



INVESTIGACIÓN EDUCATIVA

Una evaluación alternativa del tema titulación ácido-base a través de una simulación



Andrés Raviolo* y Andrea Farré

Universidad Nacional de Río Negro, Bariloche, Argentina

Recibido el 21 de septiembre de 2016; aceptado el 9 de enero de 2017

Disponible en Internet el 27 de marzo de 2017

PALABRAS CLAVE

Evaluación alternativa;
Simulación;
Titulación ácido-base

Resumen En este trabajo se muestran los resultados obtenidos de una actividad didáctica, basada en la proyección de una simulación, en el contexto de una instancia final de evaluación, integradora y conceptual, del tema de titulaciones ácido-base. Esta experiencia se llevó a cabo con posterioridad a que estudiantes universitarios de primer año acudieran a clases teóricas, de problemas, laboratorio y evaluación tradicional. Se indagó cómo los alumnos identificaban los distintos materiales y entidades que muestra la simulación y cómo establecían relaciones conceptuales adecuadas entre ellos. Para analizar los resultados, la muestra se dividió en 2 grupos de acuerdo a si contaban con el examen parcial, de la asignatura química general, aprobado o desaprobado. Surgieron interesantes conclusiones sobre lo que sucede cuando los estudiantes tienen que extraer datos de una simulación para resolver problemas de formato tradicional.

© 2017 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

KEYWORDS

Alternative evaluation;
Simulation;
Acid-base titration

An alternative evaluation of acid-base titrations through a simulation

Abstract This work shows the results of a learning experience on acid-base titrations, based on the projection of a simulation, in the context of an integrating and conceptual final evaluation. This activity was done after the first year university students attended theoretical, problem-solving and lab lessons and were subjected to traditional evaluation. Students were inquired about how they had identified the different materials and entities shown in the simulation and how they had established adequate conceptual links between them. In order to evaluate the results, the sample was divided in two groups depending on whether the participants had approved or not the General Chemistry mid-term evaluation. Interesting conclusions came up about

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: araviolo@unrn.edu.ar (A. Raviolo).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

what happens when students have to draw information from a simulation to solve traditional format problems.

© 2017 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

El lenguaje natural de la ciencia es una combinación de palabras, diagramas, imágenes, gráficas, ecuaciones, tablas y otras formas de representación visual y matemática (Lemke, 2002). Este autor afirma que la enseñanza de la ciencia se realiza a través de estos diversos lenguajes, es decir a través de una comunicación multimedia, y que surgen dificultades cuando no se forma a los alumnos, y mucho menos se los evalúa, en esos lenguajes. Por ello, insta a «enseñar todos los lenguajes de la ciencia: palabras, símbolos, imágenes y acciones».

La mayoría de las imágenes que se abordan en clases de ciencias, ya sean estáticas (como fotos y diagramas) o dinámicas (animaciones y simulaciones) combinan varios de estos lenguajes. Muchos diagramas y simulaciones tienen la dificultad intrínseca de que muestran simultáneamente elementos que forman parte de distintos niveles de representación (Johnstone, 1982; Russell et al., 1997): macroscópico, submicroscópico, simbólico y gráfico.

Particularmente las simulaciones son programas que permiten poner en funcionamiento un modelo de un proceso o fenómeno. Tienen la ventaja, con respecto a los experimentos reales, que permiten aproximarse a fenómenos complejos, inaccesibles, peligrosos, extremadamente lentos o extremadamente rápidos. Admiten distintos grados de intervención del usuario, que en muchos casos puede manipular algunas de las condiciones «experimentales» (por ejemplo: los parámetros iniciales) y observar instantáneamente el resultado de esta manipulación a través de animaciones, gráficos y resultados numéricos (Raviolo y Alvarez, 2012). En este contexto, un modelo es concebido como mediador entre la teoría y el fenómeno, cuyas funciones principales son las de describir, explicar y predecir.

Las simulaciones suelen estar acompañadas de animaciones que permiten visualizar los procesos a través de imágenes dinámicas. La diferencia entre una simulación y una animación radicaría en que en una animación el usuario no tiene el control para manipularla y, generalmente, la animación resalta aspectos cualitativos, en cambio, en una simulación sí tiene el control y muestra relaciones cuantitativas. Sin embargo, suele denominarse a ambos tipos de imágenes dinámicas como simulaciones aunque simular es más que visualizar, dado que muchas simulaciones, como experimentos virtuales, permiten desarrollar un conjunto de procedimientos complejos que van más allá del empleo de técnicas rutinarias. Ejemplos de los procedimientos que se pueden llevar a cabo con ellas son: plantear hipótesis, diseñar experiencias, controlar variables, realizar observaciones (en pantalla), realizar medidas (virtuales), analizar

resultados, establecer comparaciones, sacar conclusiones. La complementariedad entre los experimentos virtuales y los experimentos reales enriquece el proceso de enseñanza y aprendizaje de las ciencias, ya que el uso de simulaciones no reemplaza el trabajo con material concreto en el laboratorio.

Además, este tipo de representaciones son claves para identificar los componentes relevantes de un sistema y esta identificación es esencial para establecer relaciones entre dichos componentes y por lo tanto comprender el fenómeno estudiado. Esto ocurre porque en la simulación, como en toda representación externa, se amplifican ciertos rasgos y se simplifican otros. De esta manera, la simulación ayuda a resaltar y enfocar rasgos relevantes del fenómeno y sus relaciones, favoreciendo la construcción de modelos mentales adecuados sobre el funcionamiento de un sistema (Eilam y Poyas, 2010).

No caben dudas de que las simulaciones y animaciones en la clase de química motivan a los alumnos. Aunque el desafío más importante es superar su uso anecdótico y generar actividades que fomenten aprendizajes conceptuales (Coll, 2009). En este sentido, las simulaciones pueden ayudar en la integración de los aspectos teóricos y prácticos en un curso de química, especialmente en el nivel universitario, en donde los distintos momentos de enseñanza pueden estar a cargo de diferentes personas y, así, brindar una discusión teórica y modelada de problemas y una explicación teórica a experimentos realizados en laboratorio.

Recientemente se ha puesto el foco en las estrategias de evaluación, señalando que deben ser revisadas para adecuarlas a las necesidades de este siglo. Con lo cual se hace imprescindible incluir las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) para poder evaluar competencias que son imposibles de valorar sin la ayuda de estas tecnologías (Redecker y Johannessen, 2013). Así, las actividades con TIC pueden servir para evaluar tanto el proceso como el producto del aprendizaje, y en el caso específico de las simulaciones, pueden emplearse como un recurso para plantear situaciones conceptuales que favorezcan el aprendizaje y la integración de los conceptos tratados de manera que la evaluación resulte formativa. Es decir, realizando una evaluación en donde el análisis de la evidencia recolectada le permita a los estudiantes reflexionar e implementar acciones para mejorar su comprensión de los contenidos (Talanquer, 2005). En este sentido, Santos Benito et al. (2003) instan a prestar atención al tipo de actividades de evaluación teniendo en cuenta: (a) las destrezas que fomentan (si favorecen las de alto nivel intelectual), (b) su influencia sobre las actitudes y la autorregulación del aprendizaje de los alumnos y (c) la forma de valoración, para que

sea indicadora de lo que se ha avanzado y de lo que falta por hacer, y, sobre todo, para que oriente hacia el logro de un producto satisfactorio.

