

Errores conceptuales en la ciencia, un obstáculo para el aprendizaje.

Persistencia de errores conceptuales relacionados con la incorrecta aplicación del principio de Le Chatelier

Juan Quílez Pardo*

Abstract

Chemical equilibrium misconceptions, which most of them are related with the prediction of chemical equilibrium shift, are tenacious and resistant to extinction. Teachers also subscribe to the same conceptions as chemistry students. Present instructional approaches which focus on the qualitative statements of Le Chatelier's rule may originate some of the reported difficulties. Hence, to facilitate conceptual change, an alternative methodological teaching/learning method is proposed. This proposal can be traced on the actual quantitative statement for the Le Chatelier's principle.

Introducción

Una de las líneas más fructíferas en investigación educativa corresponde a la que gira en torno a los errores conceptuales en las ciencias (Pfundt y Duit, 1994). En la enseñanza de estas disciplinas no basta con conocer los posibles errores de los alumnos, sino que además es necesario conocer sus características generales y acudir a sus orígenes (Pozo *et al.*, 1991; Wandersee, Mintzes y Novak, 1994). Este campo de investigación tiene una enorme importancia ya que intenta comprender la forma en que se realiza el aprendizaje. El fruto de esta comprensión supone su aplicación inmediata en las clases (Hierrezuelo y Montero, 1991).

Uno de los aspectos de especial dificultad para los estudiantes de Química es el denominado principio de Le Chatelier (Bergquist y Heikkinen, 1990; Garnett *et al.*, 1995; Níaz, 1995; Pereira, 1990; Pozo *et al.* 1991). Otros trabajos han extendido este estudio al ámbito de los profesores (Banerjee, 1991). Por su parte, Quílez y Solaz (1995) han categorizado una serie de nuevos errores conceptuales debidos a la utilización del citado principio en situaciones en las que el mismo está limitado o no tiene aplicación. Ciertas prácticas de evaluación (Quílez y Sanjosé, 1995) que se encuentran asociadas a una metodología de enseñanza que utiliza planteamientos puramente inductivos y que además propicia la transmisión de conocimientos para que se aprendan de forma mecánica y memorística (Quílez *et al.*, 1993) pueden originar, e incluso potenciar de forma determinante, la generación y la persistencia de errores y dificultades

relacionados con el equilibrio químico. A todo ello se deben añadir otras dificultades de origen diverso. Una de las más importantes está relacionada con la imposibilidad de formular de forma precisa el principio de Le Chatelier como regla cualitativa (Quílez, 1995; Quílez y Sanjosé, 1996) y que se encuentra unida a la utilización de una terminología de amplio espectro polisémico (Quílez, 1998a). Otra dificultad está asociada a la ausencia de un control riguroso de variables que propicia el empleo de un razonamiento causal lineal (Quílez, 1997a). Todas estas deficiencias dificultan la correcta utilización del principio (regla) en las situaciones en las que puede tener aplicación (Quílez 1997b).

Objetivos e hipótesis

En este estudio se intenta establecer si algunos de los errores cometidos por alumnos de Química de COU (último curso preuniversitario) (Quílez, 1997b) y de un primer nivel universitario (Quílez y Solaz, 1995) se mantienen de forma persistente en los niveles superiores y en los propios licenciados en Química y profesores de secundaria de esta materia. En consonancia con este planteamiento previo se han formulado los siguientes objetivos:

- Estudiar la posible persistencia de errores y dificultades manifestados por alumnos de Química tanto de COU como de un primer nivel universitario.
- Confirmar si el origen de los citados errores y dificultades se debe, en gran medida, a la metodología empleada, en la que el principio de Le Chatelier juega un papel determinante.

Por tanto, en consonancia con los objetivos formulados y el trabajo previo realizado con alumnos de niveles no superiores de Química, se planteó para este estudio la siguiente hipótesis de trabajo:

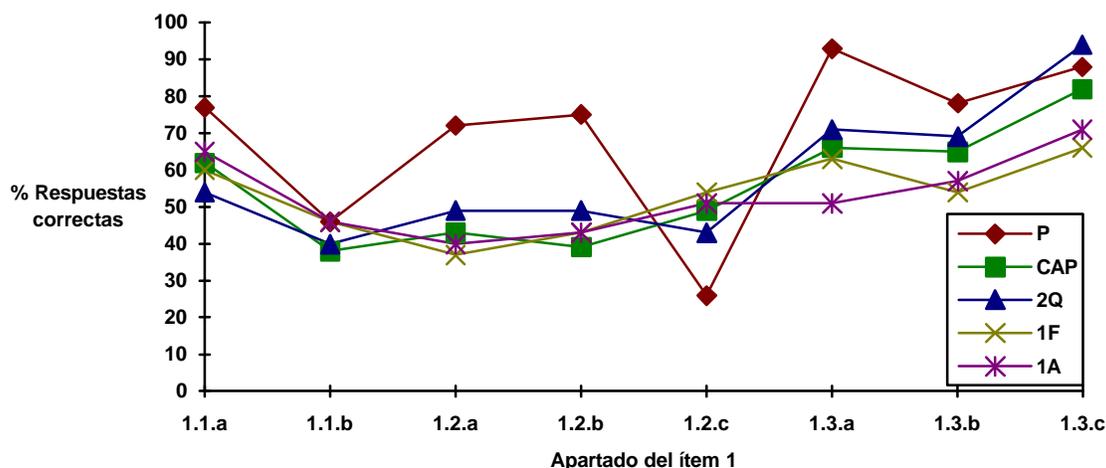
La utilización de la regla de Le Chatelier como procedimiento fundamental (y exclusivo) a la hora de predecir el posible desplazamiento de un equilibrio químico que ha podido ser perturbado, su consideración de principio infalible, sin limitaciones, y las dificultades inherentes a su formulación, interpretación de la misma y capacidad de aplicación correcta, provocarán errores conceptuales muy persistentes por lo que este principio puede convertirse en un auténtico obstáculo metodológico en el aprendizaje del equilibrio químico.

