Extraordinario de Tesis Doctoral por la Universitat Politècnica de València. Ha desarrollado su carrera científica dentro del campo de procesos de membrana y electroquímica. Realizó una estancia investigadora de 6 meses en el instituto Chemical Process Engineering de la RWTH Aachen University (Alemania). Ocupó una plaza de investigador postdoctoral en la misma universidad durante 2,5 años, donde expandió sus intereses de investigación a los tratamientos de agua mediante biorreactores de membrana. M.C. Martí también recibió el premio Accésit como joven investigador "Valencia Idea 2013" en la categoría "Energía y Medio Ambiente". Después de su etapa en Alemania, obtuvo un contrato postdoctoral en convocatoria competitiva en la UPV. Como consecuencia de sus actividades investigadoras, M.C. Martí ha publicado más de 19 artículos, y tiene más de 450 citas y un índice h de 11. Además de sus actividades científicas, ha participado en tareas docentes en los dos países donde ha desarrollado su carrera.

### **Valentín Pérez Herranz**

Universitat Politècnica de València

El profesor Valentín Pérez comenzó su carrera científica investigando en el campo de los mecanismos de corrosión electroquímicos en LiBr. Posteriormente, realizó su tesis doctoral sobre el modelado de reactores electroquímicos con electrodos tridimensionales. Desde entonces, ha trabajado en el campo de la ingeniería electroquímica, principalmente en aplicaciones medioambientales (tratamiento de efluentes con reactores electroquímicos y degradación de compuestos orgánicos) y de energía (producción de hidrógeno y pilas de combustible). Sus resultados de investigación se han difundido a través de 150 artículos científicos en revistas de prestigio, en congresos internacionales, mediante la publicación de libros y capítulos de libros y con la publicación de 4 patentes. Tiene más de 2700 citas, con un promedio de 182 citas por año en los últimos 5 años. Esto genera un índice h de 24. En los últimos 10 años ha participado en 15 proyectos de I + D financiados por instituciones regionales y nacionales como investigador principal. Ahora, participa en el proyecto financiado por la Unión Europea LIFE-2-ACID. A través de la Red de Excelencia "Aplicaciones Ambientales y Energéticas de la Tecnología Electroquímica" (E3TECH: <https://rede3tech.org/english/>), mantiene relaciones con la mayoría de los grupos de investigación españoles en electroquímica. Ha dirigido 18 tesis doctorales.

### **Montserrat García Gabaldón**

Universitat Politècnica de València

Montserrat García Gabaldón comenzó su formación investigadora en el campo de los reactores electroquímicos, donde realizó su Tesis Doctoral sobre el estudio electroquímico y la recuperación de metales (Sn y Pd) mediante un reactor electroquímico. Desde entonces, ha trabajado en el campo de la ingeniería electroquímica, principalmente en aplicaciones ambientales para la eliminación y recuperación de metales, así como en la aplicación de oxidación electroquímica avanzada para eliminar contaminantes orgánicos emergentes. En este campo, actualmente está participando como investigadora en un Proyecto de Investigación financiado por la Unión Europea (LIFE-2-ACID). Asimismo, ha sido Investigadora Principal de 3 Proyectos de Investigación, ha participado en 2 Contratos con Empresas y fue la ganadora del Premio Accesit de la VII Valencia Ideas 2013 en la categoría de Energía y Medio Ambiente. La difusión de su investigación se ha realizado a través de 40 publicaciones en revistas de prestigio y en congresos internacionales, contando con 639 citas y un índice h de 16. Ha realizado diferentes estancias postdoctorales: en el Imperial College de Londres y en la Universidad Federal de Rio Grande do Sul; y una estancia predoctoral en la Universidad de Stanford. Asimismo, ha co-dirigido 2 Tesis Doctorales.

### **Jordi Carrillo Abad**

Universitat Politècnica de València

Doctorado en Ingeniería Electroquímica (UPV, 2014) mediante el programa Vali+d (2010) de la GV donde estudió la recuperación del Zinc de los baños agotados de decapado mediante técnicas electroquímicas. Trabajó durante 4 meses en la Universidad Jaume I como

investigador en un proyecto de caracterización electroquímica de materiales fotosensibles. Mediante la ayuda post-doctoral del programa Vali+d (2015) continuó con la implantación a planta piloto del proceso estudiado durante la tesis en la UPV con una estancia de 1 año en la Universidad de Cantabria (UC). Durante esta estancia trabajó en la electro-oxidación de un compuesto perfluorado presente en los baños de decapado. Posteriormente, estuvo contratado 5 meses en la UC bajo el proyecto GRADISAL (2017) que consistía en el estudio de una planta de electrodiálisis reversa para la generación de energía eléctrica. Actualmente, se encuentra trabajando a cargo del proyecto europeo LIFE2ACID, que consiste en la implantación de un sistema industrial de recuperación del zinc de los baños agotados mediante la combinación de un proceso de membranas y un reactor electroquímico. Fruto de ello, ha publicado 13 artículos con más de 220 citas y un índice h de 7.



Los textos publicados en esta revista están sujetos a una licencia de Reconocimiento 4.0 España de Creative Commons. Puede copiarlos, distribuirlos, comunicarlos públicamente y hacer obras derivadas siempre que reconozca los créditos de las obras (autoría, nombre de la revista, institución editora) de la manera especificada por los autores o por la revista. La licencia completa se puede consultar en: [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartir por igual 4.0 Internacional](#).