En general, las evaluaciones tradicionales de la química consisten en pruebas escritas individuales en las que se suele hacer hincapié en la resolución de ejercicios/problemas. La investigación educativa ha comprobado que la resolución algorítmica o numérica de un problema no implica la comprensión de los conceptos implicados y, en particular, la comprensión a una escala submicroscópica o de partículas (átomos, moléculas, iones). Muchos estudios han comprobado que alumnos que resuelven bien problemas empleando algoritmos o ecuaciones, no siempre visualizan ni comprenden los conceptos químicos que están detrás. Uno de los trabajos más conocidos de esta línea es el de Nurrenbern y Pickering (1987). Estos autores administraron a estudiantes universitarios de un curso de química general, para los temas gases y estequiometría, 2 tipos de problemas: (a) problemas tradicionales, del tipo matemático-algorítmico y (b) problemas conceptuales, con la utilización de representaciones de partículas. Los resultados de este estudio mostraron que los estudiantes tenían notablemente más éxito en el primer tipo de problemas que en el segundo; es decir, resolvían problemas algorítmicos sin una verdadera comprensión conceptual del mismo, en este caso sin un conocimiento profundo de la naturaleza de un gas o de la naturaleza del cambio químico.

Robinson y Nurrenbern (1990) definen las cuestiones conceptuales como las que requieren del estudiante la creación de una respuesta que va más allá del simple recuerdo o la activación de un algoritmo. Las cuestiones conceptuales poseen mayor demanda cognitiva dado que el estudiante tiene que sintetizar respuestas o evaluar un problema para seleccionar las estrategias y herramientas necesarias para arribar a una solución. En química la comprensión conceptual está ligada a habilidades de modelización: predecir lo que va a ocurrir, explicar cómo y por qué algo ocurre, poder justificar una elección, extraer datos útiles de un exceso de información, etc. (Halakova y Proksa, 2007).

En este trabajo empleamos una simulación en una instancia de evaluación formativa del tema de titulaciones ácido-base, la cual fue llevada a cabo con posterioridad a que los estudiantes acudieran a clases teóricas, de problemas, laboratorio y a la evaluación tradicional. La intención fue que esta actividad de visualización de una simulación sea de utilidad a todos los alumnos, y en especial que facilite la comprensión de la temática de aquellos alumnos que no obtuvieron buen resultado en el primer examen parcial de la asignatura que cubría el tema de titulaciones ácido-base. En particular, interesó evaluar los aprendizajes conceptuales, que están relacionados con la integración de los distintos lenguajes y modos de representación, en la comprensión de este procedimiento químico. Se eligió este tema porque resulta de difícil comprensión por varias razones, las cuales serán detalladas en el apartado siguiente.

Dificultades en la comprensión y alcances de los conceptos abordados

Sheppard (2006) afirma que la temática ácido-base es conceptualmente densa porque requiere una comprensión integrada de muchas áreas de la química general, tal

como: naturaleza corpuscular de la materia, teoría cinético-molecular, naturaleza y composición de las disoluciones, estructura atómica, ionización, enlaces iónicos y covalentes, símbolos, fórmulas y ecuaciones, equilibrio químico y teoría de colisiones. En su estudio, que indaga cómo los estudiantes comprenden una titulación ácido-base, halló que el conocimiento conceptual de los estudiantes carecía de coherencia y precisión predictiva debido a una considerable dificultad en el dominio de la química subyacente.

En las reacciones ácido-base surgen concepciones alternativas encontradas para el cambio químico en general (Andersson, 1990); por ejemplo, en el estudio de Sheppard (2006) se halló que muchos estudiantes consideran la reacción de neutralización como una mezcla física, donde no se identifican los productos (la neutralización estaría determinada por un número relativo de las partículas y no por la interacción entre ellas) o le otorgan un rol especial a alguno de los reactivos (consideran al ácido como más «poderoso» o «dominante» que la base). Al analizar la curva de titulación de una base fuerte con un ácido fuerte, ante el poco cambio de pH que ocurre al comienzo, algunos estudiantes afirman que los reactivos se mezclaron pero que la reacción todavía no se produjo, que la reacción comienza cuando se produce el cambio brusco de pH. Esto último indicaría una dificultad de percibir el cambio químico a nivel molecular como producto de colisiones.

Los estudiantes sostienen que el producto final de una titulación ácido-base es siempre una disolución neutra ($\text{pH} = 7$), es decir identifican el punto final con la obtención de una disolución neutra (Jiménez-Liso y de Manuel, 2002). Esto se cumple solo para titulaciones de ácido fuerte y base fuerte. Para una titulación de un ácido débil con una base fuerte por ejemplo, cuando la reacción se completa, el pH dependerá de la extensión de la hidrólisis formada y será mayor que 7. Estos autores sostienen que existen problemas terminológicos, como los sentidos cotidianos que se le asignan a la palabra neutralizar (como el de contrarrestar), por ejemplo que el azúcar neutraliza el sabor ácido de una salsa de tomate, que pone de manifiesto un aspecto macroscópico relacionado con la percepción del sabor. Jiménez-Liso y de Manuel aconsejan, entonces, para las reacciones ácido-base, restringir la palabra neutralización a los procesos que conducen a un resultado final neutro.

Cokelez (2010) también sugiere evitar el término neutralización en la enseñanza de las reacciones ácido-base. Para otros autores, como Furió, Calatayud y Bárcenas (2000), esto no es conveniente dado que conlleva ignorar los usos cotidianos de la palabra, una tarea escolar poco redituable. Desde una perspectiva macroscópica se considera la neutralización de los ácidos por las bases, o viceversa, como la desaparición de sus propiedades respectivas al formarse las sales. Este referencial empírico o fenomenológico es esencial para que los estudiantes se imaginen lo que se intenta explicar (Furió et al., 2000)). Estos autores sugieren que se enseñe la teoría de Arrhenius porque, además de no suponer un obstáculo en el aprendizaje de otras teorías, permite diferenciar claramente los procesos de neutralización y de hidrólisis. En consecuencia, en las sucesivas aproximaciones en la enseñanza de las titulaciones ácido-base será pertinente diferenciar 3 puntos: punto de equivalencia (situación estequiométrica), punto final de la titulación (cambio de color del indicador) y punto de neutralización

(cuando $\text{pH}=7$). Para una titulación de ácido fuerte y base fuerte, con indicador adecuado (ejemplo fenolftaleína), los 3 puntos coinciden.

Por otro lado, para muchos estudiantes el concepto de concentración no resulta sencillo. Entender que para una disolución la concentración es una propiedad intensiva, que por ejemplo si se retira un poco de la misma lo que queda sigue teniendo la misma concentración; si se agrega agua a la solución la concentración disminuye; si se agrega soluto a la solución la concentración aumenta. Es decir que la concentración es inversamente proporcional al volumen de la disolución (a cantidad de soluto constante) y que es directamente proporcional a la cantidad de soluto (a volumen de disolución constante). La investigación realizada, con alumnos del CBC de la UBA, por Bekerman, Vaccaro, Pepa, Calleri y Galagovsky (2015) empleando una simulación sobre concentración que abordaba estos aspectos, reveló que, a pesar del trabajo realizado con la simulación, las dificultades en estos aspectos básicos persistieron en un grupo considerable de alumnos.