Este trabajo es parte de un proyecto de investigación subvencionado por el CIDE-MEC.

* Seminario de Física y Química, Instituto de Enseñanza Secundaria 'José Ballester', C/Alemany. Barrio de Torrefiel, Valencia. ESPAÑA.

Recibido: 3 de agosto de 1998; Aceptado: 5 de octubre de 1998.

Figura 1. Porcentajes de respuestas correctas correspondientes al ítem 1.



Diseño experimental: materiales empleados

La muestra a estudiar consistió en cinco grupos diferentes. Se eligieron dos grupos de alumnos de primer curso de Química General: 1º de Físicas (1F) (N = 35) y el otro 1º de Ingenieros Agrónomos (1A) (N = 35). Estos dos grupos habían estudiado un currículo correspondiente al equilibrio químico acorde con los planteamientos de libros de Química General (Gillespie *et al.*, 1989; Mahan y Myers, 1990; Whitten *et al.*, 1992). Otro grupo correspondió a alumnos de segundo año de la licenciatura en Ciencias Químicas (2Q) (N = 35). (Este grupo ya había estudiado el equilibrio químico a un nivel universitario en el primer año de licenciatura y en el segundo había abordado este tema dentro de la asignatura Termodinámica Química). Los otros dos grupos fueron los siguientes: un grupo de químicos recién licenciados que se encontraba realizando el Curso de Aptitud Pedagógica (CAP) (N = 74) y un grupo de profesores de química (P) de enseñanza secundaria (N = 69).

Por otro lado, se diseñó un cuestionario (Anexo, p. 376) para que fuese resuelto por cada uno de los integrantes de cada uno de los grupos estudiados. La citada prueba posee dos partes diferenciadas. El primer bloque consta de cuestiones de respuestas cerradas de opción múltiple, basadas en la aproximación realizada por Stranks *et al.* (1967) y en otros estudios previos (Banerjee, 1991; Wheeler y Kass, 1978) en donde la respuesta correcta se puede obtener mediante una apropiada utilización de la regla de Le Chatelier. Esta parte del cuestionario también se ha usado para estudiar la superación de dificultades asociadas con el empleo de la regla de Le Chatelier (Quílez, 1997c). La segunda parte de la prueba consta de preguntas de respuesta abierta, fundamentadas a partir de un estudio anterior (Quílez y Sanjosé, 1995). En

todas las cuestiones de esta segunda parte de la prueba, el denominado principio de Le Chatelier o bien no tiene aplicación o está limitado.

Resultados y discusión

Los porcentajes de respuestas correctas del ítem 1 de cada uno de los grupos se muestran en la figura 1.

Estudiaremos en primer lugar el **apartado 1.1**. El grupo de profesores es el que mejor responde, aunque no existen diferencias significativas entre este grupo y el resto. Debemos destacar que en todos los grupos existe una apreciable diferencia en cuanto a los resultados obtenidos en las dos partes de que consta este apartado. En primer lugar, se debe hacer notar la diferencia existente entre los porcentajes de respuestas correctas correspondientes a los ítems 1.1.a y 1.1.b (los porcentajes de respuestas correctas del ítem 1.1.a son superiores a los del ítem 1.1.b entre un 15% y un 30%). Además, llama la atención que entre el 30% y el 50% de las respuestas del ítem 1.1.b no consideran la variación de la constante de equilibrio con la temperatura y que entre el 21% y el 45% de las respuestas se señale de forma explícita que la constante de equilibrio no cambia con la temperatura. Estos resultados pueden ser debidos a la estrategia empleada para la resolución de cada apartado. En el 1.1.a se ha podido emplear de forma mayoritaria el principio de Le Chatelier ('la disminución de la temperatura favorece la reacción en que se desprende energía'), lo cual no se ha podido relacionar, en muchos casos, con la variación de la constante de equilibrio. Un razonamiento inverso supone considerar en primer lugar la variación de la constante de equilibrio y a partir de la misma predecir el sentido del desplazamiento.

En segundo lugar estudiaremos los resultados correspondientes al **apartado 1.2**. Los dos primeros ítems de este apartado pueden resolverse correctamente tanto por consideración de regla de Le Chatelier como mediante la utilización de la expresión de la constante de equilibrio (Quílez y Solaz, 1996). En ambos casos se obtienen porcentajes elevados de respuestas correctas en el grupo de los profesores (superiores al 70%). En cambio, en el caso del resto de los grupos estos porcentajes son inferiores al 50%. En este sentido, llama la atención el elevado porcentaje de estudiantes (entre el 34 y el 40%) que no pronostican desplazamiento. Si, como se presupone, los estudiantes han empleado la regla de Le Chatelier para realizar las correspondientes predicciones en estos dos apartados, los resultados obtenidos nos estarán informando de la dificultad que tiene su aplicación, incluso cuando ya se conoce de otros niveles educativos anteriores. De esta forma, el grupo de profesores obtendría mejores resultados fruto de su experiencia en la acción didáctica. Sin embargo, en el caso del ítem 1.2.c (recordemos que tanto la cantidad de sustancia de cloro como el volumen del reactor aumentan) el grupo de los profesores obtiene el porcentaje de respuestas correctas más bajo de todos los grupos (26.1%) y el resto de grupos obtienen porcentajes de respuestas correctas del orden de los resultados obtenidos en los otros dos ítems de este apartado o ligeramente superiores (muy próximos al 50% o algo más elevados). Para la resolución del ítem 1.2.c el principio de Le Chatelier no proporciona ninguna ayuda, pero la consideración de la expresión de la constante de equilibrio proporciona un resultado inequívoco. El reducido porcentaje de respuestas correctas en el grupo de los profesores hace suponer que el razonamiento empleado de forma mayoritaria no haya sido el de la expresión de la constante de equilibrio, sino que ha partido de la propia definición de concentración (molaridad). De este modo, un 42% de los profesores habría considerado que el aumento en la cantidad de sustancia ha sido superior al del volumen (o incluso sólo habría tenido en cuenta el aumento de masa, estableciendo un paralelismo entre variación en la cantidad de sustancia y concentración); un 21.7% no tiene suficientes datos para contestar ya que, tanto la masa de la sustancia considerada como el volumen del reactor se han visto incrementados y no se ven capacitados para decidir qué efecto predomina. Por último, siguiendo esta misma línea de argumentación, es de suponer que algunos de los profesores que ha proporcionado una respuesta correcta (26.1%) no han considerado la expresión de K_c sino que han supuesto el efecto predominante del aumento del volumen sobre el correspondiente a la cantidad de sustancia. Por otro lado, el porcentaje de respuestas correctas y el escaso número de estudiantes que pronostican un aumento de concentración o que no existen datos para contestar de forma precisa, estarían

