

# DISEÑO DE ACTIVIDADES PARA EL APRENDIZAJE DE LA RADIATIVIDAD EN BACHILLERATO

## DESIGN OF ACTIVITIES FOR LEARNING RADIOACTIVITY IN HIGH SCHOOL

---

CARMEN LAVÍN PUENTE

FACULTAD DE CIENCIAS. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

clavin@qf.uva.es

ROCÍO MÍNGUEZ SAN JOSÉ

LICENCIADA EN QUÍMICA

MINGUEZ\_2006@HOTMAIL.COM

Recibido 3/04/2016/Aceptado: 9/01/2017

Cómo citar:

DOI: <https://doi.org/10.24197/trp.30.2017.159-182>

**Resumen:** En este artículo se plantean diferentes estrategias didácticas para facilitar la enseñanza y el aprendizaje de la radiactividad, uno de los contenidos básicos de la asignatura de Física de 2º Curso de Bachillerato. En el diseño de las actividades se ha tenido en cuenta la naturaleza abstracta del fenómeno de la radiactividad, el formalismo matemático necesario para su descripción y su repercusión en la sociedad. Asimismo, se ha puesto especial interés en la utilización de materiales cotidianos, ya que estos son fácilmente accesibles y, además, permiten que los alumnos puedan ver la conexión entre la ciencia y el mundo real.

**Palabras clave:** Enseñanza de la Física; radiactividad, aprendizaje significativo, estrategias de enseñanza, materiales cotidianos, bachillerato.

**Abstract:** In this paper, different strategies are proposed for effective learning and teaching of radioactivity. This topic is a central part of the physics curriculum in high school. The abstract nature of the radioactivity phenomenon, the mathematical formalism required for its description, and its influence in the society have been taken into account in the design of the activities. Special emphasis has been put on the use of everyday materials since these are easily accessible and allow students see the connection between science and the real world.

**Keywords:** Physics teaching; radioactivity, meaningful learning, educational strategies, everyday materials, high school.

### Sumario:

1. Introducción
  2. Contenidos Científicos y Metodología Didáctica
  3. Actividades para la enseñanza y aprendizaje de la radiactividad
  4. Conclusiones
-

## 1. INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de la radiactividad no solo supuso un extraordinario avance científico en el campo de la física sino que también ha tenido un gran impacto en la medicina, geología, arqueología e industria (Atwood y Sheline, 1989). No es extraño, por tanto, que entre los contenidos básicos de la asignatura Física de 2º Curso de Bachillerato se incluyan los relacionados con el fenómeno de la radiactividad. La comprensión de los conceptos decaimiento radiactivo, vida media y periodo de semidesintegración es también fundamental para el aprendizaje de contenidos de otras áreas de la ciencia como química, biología, geología y paleontología, entre otras.

Una de las principales dificultades que presenta la enseñanza de la radiactividad en el bachillerato es que, antes de que sea impartida en las clases, los alumnos tienen algunas ideas acerca de esta materia, adquiridas principalmente a través de los medios de comunicación. Estos conceptos previos o concepciones alternativas, muchas veces erróneas, tienen una influencia decisiva en el proceso de enseñanza-aprendizaje (De Posada y Prieto, 1989). Dentro de la corriente constructivista, la identificación de los errores conceptuales y las ideas intuitivas de los estudiantes son etapas cruciales para promover un aprendizaje significativo (Nakiboglu y Tekin, 2006). Es por ello que los estudios sobre concepciones alternativas han ocupado un lugar destacado en la investigación en enseñanza de las ciencias durante las dos últimas décadas.