En concordancia con lo anterior, Sheppard recomienda, dada la densidad y complejidad conceptual del tema ácidos-bases y el corto tiempo generalmente disponible, reducir la cantidad de información que se abarca en cursos introductorios de química y abordar algunos aspectos seleccionados. Carlton (1997) sugiere dedicarle más tiempo a las reacciones ácido-base antes de introducir aspectos relacionados con el equilibrio químico.

En el caso que nos atañe, al momento de realizar esta experiencia, en la primera asignatura de química general que cursan los alumnos, los contenidos desarrollados sobre esta temática se limitaron a:

- Disoluciones de ácidos y bases fuertes, modelo de Arrhenius.
- Reacciones químicas, reacciones ácido-base, titulaciones de ácidos fuertes y bases fuertes.
- Representaciones submicroscópicas (moléculas, iones) y simbólica de ácidos, bases y sus reacciones (ecuación química, iónica y iónica neta).
- Estequiometría, punto de equivalencia, neutralización.

Teniendo en cuenta estos alcances de los contenidos abordados, en este estudio se investiga el efecto de la observación de una simulación, que facilita la visualización e integración de dichos contenidos, y los resultados obtenidos al emplearla como evaluación final de la temática.

Metodología

Preguntas de la investigación

¿Qué resultados se obtienen en una evaluación alternativa basada en la observación de una simulación del tema de titulación ácido-base?

¿Qué correlaciones existen entre los resultados obtenidos en esta actividad con la simulación y los resultados obtenidos por estos alumnos en otras instancias, por ejemplo en el examen parcial de la asignatura química?

¿Qué diferencias se aprecian en logros y en dificultades en los alumnos que aprobaron el examen y los que reprobaron?

¿Cómo influyen en la resolución conceptual del problema los aspectos que perciben o priorizan de la información visual que brinda la animación?

¿Cómo los estudiantes identifican los materiales y entidades que muestra la simulación y cómo establecen relaciones conceptuales apropiadas entre ellos?

¿Cómo identifican el nivel de representación al que pertenece cada material o entidad que aparece en la pantalla y logran establecer relaciones adecuadas entre estos niveles de representación?

Sobre la base del poder visual e integrador de la simulación empleada, se espera que en las descripciones de lo que se visualiza en la simulación no haya diferencias entre ambos grupos de alumnos (con examen parcial aprobado y con examen parcial reprobado), dado que en la puntuación y análisis de estas descripciones se tendrá en cuenta fundamentalmente aspectos conceptuales cualitativos que emergen de la simulación; en cambio, en el examen parcial se evaluaron aspectos más cuantitativos y algorítmicos.

Muestra

Participaron de este estudio 54 estudiantes universitarios de San Carlos de Bariloche: de ellos 15 alumnos cursaban Introducción a la Química, materia de primer año de los profesados de Química y de Física, de la Universidad Nacional de Río Negro, y 39 alumnos cursaban Química General I, materia de primer año de la Licenciatura en Biología, Universidad Nacional del Comahue, y en ambos casos el equipo de cátedra es el mismo. Ambos cursos recibieron la misma enseñanza que sigue sistemáticamente el texto Química, de Raymond Chang.

Los estudiantes habían visto el tema titulación a través de clases teóricas, ejercicios numéricos y una práctica de laboratorio. Las titulaciones realizadas en el laboratorio ($\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{HCl}$ y NaOH/HCl) no incluyeron uso de peachímetro. El algoritmo de cálculo de pH no fue abordado a esta altura del curso.

Tanto las clases teóricas como los ejercicios numéricos siguen la secuencia planteada por el libro de texto (capítulos 1 al 4). El examen parcial de la asignatura química abarcó los temas: masa atómica, masa molar, estequiometría, reactivo limitante y en exceso, reacciones de precipitación, ácido-base y de óxido-reducción, concentraciones de disoluciones, preparación de disoluciones y titulaciones.

Esta evaluación se administró en los primeros días del mes de mayo, por lo cual los alumnos de primer año cuentan con unas 8 semanas de asistencia a la universidad.

Simulación empleada

En esta experiencia se utilizó la simulación «Titulación ácido base», de la página web de Química de Chang, 11.ª edición, capítulo 16 (Student Center, Animations). En la simulación se presenta una titulación de un volumen de solución de ácido fuerte (ácido clorhídrico en el Erlenmeyer) con una disolución de base fuerte (hidróxido de sodio en la bureta). Una captura de pantalla se muestra en la figura 1. A esta simulación se accede en:

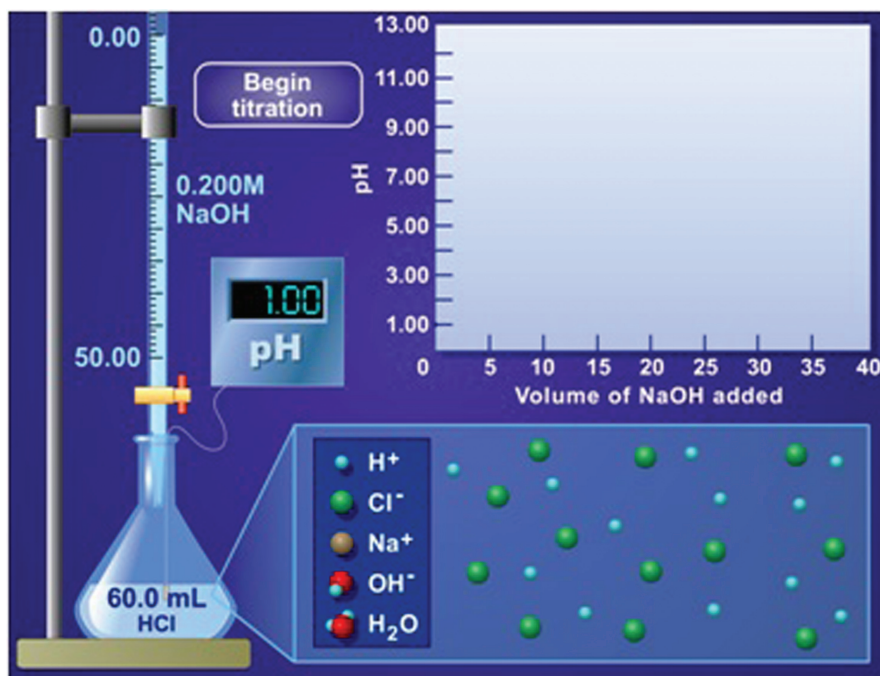


Figura 1 Captura de pantalla de la simulación utilizada.

http://glencoe.mheducation.com/olcweb/cgi/pluginpop.cgi?it=swf::640::480::/sites/dl/free/0076656101/931055/Acid_Base_Titration.swf::Acid-Base_Titrations

En la simulación se muestran aspectos pertenecientes a los 4 niveles de representación. A nivel macro se aprecia la bureta, el Erlenmeyer, el peachímetro y las disoluciones. A nivel gráfico se presenta un gráfico cartesiano de pH vs. volumen de NaOH agregado. A nivel submicroscópico se muestran los iones y moléculas, modelados con esferas sólidas (las moléculas de agua de la disolución no aparecen). A nivel simbólico se aprecia que la simulación muestra las fórmulas de las siguientes entidades: NaOH, HCl, H⁺, Cl⁻, Na⁺, OH⁻ y H₂O. La ecuación química ajustada no figura en la simulación, aunque se agregó en las capturas de pantalla entregadas en el instrumento.