relacionados con el empleo de un razonamiento que considera únicamente la información que aparece en el enunciado: un aumento del volumen producirá una disminución de la concentración (pero sin tener en cuenta la dificultad adicional que supone en este razonamiento la consideración de que la masa también aumenta).

Finalmente, estudiaremos los resultados correspondientes a los tres ítems de que consta el **apartado 1.3**. Aunque los porcentajes de respuestas correctas correspondientes al ítem 1.3.a son en general elevados, los resultados obtenidos revelan la dificultad que tienen los alumnos de considerar que la constante de equilibrio sólo varía con la temperatura (se producen porcentajes de respuestas incorrectas que oscilan entre el 28% y el 48%). En el caso de los profesores este porcentaje es sólo del 7.2%. El ítem que mejor contestan todos los grupos es el 1.3.c. Esta correcta predicción puede explicarse por la utilización de la regla que normalmente se usa en estos casos, que establece que la adición de un reactivo a una mezcla de equilibrio provoca siempre el desplazamiento del mismo con producción de una mayor cantidad de productos. En cambio, en algunos casos no se considera la participación del resto de los reactivos en la producción de esa mayor cantidad de productos. Ello explicaría que, en general, los resultados correspondientes a respuestas correctas del ítem 1.3.b sean inferiores a los del 1.3.c. Esta explicación se puede ver confirmada por el hecho de que la integración de esta regla sencilla dentro del concepto general de reacción química se realice mejor cuanto mayor sea el grado de experiencia sobre la misma. Así, existe una gradación en cuanto al porcentaje de respuestas en las que se señala que el otro reactivo no cambia su masa (desciende desde el 35%, aproximadamente, en el caso de los alumnos de 1º, pasando por un 25% en el caso de los alumnos de 2º y un 20% para los estudiantes de CAP, hasta llegar a un 4% en el caso de los profesores, si bien en este último caso un 11.5% no tiene suficientes datos o no sabe).

En las **cuestiones abiertas (2-6)** los porcentajes de respuestas correctas (proporcionados entre paréntesis en la Tabla I, al igual que en el resto de las tablas) son mucho más bajos que los correspondientes al ítem 1. Se consideró como respuesta válida aquella predicción que se acompañó de una argumentación fundamentada correctamente.

Los resultados correspondientes a la Tabla I revelan el escaso porcentaje de respuestas correctas que, en general, se obtienen en cada ítem. Al grupo de profesores le corresponden los mejores resultados, aunque las respuestas correctas no superan el 50% en ninguno de los ítems (si se exceptúa el nº 4). Realizada la prueba χ^2 se apreciaron, en general, diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$) entre el grupo de profesores y el resto de los grupos. Los porcentajes de respuestas correctas correspondientes a cada uno de los restantes gru-

Tabla I. Cuestiones abiertas (2-6). Número de respuestas correctas y porcentajes entre paréntesis.

ÍTEM	GRUPO				
	P (N = 69)	CAP (N = 74)	2°Q (N = 35)	1°F (N = 35)	1°A (N = 35)
2a	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
2b	33 (47.8)	16 (21.6)	6 (17.1)	8 (22.8)	7 (20,0)
3a	34 (49.3)	14 (18.9)	3 (8.6)	8 (22.8)	17 (48.6)
3b	13 (18.8)	7 (9.5)	2 (5.7)	0 (0)	3 (8.6)
4	54 (78.3)	34 (45.9)	15 (42.9)	12 (34.3)	15 (42.9)
5	10 (14.5)	2 (2.7)	0 (0)	2 (5.7)	3 (8.6)
6a	18 (26.1)	5 (6.7)	2 (5.7)	1 (2.8)	3 (8.6)
6b	18 (26.1)	4 (5.4)	2 (5.7)	0 (0)	2 (5.7)

pos presentan unos datos homogéneos, por lo que, salvo alguna excepción, no existen diferencias significativas entre los mismos.

Para la contrastación experimental de la hipótesis formulada se ha realizado un análisis pormenorizado del tipo de respuesta que cada grupo proporciona en cada uno de los ítems. Para cada ítem se han confeccionado dos tablas. Así, en cada situación se resumen los datos correspondientes a los grupos analizados de dos formas: 1) En una primera tabla se relacionan los porcentajes correspondientes a cada una de las predicciones efectuadas, así como los porcentajes correspondientes a quienes no responden. 2) En una segunda tabla se proporcionan los porcentajes de cada una de las argumentaciones empleadas, así como los correspondientes a las respuestas que no dan ningún tipo de justificación y los que corresponden a respuestas en blanco. Para el análisis de las explicaciones proporcionadas se han clasificado en tres tipos de categorías: a) basadas en la expresión de la constante de equilibrio; b) fundamentadas en la regla de Le Chatelier; c) otras argumentaciones.

Los comentarios que se realizan en torno a los resultados reflejan únicamente tendencias generales comunes a todos los grupos. En general, los porcentajes de respuestas correc-

tas son muy bajas y los errores encontrados encontrados se hallan muy extendidos y son idénticos a los hallados y categorizados en trabajos anteriores (Quílez, 1997b; Quílez y Solaz, 1995) para alumnos de COU y de 1° de Ciencias Químicas. Por todo ello no se volverá a realizar en esta ocasión un estudio con el mismo detalle.