Se han llevado a cabo algunas investigaciones sobre las creencias que los estudiantes de bachillerato (De Posada y Prieto, 1989; Millar y Gill, 1996; Gutiérrez, Capuano, Perrotta, Fuente, y Follari, 2000) y estudiantes universitarios de cursos introductorios de Física (Prather y Harrington, 2002; Prather, 2005) tienen acerca de la radiactividad. Estos estudios revelan que muchos estudiantes no distinguen entre los conceptos radiación y material radiactivo, tienen la idea de que si un objeto es expuesto a la radiactividad se convierte en radiactivo, no comprenden el papel que desempeñan los núcleos atómicos en los procesos radiactivos o interpretan el periodo de semidesintegración como el tiempo en que la masa y el volumen de una sustancia radiactiva se reduce a la mitad.

La enseñanza basada en un enfoque tradicional que incluye clases teóricas principalmente de tipo expositivo, experimentos de laboratorio y resolución de problemas no consigue cambiar las ideas intuitivas iniciales de los alumnos

cuando éstas son diferentes de las establecidas científicamente (Prather, 2005). Esto se debe, en parte, a que los alumnos son incapaces de aplicar ideas científicas a situaciones de la vida real y así su conocimiento previo del mundo cotidiano no se altera por la enseñanza de las ciencias (Millar, Klaassen y Eijkelhof, 1990).

Millar, Klaassen y Eijkelhof (1990) señalan que una estrategia para promover el cambio del modelo mental que los alumnos tienen acerca del fenómeno de la radiactividad consiste en indagar en sus ideas sobre el mismo proporcionándoles ocasiones para clarificarlas y cambiarlas si son equivocadas. Para ello, proponen situar el tópico en el contexto del mundo real mediante actividades basadas en noticias periodísticas. En éstas, es frecuente el uso de expresiones poco precisas; el que el alumno sea capaz de detectar errores o explicaciones confusas y de corregirlos puede ser un indicio de su cambio conceptual.

Esteban y Pérez-Esteban (2012) describen una serie de pautas metodológicas para introducir en el aula contenidos científicos relacionados con la radiactividad a través de una noticia de prensa, el envenenamiento con polonio de un ex espía ruso.

Por otra parte, el aprendizaje de conceptos relacionados con el fenómeno de radiactividad resulta difícil debido al alto grado de abstracción de los mismos, la terminología empleada y el nivel de conocimientos matemáticos requerido para su descripción. El uso de analogías como recurso didáctico puede ayudar en la adquisición de procedimientos y conceptos abstractos (Alfieri, Nokes-Malach y Schunn, 2013).

Schultz (1997) propone explicar los conceptos asociados a la radiactividad mediante una analogía con el juego de dados. Según este autor, dicha analogía ofrece una visión intuitiva de los conceptos radiactividad y período de semidesintegración y proporciona, además, una conexión lógica con el formalismo matemático y tratamiento gráfico que describe el decaimiento radiactivo.

La desmotivación y la falta de interés de los alumnos hacia las ciencias, en general, y a la Física, en particular, es otro de los problemas a los que se enfrentan los profesores de esta materia. Solbes, Montserrat, y Furio (2007) señalan que una de las causas del descenso de alumnos que eligen la asignatura de Física en el bachillerato es la visión negativa que tienen de la misma; la consideran una asignatura muy difícil, aburrida y alejada de la vida cotidiana.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, en este trabajo se proponen diferentes estrategias que permitan al alumno alcanzar un aprendizaje significativo de la radiactividad y fomenten su interés por el estudio de esta materia. En el desarrollo de las actividades se utilizan situaciones de la vida cotidiana que, además de actuar como elemento motivador, sirven para mostrar los procedimientos y valores de la actividad científica.

## 2. CONTENIDOS CIENTÍFICOS Y METODOLOGÍA DIDÁCTICA

A continuación, se describen brevemente los contenidos científicos y los recursos didácticos en los que se apoya la propuesta educativa que se presenta en este trabajo.

### 2.1 Contenidos científicos

El término radiactividad hace referencia a la emisión de radiación ionizante (partículas alfa, partículas beta, rayos gamma) por parte de ciertas sustancias, llamadas *sustancias radiactivas*. Los elementos que constituyen dichas sustancias tienen *isótopos radiactivos* que se caracterizan por tener núcleos atómicos inestables. Conviene precisar que en la naturaleza existen elementos que tienen isótopos estables e isótopos radiactivos así como elementos en que todos los isótopos son radiactivos.