Instrumento

El cuestionario consta de 3 hojas:

Primera hoja. Consigna: «Etiquetar con los nombres de los distintos materiales o entidades» (fig. 2).

Segunda hoja: Consigna: «Etiquetar con los distintos niveles de representación: macro, simbólico, submicro y gráfico» (fig. 3).

Tercera hoja. Una actividad: «En un texto no menor a 15 renglones desarrolle lo que muestra la simulación». Dos preguntas: «¿Qué es una titulación?» y «¿A qué resultado final se arribaría en esta titulación? Explique».

Las 2 primeras hojas del cuestionario se justifican en la premisa de que identificar los componentes relevantes del sistema es esencial para establecer relaciones entre dichos componentes y por lo tanto comprender el fenómeno

estudiado. La tercera hoja brinda el espacio para que se expliciten esas relaciones.

Si bien interesa la discusión cualitativa de las respuestas dadas por los estudiantes, se construyó una escala cuantitativa con el fin de poder otorgar un puntaje a la comprensión de cada estudiante del fenómeno luego de interactuar con la simulación. Esta escala se elaboró por un proceso de discusión luego de que ambos investigadores analizaran los resultados en forma independiente, acordándose 10 ítems (Ver tabla 1). Cada uno de ellos se valoró con un punto (total 10) y, de esta manera, no se dio prioridad a la obtención del resultado numérico final de la concentración incógnita del ácido (0.100 M) sino a aspectos conceptuales y cualitativos.

Diseño

La simulación se proyecta con el cañón al grupo de alumnos. Se les solicita atención a los alumnos dado que van a tener que escribir sobre lo que ven en la simulación proyectada.

Se pasa varias veces antes de repartir el cuestionario, siempre hasta que se alcanza un pH de 12.02, es decir después del agregado de 35 mL de NaOH. Se pasa sin sonido, ya que está en idioma inglés, de manera que los estudiantes quedan solamente expuestos al estímulo visual.

Se les pide que contesten las actividades del cuestionario en el orden en que están las páginas: hoja 1, 2 y 3 sucesivamente.

Mientras contestan las 2 primeras hojas se deja la imagen correspondiente a la captura de pantalla que se imprimió (hojas 1 y 2), a la situación de pH = 1.93.

Luego se pasa la simulación tantas veces como fuera solicitado por los alumnos, al contestar la hoja 3.

Los estudiantes contestan el cuestionario en forma individual, en silencio y sin formular preguntas.

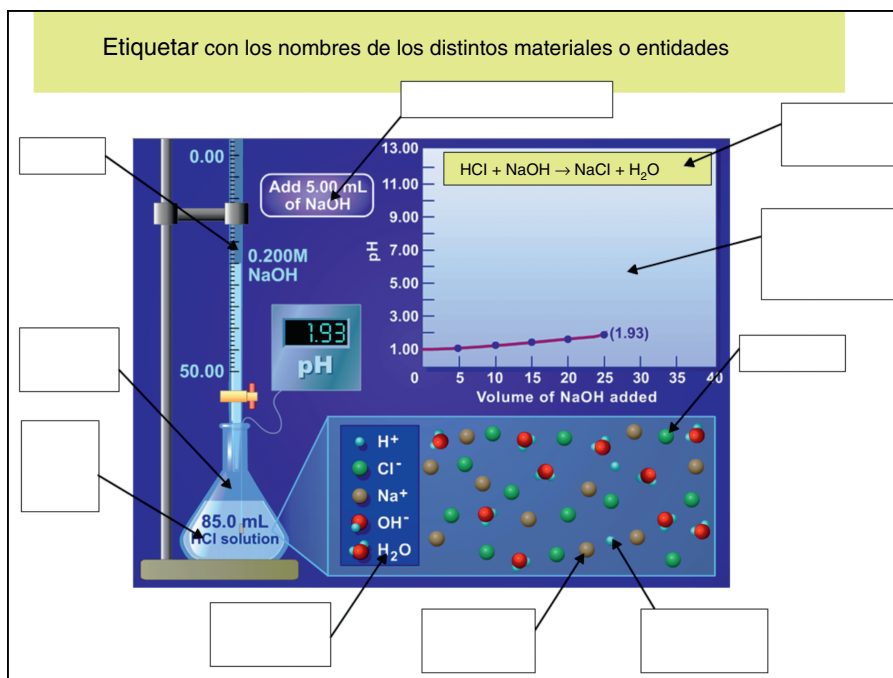


Figura 2 Actividad de etiquetado 1, hoja 1 del cuestionario.

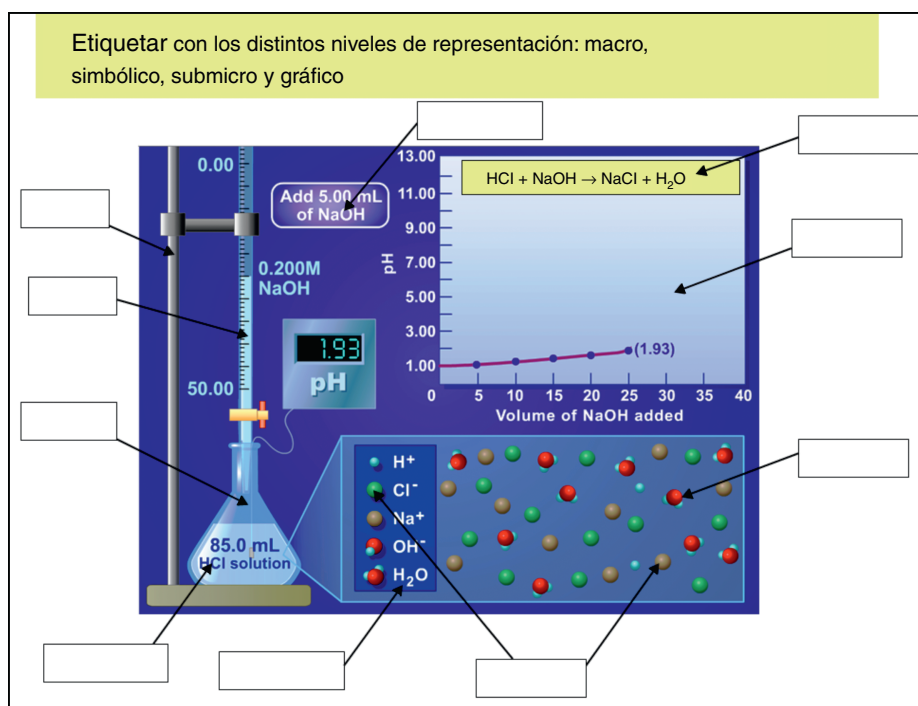


Figura 3 Actividad de etiquetado 2, hoja2 del cuestionario.