En el ítem 2a, la adición del gas reactivo, a presión y temperatura constantes, produce la descomposición de una mayor cantidad de sólido. El cálculo sencillo que supone la comparación de los valores de Q_x con K_x (o bien Q_p con K_p) proporciona la respuesta correcta (Quílez y Solaz, 1996; Solaz y Quílez, 1995). Para la comparación de Q_c con K_c se debe tener en cuenta la variación del volumen del reactor después de la perturbación. No se encontró ninguna respuesta correcta.

La respuesta mayoritaria obtenida en todos los grupos señalaba que la cantidad de amoníaco debía disminuir. El principio de Le Chatelier se empleó para indicar que el equilibrio debía desplazarse hacia la izquierda para contrarrestar o minimizar la cantidad añadida de gas. También se empleó la expresión de la constante de equilibrio K_c aunque, salvo en el caso de los profesores, en un porcentaje muy reducido. En estas respuestas basadas en la expresión de K_c

Tabla II. Respuestas correspondientes al ítem 2a (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 2a	Respuesta			No responde
	Mayor	Menor	Igual	
Grupo				
P	0 (0)	97.0	3.0	0
CAP	3.9 (0)	82.7	3.9	9.5
2Q	0 (0)	80.0	17.1	2.9
1F	8.5 (0)	68.6	14.4	8.5
1A	8.5 (0)	54.3	31.5	5.7

Tabla III. Argumentaciones en el ítem 2a (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 2a	Argumentación				
	Grupo	K	Le Chatelier	Otras	Sin justificar
P	36.2 (0)	34.8	4.4	24.6	0
CAP	13.5 (0)	64.8	2.7	9.5	9.5
2Q	0 (0)	80.0	5.7	11.4	2.9
1F	17.1 (0)	54.3	8.6	11.4	8.6
1A	2.9 (0)	40.0	5.7	42.8	8.6

no se realizó en ningún caso un control de variables ni cálculo alguno. El resto de respuestas que predecían este desplazamiento no propocionó, en general, ningún tipo de argumentación.

Los alumnos que señalaron que la cantidad de amoniaco permanecía inalterada no dieron, en general, ningún tipo de argumentación, salvo aquellos que predecían un desplazamiento del equilibrio hacia la izquierda (disminución de la cantidad de HCl) sin participación del NH₃. Esta última argumentación fue especialmente relevante en el grupo 1A (31.4%).

En el ítem 2b se estudia fundamentalmente el error masa-concentración. Por ello, se han admitido como respuestas correctas aquellas que predicen un aumento de la masa de NH₄Cl(s) y que su concentración no cambia (recordemos que en este caso el desplazamiento del equilibrio supone una disminución de la masa del sólido). La mayor parte de las respuestas correctas argumentaron en función de la densidad constante de los sólidos para señalar que aunque se forme una mayor cantidad de sólido, su concentración no varía. El mayor porcentaje de errores masa-concentración está íntimamente relacionado con la aplicación superficial de la regla de Le Chatelier.

Las respuestas correctas del ítem 3a afirman de forma mayoritaria que la variación de la masa de los sólidos que participan en un equilibrio heterogéneo no produce ninguna perturbación. Salvo en el grupo 2Q también se emplean

(aunque en un pequeño porcentaje) argumentaciones basadas en la constante de equilibrio, en su mayoría correctas. De nuevo, la regla de Le Chatelier es la justificación mayoritaria en la predicción de la evolución del equilibrio químico ('el equilibrio se desplaza hacia la izquierda para compensar la disminución de la masa de los reactivos'), lo cual supone el mayor porcentaje de respuestas incorrectas.

En el ítem 3b, el intento de aplicación de la regla de Le Chatelier propició el empleo de la amplia variedad de razonamientos previamente categorizados (Quílez y Solaz, 1995). Los dos mayoritarios fueron los siguientes: a) El aumento de presión producido hace que el equilibrio se desplace hacia la formación de una mayor cantidad de reactivos (disminución del número de moles) (P: 42.0%; CAP: 24.3%; 2Q: 34.3%; 1F: 25.7% y 1A: 5.7%); b) No se produce desplazamiento ya que el gas inerte no reacciona con ninguna de las sustancias participantes (P: 14.5%; CAP: 16.2%; 2Q: 45.7%; 1F: 25.7%; 1A: 48.6%). Las respuestas correctas señalaron además que esta adición no hacía variar las concentraciones de los gases inicialmente presentes. Es de destacar que sólo un profesor hizo referencia explícita a la constante de equilibrio en este último tipo de argumentación. En el caso de un reducido grupo de profesores que utilizó la expresión de K_p (7.2%), también se predijo un desplazamiento del equilibrio hacia la formación de una mayor cantidad de reactivos. En estos casos se tuvo en cuenta el aumento de presión, pero no el correspondiente incremento en la canti-

Tabla IV. Respuestas correspondientes al ítem 2b (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 2b	Respuesta			No responde
	Mayor	Menor	Igual	
P	27.5	0	65.3 (47.8)	7.2
CAP	58.1	5.4	21.6 (21.6)	14.9
2Q	74.4	0	22.8 (17.1)	2.8
1F	45.7	8.6	34.3 (22.8)	11.4
1A	51.4	5.7	34.3 (20.0)	8.6

Tabla V. Argumentaciones en el ítem 2b (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 2b	Argumentación					
	Grupo	K	Le Chatelier	Otras	Sin justificar	Sin respuesta
P		4.3 (2.9)	27.6	44.9 (44.9)	15.9	7.3
CAP		8.1	50.0	21.6 (21.6)	5.4	14.9
2Q		2.9 (2.9)	82.8 (14.3)	0	11.4	2.9
1F		11.4 (8.6)	48.6	14.3 (14.3)	14.3	11.4
1A		5.7 (5.7)	40.0	14.3 (14.3)	31.4	8.6

Tabla VI. Respuestas correspondientes al ítem 3a (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 3a	Respuesta			No responde	
	Grupo	No desplazamiento	Izquierda		Derecha
P		69.6 (49.3)	27.6	1.4	1.4
CAP		17.6 (17.6)	60.8	5.4	16.3
2Q		11.4 (8.6)	88.6	0	0
1F		28.6 (22.8)	51.4	5.7	14.3
1A		48.6 (48.6)	42.9	2.8	5.7

dad de sustancia, lo cual provocó la incorrección mencionada.