La radiactividad es un proceso nuclear en el transcurso del cual los núcleos inestables se transforman espontáneamente en otros núcleos diferentes que pueden ser estables o no, y el proceso continúa hasta que finalmente acaba en un isótopo estable. Este proceso se denomina *decaimiento o desintegración radiactiva*.

La desintegración de un núcleo dado es un proceso espontáneo y aleatorio. No es posible saber cuándo un núcleo se va a desintegrar; sólo es posible obtener datos que se refieran a una gran cantidad de núcleos. Por tanto, el estudio de dichos procesos requiere un tratamiento estadístico. Se ha observado que la desintegración radiactiva sigue una ley exponencial decreciente:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Donde  $N$  es el número de núcleos radiactivos presentes después de un cierto tiempo  $t$ ,  $N_0$  el número de núcleos radiactivos en el instante inicial y  $\lambda$  es la constante de desintegración radiactiva.  $\lambda$  es característica de cada isótopo radiactivo y representa la probabilidad por unidad de tiempo de que un núcleo cualquiera se desintegre.

Otros conceptos importantes relacionados con los procesos radiactivos son la vida media y el período de semidesintegración. La vida media,  $\tau$ , representa el tiempo promedio que debe transcurrir para que un núcleo atómico se desintegre; es inversamente proporcional a la constante de desintegración ( $\tau=1/\lambda$ ). El periodo de semidesintegración,  $T_{1/2}$  se define como el tiempo necesario para que el número de núcleos radiactivos inicialmente presentes en una muestra se reduzca a la mitad.

Por último, cabe señalar que se distinguen dos tipos de radiactividad según su origen: *la radiactividad natural*, en la que la emisión de radiación es producida espontáneamente por sustancias existentes en la naturaleza, y *la radiactividad artificial*, que surge de isótopos radiactivos obtenidos artificialmente mediante reacciones nucleares.

## 2.2 Analogías

Desde una perspectiva constructivista del aprendizaje, los conocimientos previos de los alumnos juegan un papel crucial en la construcción de nuevos significados (Gallegos, 1996). Como señalan Brown y Clement (1989) no se logrará un aprendizaje significativo si la enseñanza no se organiza sobre el conocimiento existente. En este contexto, las analogías, en las que se utiliza una situación familiar para explicar un concepto nuevo (Dagher y Cossman, 1992) son de especial importancia en la enseñanza.

Por otro lado, el papel que desempeñan las analogías en el trabajo científico también justifica su uso como estrategia didáctica en la enseñanza de las ciencias, en general, y de la Física, en particular. Los científicos las emplean para generar nuevos conocimientos y para comunicar sus teorías a otros científicos y al público (Podolefsky y Finkelstein, 2006). A modo de ejemplo, Stephen Hawking utilizó al menos 74 analogías de la vida cotidiana en su libro *A brief history of time* para explicar conceptos abstractos de física cuántica y astrofísica (Harrison y Treagust, 2006).

Según Fernández, González y Moreno (2003: 83) “aprender ciencias requiere reconstruir en el aula los conceptos científicos”. Las analogías pueden ayudar a esta reconstrucción ya que facilitan la visualización de conceptos abstractos, muestran similitudes entre el mundo real y los nuevos conceptos y fomentan la motivación (Aubusson, Treagust y Harrison, 2009).

La forma en que las analogías se presentan en las clases de ciencias tiene importantes consecuencias en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Dentro de la corriente constructivista, Glynn (1991) ha desarrollado un modelo para

utilizarlas de una forma sistemática, el Teaching-With-Analogies Model (TWA). Este modelo consta de las siguientes etapas básicas:

- Se introduce el tópico o concepto a aprender.
- Se presenta el análogo o conocimiento conocido.
- Se identifican las características más relevantes del análogo y del tópico.
- Se establecen relaciones entre el tópico y el análogo analizando sus semejanzas y diferencias.
- Se identifican las limitaciones de la analogía.
- Se obtienen conclusiones sobre el tópico.