Resultados

A continuación se detallan los ítems analizados de las respuestas de los estudiantes a la hoja 3 del cuestionario y los porcentajes de aparición en las respuestas:

Los resultados obtenidos para la totalidad de la muestra se detallan en la tabla 2, que incluye los valores promedios y desviación estándar de: (1) nota obtenida en el primer

parcial de la asignatura química, (2) nota obtenida en el ítem evaluado sobre titulación en dicho parcial, (3) resultado obtenido en la primera hoja del cuestionario (etiquetado de materiales y entidades), (4) resultado obtenido en la primera hoja del cuestionario teniendo en cuenta si categoriza correctamente las entidades (si corresponde a una disolución, molécula, ion), (5) resultado obtenido en la segunda hoja del cuestionario (etiquetado según niveles

Tabla 1 Ítems evaluados y porcentaje de aparición

N.º	Ítem analizado	Porcentaje de aparición
1	Comprende objetivo final de la simulación: determinar la concentración de la disolución de ácido clorhídrico	43
2	Menciona explícitamente que se trata de una reacción ácido-base o titulación ácido-base	70
3	Hace referencia a alguno de los términos: neutralización, neutro o punto de equivalencia	76
4	Realiza la descripción submicroscópica: los iones H ⁺ se combinan con los iones OH ⁻ para formar moléculas de H ₂ O	61
5	Comprende la relación de la escala de pH con la acidez: Un aumento de pH indica una disolución menos ácida o más básica	70
6	Escribe la ecuación química ajustada	33
7	Brinda una definición aceptable de titulación	69
8	Arriba al resultado final: 0.100 M	17
9	Menciona que el volumen final o de neutralización es 30 mL, o lo emplea en el cálculo	33
10	Expresa la relación estequiométrica: 1 mol de HCl reacciona con 1 mol de NaOH	31

Tabla 2 Resultados generales obtenidos

N	Estadístico	Primer parcial Química	Ejercicio titulación del parcial	Hoja etiquetado 1	Hoja etiquetado 1 con categoría	Hoja etiquetado 2	Puntaje cuestionario simulación
54	Promedio	5.5	5.1	8.9	6.2	7.9	5.1
	Desv. est.	3.3	3.8	1.7	2.1	2.5	2.7

de representación (macro, micro, simbólico y gráfico) y (6) el puntaje otorgado en el análisis de las respuestas a las tareas de la hoja 3 del cuestionario (según criterios tabla 1). Todas las variables con un rango de 0 a 10.

Para la totalidad de los estudiantes se observa una correlación positiva entre el resultado obtenido en el primer parcial de química (que evalúa la resolución de problemas) y el cuestionario final de la simulación ($R^2 = 0.67$).

Para dar respuesta a las preguntas de esta investigación se dividió la muestra (N = 54) en 2 grupos de acuerdo a la nota obtenida en el primer parcial de química (puntaje máximo 10): grupo parcial aprobado (6 o superior) y grupo parcial reprobado (menor a 6). Los resultados promedios y desviación estándar para cada uno de estos 2 grupos, y para las 7 variables consideradas (puntaje de 0 a 10) se aprecian en la tabla 3.

El contraste multivariado T de Hotelling ($F = 744$, 5 g.l., $p < 0.05$) indica la existencia de diferencias significativas entre las medias de las variables dependiente (las últimas 5 de la tabla) de todos los grupos del análisis para el efecto respectivo (examen parcial aprobado o reprobado).

El 81% de los estudiantes con el parcial aprobado obtuvo también un puntaje mayor o igual a 6 en el cuestionario de la simulación. De los alumnos con parcial reprobado solo 2 alumnos obtuvieron puntaje igual o superior a 6 en el cuestionario. Analizando más profundamente el puntaje obtenido, se observó que la mayoría de los alumnos que aprobaron el parcial, al ser evaluados con la simulación pudieron reconocer el cambio del pH en el proceso (ítem 3

e ítem 5: 92%) y por lo tanto clasificar la titulación o la reacción como ácido-base (ítem 2: 88%), definir la titulación y reconocer su objetivo (ítem 7 e ítem 1: 85%), describir lo visualizado a nivel submicroscópico (ítem 4: 77%), y en menor medida reconocer el volumen final y mencionar la relación 1 a 1 entre el ácido clorhídrico y el hidróxido de sodio (ítem 9 e ítem 10: 58%). En tanto, entre los alumnos que reprobaban el examen se pudo evidenciar una mayor dispersión en cuanto a los ítems mencionados, y solo en 3 superaron el 50%: indicaron la neutralidad (ítem 3: 60%), definieron a la titulación (ítem 7: 56%) y reconocieron que se trata de una reacción o titulación ácido-base (ítem 2: 52%).

Solo 9 estudiantes (17%) realizaron una resolución algorítmica correcta del problema, es decir arribaron a la respuesta final de la concentración del ácido clorhídrico (0.100 M). Estos alumnos tuvieron puntajes altos en el cuestionario y en el parcial de química.

Otros resultados se presentan incorporados en las siguientes discusiones.

Discusión

Resolución algorítmica de problemas versus resolución conceptual

Dentro de esta línea de investigación de la didáctica de la química, Robinson y Nurrenbern (1990) identifican 6 tipos de

Tabla 3 Resultados obtenidos por cada grupo de estudiantes

Grupo	N	Estadístico	Primer parcial Química	Ejercicio titulación del parcial	Hoja etiquetado 1	Hoja etiquetado 1 con categoría	Hoja etiquetado 2	Puntaje cuestionario simulación
Parcial de Química aprobado	26	Promedio	8.3	8.1	9.5	7.2	9.1	7.3
		Desv. est.	1.4	2.4	0.6	1.6	1.4	1.5
Parcial de Química reprobado	28	Promedio	2.6	1.9	8.4	5.3	6.7	3
		Desv. est.	1.7	2	2.1	2.2	2.7	1.5

cuestiones conceptuales, 3 de las cuales son cubiertas en la experiencia realizada con la simulación, lo que da cuenta de su orientación conceptual:

- (1) Cuestiones con partículas que representan una situación química, donde se utilizan círculos o esferas de diferentes colores y tamaños para representar átomos o moléculas.
- (2) Resolución de cuestiones de laboratorio, donde los estudiantes usan tablas, gráficos y otros datos para predecir o explicar lo que ocurre en una situación experimental.
- (3) Cuestiones sobre demostraciones, que solicitan a los alumnos respuestas a preguntas formuladas a partir de la observación de una demostración, vídeo o simulación.

El 52% del total de los estudiantes respondió la pregunta final de la hoja 3 («¿A qué resultado final se arribaría en esta titulación? Explique») sin realizar cálculos. Ninguno utilizó la ecuación de $[H^+] = 10^{-pH}$, con la cual hubieran arribado a la concentración de 0.100 M, dado que todavía no se había enseñado. Como señalamos, solo 9 estudiantes (17%) llevaron adelante una resolución algorítmica correcta del problema, arribando a la respuesta final de la concentración del ácido clorhídrico de 0.100 M; estos alumnos poseen un conocimiento procedimental y conceptual del tema. Llama la atención que ningún alumno arribara al resultado final de la titulación por estimación mental, lo que estaría indicando cierta dificultad para hacerlo. Razonamientos del tipo: «se gastaron 30 mL de NaOH 0.200 M para neutralizar 60 mL de HCl, por lo tanto es la mitad de concentrado (0.100 M) dado que la relación es 1 mol a 1 mol». Esta dificultad ya se había manifestado en la instancia anterior de laboratorio cuando se solicitó una anticipación del volumen a gastar en las 2 titulaciones que los estudiantes llevarían a cabo.