En el ítem 4 se registra el mayor porcentaje de respuestas correctas de esta segunda parte del cuestionario. Salvo el grupo de los profesores, en todos los grupos el porcentaje de respuestas basadas en la regla de Le Chatelier superó al correspondiente basado en la constante de equilibrio. En las respuestas incorrectas, generalmente se relacionó el cambio de presión (volumen) producido con un desplazamiento hacia la producción de una mayor cantidad de productos de reacción al considerar que de esta forma se reducía la presión por desplazarse el equilibrio hacia la formación de un menor número de moléculas (0).

En el ítem 5, todas las categorías de respuestas erróneas señaladas por Quílez y Solaz (1995) (relacionadas con el

intento de aplicación de la regla de Le Chatelier) se vuelven a reproducir en los diferentes grupos. Las dos respuestas mayoritarias son aquellas en la que se señala que: a) El gas inerte no perturba el equilibrio químico ya que no hay reacción. Ésta es la respuesta mayoritaria en los grupos de estudiantes universitarios (1A: 48.6%; 1F: 45.7; 2Q: 51.4%) y disminuye en los grupos de los profesores (130%) y de los alumnos del CAP (29.7%); b) el aumento de presión será minimizado por el desplazamiento del equilibrio hacia la producción de un menor número de moléculas. Esta explicación es la mayoritaria en el grupo de los profesores (26.1%) y en el de los alumnos de CAP (32.4%). En el caso de los estudiantes universitarios, los porcentajes correspondientes son los siguientes: 1A: 11.4%; 1F: 2.9%; 2Q: 34.3%. Sin embargo, en el grupo de los profesores (11.6%) y de los

Tabla VII. Argumentaciones en el ítem 3a (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 3a	Argumentación					
	Grupo	K	Le Chatelier	Otras	Sin justificar	Sin respuesta
P		18.9 (15.9)	29.0 (2.8)	30.4 (30.4)	20.3	1.4
CAP		17.6 (13.5)	62.1 (1.4)	18.6 (8.6)	5.7	16.2
2Q		0	85.7	18.6 (8.6)	5.7	0
1F		17.1 (17.1)	57.2	8.6 (5.7)	2.8	14.3
1A		22.9 (22.9)	45.7	25.7 (25.7)	0	5.7

Tabla VIII. Respuestas correspondientes al ítem 3b (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 3b	Respuesta			No responde	
	Grupo	No desplazamiento	Izquierda		Derecha
P		37.6 (18.8)	50.6	1.4	10.0
CAP		35.1 (9.6)	31.1	9.5	24.3
2Q		54.3 (2.9)	34.4	0	11.3
1F		40.0 (0)	34.4	0	25.6
1A		85.7 (8.6)	5.7	5.7	2.9

Tabla IX. Argumentaciones en el ítem 3b (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 3b	Argumentación				Sin respuesta	
	Grupo	K	Le Chatelier	Otras		Sin justificar
P		10.1 (1.4)	56.6	21.8 (17.4)	1.4	10.1
CAP		1.3	50.0	14.7 (9.6)	9.6	24.4
2Q		2.9	80.0	2.9 (2.9)	2.9	11.3
1F		2.9	54.3	5.7	11.5	25.6
1A		8.6	60.0	8.6 (8.6)	20.0	2.8

alumnos de CAP (12.2%) aparece una tercera categoría que no se había manifestado en trabajos previos en la que se señala que ya que la presión se mantiene constante no se perturbará el equilibrio químico. En muy pocas respuestas es utilizada correctamente la constante de equilibrio para realizar predicciones fundamentadas de forma adecuada.

En el caso del ítem 6a, lo que más llama la atención en cada uno de los grupos es el elevado porcentaje de respuestas en blanco. También es elevado el porcentaje de respuestas en las que se reflejan problemas de lateralización o compatimentación del equilibrio al señalar que únicamente disminuye la concentración de la especie química escrita a la izquierda de la ecuación química por lo que, bien empleando la expresión de la constante de equilibrio o la regla de Le Chatelier, se predice un desplazamiento hacia la izquierda (P: 21.7%; CAP: 23.0%; 2Q: 14.3%; 1F: 11.4%; 1A:

11.4%). Además, para este tipo de desplazamiento, otro error que aparece, aunque en mucho menor grado es el que relaciona la adición de agua con el aumento del número de iones H⁺, lo cual provoca la reacción con los iones acetato (P: 4.3%; CAP: 14.5%; 2Q: 14.3%; 1F: 11.4%; 1A: 5.7%).

En este tipo de respuestas se suelen apoyar los diferentes grupos a la hora de hacer los cálculos cuantitativos (ítem 6b) mediante el cálculo y la comparación la comparación de los valores de [H⁺ correspondientes a cada una de la dos disoluciones (inicial y final). Se relaciona la disminución de la concentración de iones H⁺ con el desplazamiento del equilibrio hacia la izquierda (P: 21.7%; CAP: 18.9%; 2Q:14.3; 1F: 5.7%; 1A: 8.6%).