No obstante, cabe señalar que, aunque las analogías pueden ser instrumentos eficaces en el aprendizaje, si no están bien planificadas pueden dar lugar a concepciones erróneas o a que el aprendizaje de la analogía sea asumido como objeto de estudio (Oliva, Aragón, Mateo y Bonat, 2001; Raviolo y Garritz, 2007).

### **2.3 Experimentos científicos**

Al tratarse la Física, de una disciplina teórico-experimental, la realización de actividades de tipo experimental resulta imprescindible en los procesos de enseñanza y aprendizaje de la misma. Sin embargo, una exhaustiva revisión (Barberá y Valdés, 1996) de las investigaciones realizadas sobre la efectividad del trabajo práctico en la enseñanza de las ciencias indica que las experiencias de laboratorio no son una herramienta que garantice el éxito del aprendizaje. Estas limitaciones pueden estar asociadas al enfoque tradicional de las prácticas “tipo receta de cocina” en las que el papel del alumno está “circunscrito a la aplicación de un procedimiento dado, esperando obtener resultados “correctos” ya predeterminados, por lo que queda poco lugar para su imaginación, creatividad y desafíos cognitivos” (Flores y Caballero, 2009: 88).

La ciencia en el bachillerato debería proporcionar al alumno experiencias en los métodos de razonamiento e investigación científica y en la aplicación del conocimiento científico a la vida cotidiana (Hofstein y Lunetta, 2003). Con el fin de que el alumno practique la ciencia, Hodson (1994) propone considerar cuatro actividades principales:

- Diseño y planificación
- Realización práctica y recogida de datos
- Reflexión para examinar e interpretar los hallazgos experimentales

- Registro y elaboración de un informe para uso personal o para comunicarlo a otros.

Uno de los problemas para la realización de actividades experimentales en la asignatura de Física de Bachillerato es la necesidad de equipos especiales cuyo coste puede ser elevado. Los experimentos deberían ser concebidos como demostraciones realizadas por el profesor, es decir, experiencias de cátedra sin intervención del alumno. En contraposición, Vollmer y Möllmann (2011) proponen otra categoría de experimentos, aquellos que utilizan objetos de la vida cotidiana. Aunque su principal objetivo es aumentar la motivación de los alumnos hacia el estudio de la Física, pueden ayudar a conectar los contenidos físicos con la vida cotidiana, proporcionando una interpretación del mundo real.

## 2.4 Medios de Comunicación

La visión que los estudiantes tienen de la ciencia es el resultado de lo que aprenden durante su formación académica y de lo que aprenden a través de los medios de comunicación (prensa, televisión, Internet,...) o de visitas a museos de ciencia, es decir, en un contexto informal (Hodson, 2008). La ciencia en ambos contextos es muy diferente ya que tienen objetivos claramente diferenciados: la comunicación en el caso de la prensa y la enseñanza en el contexto educativo (Oliveras, 2013).

La ciencia en los medios tiende a ser “ciencia en construcción” en contraste con la ciencia centrada en aspectos conceptuales que es la que se enseña principalmente en las aulas (Jarman y McClune, 2002). En los últimos años ha habido un creciente interés en el uso de los medios de comunicación como recurso didáctico en la enseñanza de las ciencias. Como ha señalado García-Carmona (2014: 497), no se puede obviar “el potencial de las noticias científicas ... por las informaciones que proporcionan sobre procesos de construcción de conocimiento científico, debates en torno a problemáticas sociocientíficas, etc., que pueden auspiciar el pensamiento crítico y reflexivo en el lector”.