Una causa de estos inconvenientes puede radicar en la dificultad en inferir de la simulación el dato significativo del volumen final o de neutralización, solo 19 estudiantes (35%) mencionaron 30 mL como volumen final y/o lo utilizó para resolver el problema. De hecho, 8 de los alumnos evaluados (15%) utilizaron erróneamente como volumen de neutralización el volumen de 35 mL, que es el volumen hasta el cual se mostró la simulación. Por otra parte, 18 alumnos (33%) hicieron explícita la relación 1 mol de NaOH a 1 mol de HCl, relación esencial para plantear los cálculos.

Los alumnos que obtuvieron buenos puntajes en la actividad con la simulación (resolución conceptual) también lo hicieron en el parcial correspondiente de la materia (resolución algorítmica). El ítem sobre titulación del examen parcial hacía referencia a lo hecho en el laboratorio al soli-

ciar también, además de los cálculos, la realización de un esquema del dispositivo experimental indicando materiales y reactivos, su enunciado fue: «Se titulan 20 mL de hidróxido de bario con ácido nítrico 0.24 M, gastándose 14.6 mL del ácido. ¿Cuál es la concentración molar del hidróxido? Represente los dispositivos empleados, reactivos y materiales».

El 65% de los alumnos con parcial aprobado evidenciaron en el cuestionario que comprendieron el objetivo del procedimiento de titulación, establecieron relaciones adecuadas entre lo mostrado en las distintas ventanas de la simulación, pero no arribaron al resultado final de la concentración; esto pudo deberse a la presentación diferente del problema que plantea la simulación. Estos estudiantes tuvieron dificultades en identificar el punto de equivalencia o punto estequiométrico dado que este había que inferirlo de la simulación. A pesar de reconocer la neutralidad de la solución y/o la inexistencia de H^+ u OH^- en este punto, no pudieron relacionar estos aspectos con el hecho de que la reacción finaliza y entender que el agregado posterior del NaOH es un paso que no es necesario para calcular la concentración del HCl. Tanto en la experiencia directa de laboratorio, al titular empleando indicadores ácido-base, como en los problemas clásicos, el volumen gastado o surge de un cambio perceptible, o viene expresado en el enunciado. Seguramente si se hubiera solicitado el resultado final de la titulación, mostrada con la simulación, mediante un enunciado clásico como el siguiente: «Para titular 60 mL de una solución de ácido clorhídrico se gasta un volumen de 30 mL de una solución de hidróxido de sodio 0.20 M. ¿Cuál es la concentración del ácido?», todo este grupo de estudiantes habría arribado al resultado final correcto.

Indiscutiblemente el formato o enunciación del problema influyó en la resolución del mismo. Una posible razón es, para este caso particular, el hecho de que en la consigna «¿A qué resultado final se arribaría en esta titulación? Explique» pudo haber favorecido la resolución conceptual y no numérica. Aunque, también, atendiendo a los antecedentes en esta línea de investigación, la razón más probable es que muchos estudiantes tienden a emplear algoritmos de una forma mecánica en la resolución de un tipo de ejercicio de química.

Desarrollo de lenguajes y presentaciones multimedia

Lemke (2006) afirma que el aprendizaje tiene lugar a través de muchos medios y que el lenguaje (ya sea en conversaciones o en texto) es uno de los medios primordiales

pero está lejos de ser el único. También se aprende de representaciones visuales de muchos tipos (dibujos, diagramas, gráficas, mapas, fotos, películas y videos, simulaciones 3D, etc.), tanto estáticas como dinámicas. El aprendizaje se logra integrando significados a través de todas estas modalidades, combinando texto e imagen, narrativas y observaciones. Por ello interesa indagar, en las narrativas de los alumnos, qué sujetos o entidades forman parte de la temática abordada y cómo las identifican y relacionan en la simulación.

La mayoría de los estudiantes pudieron etiquetar bien los materiales y entidades que muestra la simulación (promedio 8.9; fig. 2), sin embargo, muchos de ellos no categorizaron bien (promedio 6.2) esas entidades, es decir no expresaron que eran moléculas, iones, cationes, aniones o disoluciones. Esto pudo deberse a no asignarle importancia a este hecho o a desconocimiento. En ambas variables se observaron diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos de estudiantes (con parcial aprobado y parcial reprobado) y también entre el grupo de alumnos con puntajes elevados en la hoja 3 del cuestionario y los de puntaje bajo, lo que indicaría que el desconocimiento del tipo de entidades impediría describir con coherencia lo que muestra la simulación.

Del análisis de las respuestas de la hoja 3 se aprecia que los 17 encuestados (el 31% del total) que definieron mal las entidades submicroscópicas presentan dificultades conceptuales. Estos alumnos tienen un promedio muy inferior al promedio general en la actividad de etiquetado con categorización (4.2 respecto a 6.2), un promedio 3.1 en el puntaje del cuestionario de la hoja 3 (general 5.1), y en el examen parcial 3.4 (general 5.5). Ejemplos de respuestas de estos estudiantes son:

«...es la formación de nuevos átomos de agua... Los hidrógenos se van juntando con átomos de oxígeno para formar H_2O » (A7)

«y los átomos de Cl y de Na no se unen» (A28)

«la moléculas de Cl y Na quedan separadas» (A54)

«va a quedar el NaOH disociado como moléculas de OH- y Na» (A53)

Estos resultados apoyan la hipótesis de que un mayor conocimiento de las entidades, de los sujetos de las acciones y de las categorías a las cuales pertenecen sería un requisito necesario para establecer relaciones adecuadas entre las partes y entidades que se visualizan en la simulación y con ello alcanzar un mayor conocimiento conceptual del fenómeno.

Respecto a las relaciones entre las entidades en proposiciones, si bien el 69% brinda una definición aceptable de titulación, solo el 17% menciona a la titulación como una reacción química o como la mezcla de reactivos, no como un procedimiento o técnica de la química.

Otra relación inadecuada entre las entidades se aprecia en que 2 encuestados interpretaron que existe una interacción entre los iones Cl^- y Na^+ , haciendo referencia a que se produce una reacción de precipitación (contenido abordado en la enseñanza), aludiendo a que se forma un sólido, aspecto que obviamente no muestra la simulación.

Entre los estudiantes con dificultades en relacionar conceptualmente las entidades, se ubican 14 alumnos (un 26% del total) que realizaron una descripción literal de lo que veía en la simulación sin aportar relaciones conceptuales y conexiones entre los 4 niveles de representación. Estos alumnos presentaron puntajes bajos en el cuestionario (2.1) y en el examen parcial (2.3). Por ejemplo, el alumno A4 sostiene: «La simulación de titulación (ácido-base) muestra que: En un Erlenmeyer de 100 mL se encuentra una solución de ácido clorhídrico (su concentración es de 0.200 M), con un volumen de 60 mL, su pH inicial es de 1. También tenemos una bureta de 50 mL ocupada su volumen con hidróxido de sodio. Al iniciar la adición de un volumen de 5 mL de hidróxido de sodio al ácido clorhídrico su pH aumenta a 1.11; con la segunda adición de 5 mL más de NaOH a el HCl su pH aumenta a 1.24 y el volumen de la solución aumenta a 70 mL HCl; por 3ra vez adicionamos 5 mL de NaOH a la solución (HCl), por lo tanto su volumen aumentó a 75 mL y su pH a 1.4; por 4ta vez se adiciona 5 mL de NaOH a la solución (HCl), su pH aumentó. Así, sucesivamente aumentando hasta la 7ma vez, en total le agregamos 35 mL de solución NaOH a la solución, su pH aumentó.»