Entre las respuestas en las que se indica que la adición de agua no desplaza el equilibrio aparecen dos razones fundamentales: a) las concentraciones de todas las especies

Tabla X. Respuestas correspondientes al ítem 4 (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 4	Respuesta			No responde	
	Grupo	Mayor	Menor		Igual
P		7.2	0	87 (78.3)	5.8
CAP		14.8	2.7	60.7 (45.9)	21.6
2Q		34.2	8.5	51.6 (42.9)	5.7
1F		31.5	5.7	45.6 (34.3)	17.1
1A		31.5	5.7	54.2 (42.9)	8.6

Tabla XI. Argumentaciones en el ítem 4 (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 4	Argumentación					
	Grupo	K	Le Chatelier	Otras	Sin justificar	Sin respuesta
P		43.5 (43.5)	42.0 (34.8)	0	8.7	5.8
CAP		10.8 (9.4)	43.2 (36.5)	9.5	14.9	21.6
2Q		14.2 (8.6)	71.4 (34.3)	0	8.7	5.7
1F		17.2 (8.6)	51.4 (3.4)	8.6	5.7	17.1
1A		28.5 (25.7)	48.6 (19.9)	8.6	5.7	8.6

Tabla XII. Respuestas correspondientes al ítem 5 (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 5	Respuesta			No responde	
	Grupo	No desplazamiento	Izquierda		Derecha
P		46.4	30.5	15.9 (15.9)	7.2
CAP		47.3	33.8	5.4 (2.7)	13.5
2Q		60.0	40.0	0 (0)	0
1F		57.1	22.9	8.6 (2.8)	11.4
1A		71.4	20.0	8.6 (8.6)	0

químicas disminuyen por igual (P: 8.7%; CAP: 7.2%; 2Q: 14.3%; 1F: 2.9%; 1A: 2.9%); b) el agua no aparece en la expresión de la constante de equilibrio (P: 1.4%; CAP: 0%; 2Q: 5.7%; 1F: 11.4%; 1A: 2.9%). Estos resultados y las deficiencias que acompañan a los mismos señalan la dificultad de transferencia de los conceptos del equilibrio químico a las reacciones ácido-base.

En las respuestas correctas se empleó de forma mayoritaria la expresión de la constante de equilibrio. En estos últimos casos, se relacionó el desplazamiento del equilibrio hacia la derecha con un aumento del número de iones o con el incremento del valor del grado de disociación del ácido acético (ítem 6b) (P: 23.2%; CAP: 5.4%; 2Q: 5.7%; 1F: 0%; 1A: 5.7%). En el resto de respuestas en las que aparece algún

cálculo (ítem 6b), o bien éste es incorrecto o sólo aparece evaluado el pH de la disolución resultante (P: 18.8%; CAP: 33.8%; 2Q: 54.3%; 1F: 57.1%; 1A: 54.3%). En el caso de algunos estudiantes la dificultad consistía en calcular la concentración de la nueva disolución.

Conclusiones

Este trabajo refuerza los resultados obtenidos por diferentes autores en estudios previos en cuanto a la dificultad intrínseca que posee el empleo correcto de la regla de Le Chatelier en situaciones en las que puede tener aplicación. Los datos que corresponden a la primera parte del cuestionario empleado nos permiten establecer la persistencia de dificultades a la hora de predecir el efecto de la variación de la tempera-

Tabla XIII. Argumentaciones en el ítem 5 (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 5	Argumentación					
	Grupo	K	Le Chatelier	Otras	Sin justificar	Sin respuesta
P		20.3 (11.6)	50.8	5.8 (4.3)	15.9	7.2
CAP		8.1 (2.7)	74.3	4.1	0	13.5
2Q		0	91.4	0	8.6	0
1F		8.6 (2.8)	62.9	2.8 (2.8)	14.3	11.4
1A		11.4 (2.8)	68.6	5.7 (5.7)	14.3	0

Tabla XIV. Respuestas correspondientes al ítem 6a (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis)

ÍTEM 6a	Respuesta			No responde
	No desplazamiento	Izquierda	Derecha	
P	11.6	30.4	31.9 (26.1)	26.1
CAP	18.9	39.2	14.9 (6.7)	27.0
2Q	31.4	31.4	14.3 (5.7)	22.8
1F	14.3	25.7	28.5 (2.8)	31.5
1A	5.7	28.5	22.9 (8.6)	42.9

tura (a presión constante), de la masa de uno de los gases participantes (a volumen constante) y de la presión total (sistema con émbolo móvil). Estos resultados cuestionan la defensa del llamado principio de Le Chatelier como una serie de reglas de aplicación limitada y vuelven a plantear su formulación cuantitativa a partir de la comparación del valor del cociente de reacción (Q) –perturbación– con el correspondiente al de la constante de equilibrio (K) –equilibrio– para variaciones de masa y de presión-volumen (Quílez y Solaz, 1996); en el caso de variaciones de temperatura, la alternativa supone la interpretación del significado de la llamada ecuación de van't Hoff (Quílez y Solaz, 1994; Solaz y Quílez, 1998).

La imposibilidad de formular cualitativamente, de forma sencilla y general, el principio de Le Chatelier (Prigogine y Defay, 1954), las dificultades asociadas en cuanto la comprensión e interpretación de sus diferentes formulaciones didácticas (Quílez, 1998a), el tratamiento que realizan muchos libros de texto (Quílez, 1997a, Quílez *et al.*, 1993, Quílez y Sanjosé, 1996), el empleo de un razonamiento causal-lineal en su aplicación (Quílez, 1997a) y su carácter limitado (Quílez y Solaz, 1994, Solaz y Quílez, 1995) son, todos ellos, factores, tanto conceptuales como procedimentales que confluyen a la hora de establecer las causas de la persistencia de los errores conceptuales detectados.

Los resultados obtenidos para la segunda parte del cuestionario administrado vienen a apoyar estas primeras

conclusiones. El paralelismo encontrado en el tipo de argumentaciones empleadas por los diferentes grupos analizados (y los errores que de ello se derivan) muestran que el llamado principio de Le Chatelier se emplea de forma prácticamente exclusiva a la hora de predecir posibles desplazamientos de equilibrios químicos que han podido ser perturbados (y en donde el citado principio está limitado o no tiene aplicación). A pesar de que los tratamientos modernos del principio en libros de química general acompañan a un enunciado cualitativo didáctico la correspondiente formulación cuantitativa ($Q-K$), se concluye que el conocimiento de esa regla cualitativa eclipsa estos tratamientos de mayor rigor conceptual, basados en el análisis de la expresión matemática de la constante de equilibrio.