En concordancia con el principio de preentrenamiento del aprendizaje multimedia (Mayer y Moreno, 2003), existe una mejor comprensión cuando los estudiantes conocen los nombres, las características y el comportamiento de los componentes del sistema. Las actividades de etiquetado, tanto de materiales como de entidades, tiene la finalidad de indagar el conocimiento de los estudiantes sobre las entidades y materiales involucrados en la simulación. En una instancia de enseñanza, no de evaluación, el profesor puede ir señalando en la pantalla o proyección cada una de las entidades. También, y en línea con otro principio, el principio de contigüidad espacial, que afirma que se comprende mejor cuando las palabras escritas están ubicadas cerca de su parte correspondiente gráfica, el nombre de las entidades puede ser mostrado en etiquetas, como las utilizadas en esta investigación, pero ya completas.

Por otro lado, la mayoría no tuvo inconvenientes en etiquetar el nivel de representación (macro, simbólico, sub-micro y gráfico) al que pertenece cada uno de los elementos señalados en la hoja 2 del cuestionario (fig. 3), el promedio fue de 9.1. Nueve alumnos (17%) organizaron la respuesta a la pregunta 1 de la hoja 3, sobre qué muestra la simulación, de acuerdo a estos niveles de organización. Estos alumnos, que evidenciaron una buena integración conceptual, presentaron puntajes altos en el cuestionario (7.3) y en el examen parcial (8.1). Por ejemplo el alumno A1 expresó: «En la representación se puede observar una titulación de ácido clorhídrico (HCl), con una solución de hidróxido de sodio (NaOH), en el margen inferior derecho se puede observar cómo reaccionan de forma teórica los iones de los compuestos, en especial se pueden ver que cationes se unen a los aniones para poder formar un compuesto diferente, se observa que el hidróxido de sodio se separa y que el hidróxido reacciona con el hidrogeno del ácido clorhídrico formando agua y esto se ve hasta que la solución no tiene hidrógenos sueltos, a su vez se ve como el cloro y el sodio quedan libres en la solución sin reaccionar. En el gráfico del margen superior derecho se ve como el pH de la solución del HCl se va aumentando a medida que se le agrega el NaOH y en función de esto se va trazando una línea que muestra

el cambio de pH en función de la cantidad de NaOH agregado. En el margen izquierdo se puede observar cómo son los materiales usados para este proceso.»

Lo anterior puede enmarcarse dentro de otro principio del aprendizaje multimedia, el principio del señalamiento (Mayer y Moreno, 2003), que expresa que existe una mejor asimilación de la información cuando se incluyen señales o claves (pistas) de cómo procesar la información. La segunda actividad de etiquetado, que asigna el nivel de representación al que pertenecen las entidades que se muestran en la simulación, tiene la finalidad de ayudar a los estudiantes a segmentar el procesamiento de la información que muestra la pantalla, focalizando en cada uno de los niveles que se muestran simultáneamente. Esto también podría favorecerse, en una instancia de enseñanza, no de evaluación, si estas etiquetas se muestran ya completas y/o son señaladas por el profesor.

En esta experiencia educativa el uso del recurso TIC tuvo la particularidad de ser una proyección de una simulación a nivel grupal. Otro tipo de experiencia de aprendizaje con dicho recurso implicaría la interactividad de los alumnos solos, o en grupos de 2 frente a la pantalla, explorando, contestando preguntas o resolviendo situaciones a su propio ritmo.

En este estudio se verificó que reconocer las entidades que forman parte de una imagen no implica necesariamente relacionarlas adecuadamente; es decir, no significa que se puedan establecer las interrelaciones correspondientes. Muchos estudiantes no lograron desarrollar un modelo mental explicativo apropiado del proceso y arribar a un resultado. No lograron establecer relaciones adecuadas entre los niveles de representación, entre el nivel gráfico, el nivel macro, el nivel micro y el nivel simbólico. Por ejemplo, cuando se alcanza el pH 7 (aumento súbito en el gráfico) se gastaron 30 mL de hidróxido (macro), a nivel micro se aprecia que no quedan iones H^+ para reaccionar (se combinaron todos con los iones OH^- añadidos). La información que indica el peachimetro (macro), la ausencia de iones H^+ (micro) y el aumento de la curva de pH hasta alcanzar el valor 7 (gráfico), está indicando que se neutralizó, que se alcanzó el punto de punto de equivalencia. Esta información permite calcular el resultado final, a partir de la relación 1 mol a 1 mol, de acuerdo a la ecuación química (simbólico) correspondiente.

Muchos estudiantes no lograron establecer relaciones conceptuales como las expresadas en el párrafo anterior. Algunos percibieron partes aisladas, entidades no categorizadas, escribieron párrafos descriptivos sin elaboración o relatos textuales de lo que veían. En una instancia de enseñanza el profesor puede señalar en la simulación las relaciones importantes entre las distintas entidades: «Caen iones de OH^- y se combinan con los iones H^+ , que estaban en la solución, para formar H_2O », «Cuando no quedan iones de H^+ , el pH es 7, se ha neutralizado, y el volumen gastado es de 30 mL».

Conclusiones

En clases de ciencias los estudiantes aprenden integrando significados a través de diferentes modalidades o lenguajes, combinando texto e imagen (Lemke, 2006). Esta integración

no es automática y natural, es culturalmente específica y debe ser enseñada y aprendida. La actividad llevada a cabo con la simulación cumple una función de aplicación e integración. Tal como se afirmara anteriormente, este tipo de tarea favorece la integración de: (a) los distintos niveles de representación de los fenómenos químicos: macroscópico (experimental), microscópico (submicroscópico), simbólico (ecuaciones y fórmulas) y gráfico; y (b) los distintos momentos de enseñanza: teóricos, problemas y laboratorios, relacionando teoría y práctica.

En los apartados de Resultados y Discusión se han respondido las preguntas formuladas al comienzo de esta investigación. En esta experiencia, la utilización de la simulación no tuvo una finalidad de presentar la temática, dado que se llevó adelante luego de una enseñanza tradicional del tema titulación basada en clases teóricas, ejercicios numéricos, laboratorio y evaluación clásica. Más bien se concibió como una actividad con una utilidad complementaria a las anteriores instancias.

A pesar de la percepción de que en la simulación los conceptos relevantes «están a la vista», no se verificó lo que se esperaba, dado que los resultados obtenidos indican que los alumnos que establecieron una mejor relación entre las partes y/o entidades mostradas en la simulación, los que mostraron una mejor comprensión del fenómeno de titulación, son los que cuentan con los exámenes parciales aprobados. Por los resultados logrados en las distintas instancias y las respuestas cualitativas expresadas se desprende que estos alumnos tienen un mejor dominio de los lenguajes y razonamientos de la química.

La «ilusión inicial» de que el uso de la simulación llegaría a todos los alumnos, que facilitaría el aprendizaje de los alumnos con examen parcial reprobado, no se cumplió. El uso de TIC, en este caso el uso de una simulación, con todo su potencial visual, dinámico e integrador, sirvió principalmente a estudiantes que también lograron buenos resultados en cuestiones más tradicionales.