Finalmente, podemos establecer como conclusión general que los errores conceptuales detectados en este trabajo (y en otros que le preceden) parecen confirmar que la regla de Le Chatelier actúa como obstáculo metodológico en el proceso de enseñanza/aprendizaje del equilibrio químico. Esta característica explicaría que dichos errores se manifiesten tenazmente persistentes.

La consideración de la regla de Le Chatelier como principio universal, seguro y fácil de recordar y de aplicar dificulta el empleo de argumentaciones basadas en la expresión de la constante de equilibrio. La implicación didáctica supone su eliminación del currículo de Química como regla cualitativa (Quílez, 1998b) y la búsqueda de una alternativa

Tabla XV. Argumentaciones en el ítem 6a (porcentajes de respuestas correctas entre paréntesis).

ÍTEM 6a	Argumentación				Sin respuesta
	K	Le Chatelier	Otras	Sin justificar	
P	46.5 (26.1)	18.8	7.2	1.4	26.1
CAP	17.6 (6.7)	39.2	8.1	8.1	27.0
2Q	25.7 (5.7)	40.0	2.9	8.6	22.8
1F	17.1 (2.8)	37.1	11.4	2.9	31.5
1A	22.8 (8.6)	17.1	8.6	8.6	42.9

de mayor rigor conceptual (Quílez y Solaz, 1996) que intente superar las deficiencias encontradas (Quílez 1997a). ■

Bibliografía

- Banerjee, A.C., 'Misconceptions of students and teachers in chemical equilibrium', en *International Journal of Science Education*, **13**(4), 487-494 (1991).
- Bergquist, W. y Heikkinen, H., 'Student ideas regarding chemical equilibrium', en *Journal of Chemical Education*, **67**(12), 1000-1003 (1990).
- Garnett, P.J.; Garnett, P.J.; Hackling, M.W., 'Students' alternative conceptions in chemistry: a review of research and implications for teaching and learning', en *Studies in Science Education*, **25**, 69-95 (1995).
- Gillespie, R.J., Humphreys, D.A., Baird, N.C. y Robinson, E.A., *Chemistry*, Allyn Bacon, Massachusetts, 1989.
- Hierrezuelo, J. y Montero, A., *La ciencia de los alumnos. Su utilización didáctica en la didáctica de la Física y la Química*, Elzevir, Málaga, 1991.
- Mahan, B.H. y Myers, R.J., *Química. Curso Universitario*, Addison-Wesley, México, 1990.
- Niaz, M., 'Chemical equilibrium and Newton's third law of motion: ontology/phylogeny revisited', en *Interchange*, **26**, 19-32 (1995).
- Pereira, M.P.B.A. *Equilibrio Químico. Dificultades de Aprendizagem e Sugestoes Didácticas*, SPQ, Lisboa, 1990.
- Pfund, H. y Duit, R., *Bibliography: Students' alternative frameworks and Science Education*, Institute for Science Education, University of Kiel, Kiel, 1994.
- Pozo, J.I., Gómez, M.A., Limón, M. y Sanz, *Procesos cognitivos en la comprensión de la ciencia: las ideas de los adolescentes sobre la Química*, CIDE, Madrid, 1991.
- Prigogine, I. y Defay, R., *Chemical Thermodynamics*, Longmans Green, Londres, 1954.
- Quílez, J., 'Una formulación para un principio: Análisis histórico del principio de Le Chatelier', en *Rev. Mex. Fis.*, **41** (4), 586-598. (1995).
- Quílez, J., 'El principio de Le Chatelier: Un obstáculo epistemológico en el aprendizaje del equilibrio químico', en *Infancia y Aprendizaje*, **78**, 73-86 (1997a).
- Quílez, J., 'Superación de errores conceptuales del equilibrio químico mediante una metodología basada en el empleo exclusivo de la constante de equilibrio', en *Educación Química*, **8**(1), 46-54 (1997b).
- Quílez, J., 'Dificultades semánticas en el aprendizaje de la Química. El principio de Le Chatelier como ejemplo paradigmático', en *Alambique*, **17**, 105-111 (1998a).
- Quílez, J., '¿Se debe eliminar la regla de Le Chatelier del currículum de Química?' *Investigación e Innovación en Didáctica de las Ciencias*. Universidad de Murcia, 1998b.
- Quílez, J. y Sanjosé, V., 'Errores conceptuales en el estudio del equilibrio químico: Nuevas aportaciones relacionadas con la incorrecta aplicación del principio de Le Chatelier', en *Ens. Cien.*, **13**(1) 72-79 (1995).
- Quílez, J. y Sanjosé, V., 'El principio de Le Chatelier a través de la historia y su formulación didáctica en la enseñanza del equilibrio químico', en *Ens. Cien.*, **14**(3) 381-390, (1996).
- Quílez, J. y Solaz, J.J., 'Análisis termodinámico de las insuficiencias del principio de Le Chatelier en el desplazamiento del equilibrio químico', en *Afinidad*, **51** 435-438 (1994).
- Quílez, J. y Solaz, J.J., 'Students and teachers misapplication of the Le Chateliers principle. Implications for the teaching of chemical equilibrium', en *J. Res. Sci. Teach.*, **33**(9) 939-957 (1995).
- Quílez, J. y Solaz, J.J., 'Una formulación sencilla, cuantitativa y precisa para el principio de Le Chatelier', en *Educación Química*, **7**(4) 202-208 (1996).
- Quílez, J., Solaz, J.J., Castelló, M. y Sanjosé, V., 'La necesidad de un cambio metodológico en la enseñanza del equilibrio químico. Limitaciones del principio de Le Chatelier', en *Ens. Cien.*, **11**(3) 281-288 (1993).
- Solaz, J.J. y Quílez, J., 'Thermodynamics and the Le Chatelier's principle', en *Rev. Mex. Fis.*, **41**, p. 128-138 (1995).
- Solaz, J.J. y Quílez, J., 'Unequivocal prediction of chemical equilibrium shift when changing the temperature at constant volume', en *Physics Education* (India), (en prensa) (1998).
- Stranks, D.R., Hefferman, M.L., Lee Dow, K.C., McTigue, P.T. y Whithers, G.R.A., *Química*, Selecciones científicas, Madrid, 1967.
- Wandersee, J.H.; Mintzes, J.J.; Novak, J.D., Research on alternative conceptions in science. En Gabel, D.L. (Ed.) *Handbook of research on science teaching and learning*, p. 177-210, 1994
- Wheeler, A.E. y Kass, H., 'Student's misconceptions in chemical equilibrium', en *Science Education*, **62**, 223-232 (1978).
- Whitten, K.W., Gailey, K.D. y R.E. Davis, R.E., *Química General*. McGraw-Hill, México, 1992.