Sin embargo, el cambio de formato en el enunciado del problema, de un enunciado típico de ejercicio, donde se expresa el dato del volumen gastado, a una presentación diferente con la simulación, de la cual hay que inferir ese dato, redujo a más de la mitad el número de alumnos que arribaron al resultado numérico final correcto.

El profesor como experto percibe esta simulación como muy sencilla, como una visualización que muestra en forma clara y unívoca las relaciones importantes. Dada esta percepción, se daba por sentado que los estudiantes con buenas notas no tendrían ningún problema en contestar todos los ítems del cuestionario, sin embargo más de la mitad no pudo arribar al resultado final al tener que inferir los datos del problema en la simulación. Los datos del problema algorítmico, como el volumen gastado, lo tenían que inferir de información submicro, gráfica o provista por un instrumento. Este es un aspecto distinto al señalado por la investigación sobre la resolución algorítmica versus la resolución conceptual; en ella generalmente se comparan los resultados obtenidos por los alumnos que se enfrentan a 2 situaciones sobre un tema: un ejercicio numérico y otra formulada con partículas, donde no tienen que extraer información de uno de los formatos para aplicarlo en otro. Este es un aspecto novedoso para orientar la investigación en esta línea.

Las imágenes dinámicas, lo mismo que ocurre con las imágenes estáticas en general, no transmiten un significado único, no son «transparentes» ni «autoevidentes» (Otero, Greca y Lang da Silveira, 2003), requieren de decodificación y explicación. La simulación no «habla» igual para todos, por sí sola no llega igual a todos los estudiantes. Estas son preconcepciones de los profesores que saben qué mirar, cómo relacionar, que en definitiva, dominan los lenguajes de la química.

Para finalizar, el hecho de que los estudiantes de puntaje bajo en el cuestionario también tengan puntajes bajos en el parcial de la materia química nos indica que hay un dominio de lenguajes (y razonamientos con estos lenguajes) que no han alcanzado y que esta dificultad hay que abordarla. El uso de recursos TIC, por sí solos, como el caso presentado de una simulación, no supone un avance en la mejora de la calidad educativa, dado que estos recursos no son buenos o malos en sí mismos, sino que dependen de los objetivos y estrategias empleadas por los docentes y los alumnos. Según Coll, Mauri y Onrubia (2008) en un proceso de renovación didáctica por la incorporación de TIC, el aprendizaje de los estudiantes dependerá de la calidad de las prácticas en las que participen dentro del aula, y esa calidad mejorará con la inclusión de actividades específicas que permitan desarrollar los distintos lenguajes de la química. En este sentido, consideramos que la inclusión de simulaciones para evaluar nos permite no solo una evaluación conceptual de los temas, lo que es cognitivamente más demandante, sino también múltiples posibilidades para conocer lo que los alumnos logran comprender de los diferentes lenguajes con los que se enseña química.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Andersson, B. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformation. *Studies in Science Education*, 18, 53–85.
- Bekerman, D., Vaccaro, E., Pepa, L., Calleri, P. y Galagovsky, L. (2015). Introgenia didáctica: los riesgos de las simulaciones. Trabajo presentado en X Jornadas Nacionales y VII Jornadas Internacionales de Enseñanza de la Química Universitaria, Superior, Secundaria y Técnica. AQA. CABA.
- Carlton, T. (1997). Why and how to teach acid-base reactions without equilibrium. *Journal of Chemical Education*, 74(8), 939–941.
- Cokelez, A. (2010). A comparative study of French and Turkish students' ideas on acid-base reactions. *Journal of Chemical Education*, 87(1), 102–106.
- Coll, C. (2009). Aprender y enseñar con las TIC: expectativas, realidad y potencialidades. En R. Carneiro, J. C. Toscano, y T. Díaz (Eds.), *Los desafíos de las TIC para el cambio educativo* (pp. 113–126). Madrid: Ed. OEI-Santillana.
- Coll, C., Mauri, T. y Onrubia, J. (2008). Análisis de los usos reales de las TIC en contextos educativos formales: Una aproximación sociocultural. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 10(1), 1–18.
- Eilam, B. y Poyas, Y. (2010). External visual representations in science learning: The case of relations among system components. *International Journal of Science Education*, 32(17), 2335–2366.
- Furió C., Calatayud, M. y Bárcenas, S. Deficiencias epistemológicas en la enseñanza de las reacciones ácido-base y dificultades de aprendizaje. Red Académica Universidad Pedagógica Nacional, 2000 [consultada 1 Mar 2016]. Consultada en la URL: http://www.pedagogica.edu.co/storage/ted/articulos/ted07_03arti.pdf
- Halakova, Z. y Proksa, M. (2007). Two kinds of conceptual problems in chemistry teaching. *Journal of Chemical Education*, 84(1), 172–174.
- Jiménez-Liso, M. y de Manuel, E. (2002). La neutralización ácido-base a debate. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(3), 451–464.
- Johnstone, A. H. (1982). Macro- and microchemistry. *School Science Review*, 64, 377–379.
- Lemke, J. (2002). Enseñar todos los lenguajes de la ciencia: palabras, símbolos, imágenes y acciones. In *La Educación en Ciencias: ideas para mejorar su práctica*. Barcelona: Ed. Paidós (Cap. 6).
- Lemke, J. (2006). Investigar para el futuro de la educación científica: nuevas formas de aprender, nuevas formas de vivir. *Enseñanza de las Ciencias*, 24(1), 5–12.
- Mayer, R. y Moreno, R. (2003). Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 43–52.
- Nurrenbern, S. y Pickering, M. (1987). Concept learning versus problem solving: Is there a difference? *Journal of Chemical Education*, 64(6), 508–510.
- Otero, M., Greca, I. y Lang da Silveira, M. (2003). Imágenes visuales en el aula y rendimiento escolar en Física: un estudio comparativo. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 2, 1–30.
- Raviolo, A. y Alvarez, M. (2012). Uso y creación de simulaciones en la formación del profesorado: unidad didáctica sobre el movimiento oscilatorio armónico. *Latin-American Journal of Physics Education*, 6(4), 628–638.
- Redecker, C. y Johannessen, Ø. (2013). Changing assessment-Towards a new assessment paradigm using ICT. *European Journal of Education*, 48(1).
- Robinson, W. y Nurrenbern, S. (2013). Conceptual questions, 1990 [consultada 23 Sep 2013]. Disponible en: <http://www.jce.divched.org/JCEDLib/QBank/collection/CQandChP/CQs/TypesOfCQs.html>
- Russell, J., Kozma, R., Jones, T., Wykoff, J., Marx, N. y Davis, J. (1997). Use of simultaneous-synchronized macroscopic, microscopic, and symbolic representations to enhance the teaching and learning of chemical concepts. *Journal of Chemical Education*, 74(3), 330–334.
- Santos Benito, J. V., Celdrán Mallol, A., Gras Martí, A., Cano Villalba, M., Pardo Casado, M., Miralles Torres, J. A., et al. (2003). La evaluación, como ejemplo de integración de las TIC en la enseñanza. *Comunicación y Pedagogía*, 190, 46–49.
- Sheppard, K. (2006). High school students' understanding of titrations and related acid-base phenomena. *Chemistry Education Research and Practice*, 7(1), 32–45.
- Talanquer, V. (2005). La importancia de la evaluación formativa. *Educación Química*, 26, 177–179.