ANEXO

CUESTIONARIO EQUILIBRIO QUÍMICO (Profesores de Secundaria, alumnos de CAP y estudiantes universitarios)

CUESTIÓN 1

Responde a la siguiente cuestión indicando una de estas cinco posibilidades:

- A: mayor que en la posición de equilibrio anterior.
- B: menor que en la posición de equilibrio anterior.
- C: igual que en la posición de equilibrio anterior.
- D: insuficientes datos para contestar de forma precisa.
- E: no sé.

Considera una mezcla gaseosa en equilibrio químico formada por los siguientes gases: CO(g), Cl₂ (g) y COCl₂ (g), a 400°C y 1 atm de presión, que definen una posición del equilibrio representado por la siguiente ecuación:



Responde, según se ha indicado anteriormente, para cada una de las situaciones que se dan a continuación:

1.1. La mezcla gaseosa se enfría a 250°C, manteniendo la presión constante. Cuando el sistema alcance una nueva posición de equilibrio:

a) la masa de COCl_2 (g) presente será _____.

b) el cociente $\frac{[\text{COCl}_2]_{\text{eq}}}{[\text{CO}]_{\text{eq}} [\text{Cl}_2]_{\text{eq}}}$ será _____.

1.2. El volumen del sistema se duplica por una disminución de la presión, a temperatura constante. Cuando el sistema alcance una nueva posición de equilibrio:

a) la masa de COCl_2 (g) presente será _____.

b) la masa de Cl_2 (g) presente será _____.

c) la nueva concentración de Cl_2 (g) será _____.

1.3. Se añade al sistema una pequeña cantidad de CO (g), manteniendo el volumen y la temperatura constantes. Cuando el sistema alcance una nueva posición de equilibrio:

a) el cociente $\frac{[\text{COCl}_2]_{\text{eq}}}{[\text{CO}]_{\text{eq}} [\text{Cl}_2]_{\text{eq}}}$ será _____.

b) la masa de Cl_2 (g) presente será _____.

c) la masa de COCl_2 (g) presente será _____.

CUESTIONES 2-6

Responde de forma razonada a cada una de las siguientes cuestiones:

2. A una determinada temperatura y una presión de 0.20 atm se ha establecido el equilibrio representado por la siguiente ecuación:



Una vez analizada la mezcla de equilibrio se obtuvo el siguiente resultado:

$$n(\text{NH}_4\text{Cl}) = 0.01 \text{ mol}; n(\text{NH}_3) = 1.0 \times 10^{-3} \text{ mol};$$

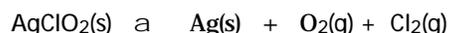
$$n(\text{HCl}) = 4.0 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

ocupando, en esas condiciones, un volumen de 1 L.

Al equilibrio anterior, se añade, a presión y temperatura constantes, 1.0×10^{-3} mol de HCl (g). Responde **únicamente** si cuando el sistema alcance la nueva posición de equilibrio:

a) la masa de NH_3 (g) presente será **mayor, menor o igual** que la presente en el primer equilibrio. b) la concentración de NH_4Cl (s) será **mayor, menor o igual** que la correspondiente a la del primer equilibrio.

3. Para el equilibrio representado por la siguiente ecuación:



indica cómo se podrá ver afectado en cada uno de los siguientes casos (en los que la temperatura permanece constante):

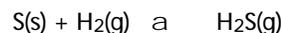
a) por la extracción del recipiente de una pequeña cantidad de AgClO_2 (s).

b) por la adición de una pequeña cantidad de N_2 (g).

Notas: (1) el reactor cierra de forma hermética y es totalmente rígido;

(2) el nitrógeno no reacciona con ninguna de las sustancias presentes en el equilibrio.

4. Dado el siguiente sistema en equilibrio:



explica de forma razonada si una disminución del volumen de la vasija de reacción por un aumento de la presión, manteniendo la temperatura constante, producirá una mayor cantidad de H_2S (g).

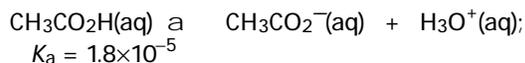
5. Dado el siguiente sistema en equilibrio:



se añade, a presión y temperatura constantes, una cierta cantidad de Ne (g) (gas inerte).

¿Producirá esta adición el desplazamiento del equilibrio en algún sentido? Razona la respuesta.

6. El equilibrio de ionización acuosa del ácido acético corresponde a la siguiente ecuación:



Se dispone de 100 mL de una disolución acuosa de ácido acético 1 M.

A esta disolución se le añade agua hasta obtener un volumen de 1 L.

a) Intenta explicar, **sin necesidad de realizar cálculos**, si este efecto habrá producido un desplazamiento del equilibrio en algún sentido.

b) Finalmente, **apoya tu razonamiento realizando los cálculos pertinentes, comentando y comparando los resultados obtenidos**.