Es bien conocido que los estudiantes utilizan Internet como primera opción en la búsqueda de información para realizar sus tareas escolares. Uno de los principales problemas que presenta este medio es la falta de control en la información publicada. Muchos sitios de Internet son foros o blogs donde cualquiera puede publicar temas científicos ofreciendo información inexacta o tendenciosa. Los estudiantes carecen de la capacidad de distinguir esta información de la procedente de fuentes más fiables y necesitan, por tanto, la

ayuda del profesor para conseguir un aprendizaje eficaz (Metzger, Flanagan, y Zwarun, 2003).

En relación con el tema que nos ocupa, Sesen e Ince (2010) analizaron las 200 primeras páginas que aparecen en Google cuando se utiliza como palabras clave “*radiación y radiactividad*”. Como resultado de su investigación encontraron que un elevado número de ellas contenían información incorrecta. Es evidente que uno de los objetivos de la enseñanza de las ciencias debería ser formar alumnos que sepan buscar información, que tengan criterio para decidir entre diferentes opciones y que sean capaces de construir conocimiento a partir de la información (Márquez y Prat, 2005).

### **3. ACTIVIDADES PARA LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LA RADIATIVIDAD**

La presente propuesta educativa incluye un conjunto de actividades que han sido planificadas con el propósito de que los alumnos sean capaces de:

- Comprender los conceptos relacionados con la radiactividad y las expresiones matemáticas que se emplean en su descripción.
- Valorar la importancia que tiene la preparación de tablas de datos bien organizadas y el tratamiento de los mismos, con el fin de observar las regularidades existentes y el planteamiento de las deducciones correspondientes.
- Adquirir habilidades entre las que se incluye el manejo de ordenadores y programas para transformar los datos en cantidades de interés conceptual.
- Diseñar y realizar experimentos e interpretar los resultados obtenidos.
- Presentar resultados en el estilo y formato comúnmente empleado en las ciencias.
- Utilizar las tecnologías de la información para obtener información y saber evaluar su contenido.
- Conocer y valorar los beneficios y los problemas que las aplicaciones de la radiactividad pueden generar en la sociedad y el medio ambiente.

#### **3.1 Analogía para la desintegración radiactiva: juego de dados**

La desintegración radiactiva, es un proceso aleatorio, es decir, está sometido al azar, y, por tanto, gobernado por leyes probabilísticas o estadísticas. El uso de una analogía que implique un juego de azar facilitaría notablemente la comprensión de dicho proceso. En este trabajo se desarrolla la analogía del juego de dados propuesta por Schultz (1997) para explicar la ley de desintegración radiactiva.

El juego de dados permite trabajar sobre los conceptos claves del proceso de desintegración radiactiva: el carácter aleatorio del proceso, la constante de desintegración radiactiva, la vida media de isótopos radiactivos y el período de semidesintegración. Además de comprender contenidos científicos, el desarrollo de la analogía permite al alumno adquirir competencias propias del trabajo científico: utilización del lenguaje matemático para cuantificar fenómenos físicos, elaboración de tablas y gráficas e interpretación de los resultados obtenidos.

Antes de plantear la analogía en el aula es necesario planificarla minuciosamente, lo que conlleva ponerla en práctica para evaluar su viabilidad, y diseñar una serie de actividades para alcanzar los objetivos propuestos.

### **3.1.1. Descripción de la analogía**

Un isótopo radiactivo está constituido por núcleos inestables e idénticos que tienen, por tanto, la misma probabilidad de desintegrarse. En la analogía, para representar dicho isótopo, utilizamos un conjunto de dados iguales; cada dado se asocia a un núcleo. Para representar isótopos distintos se utilizan dados con un número diferente de caras. En la desintegración nuclear los núcleos inestables emiten radiación y se transforman en núcleos estables. En la analogía, los núcleos inestables son como dados en los que, después del lanzamiento, aparece un cierto número elegido previamente, y se retiran del juego.

El estudio de los procesos aleatorios requiere un tratamiento estadístico por lo que el número de dados usados en el juego debe ser elevado, por ejemplo 200. No obstante, se obtienen esencialmente los mismos resultados jugando una sola vez con 200 dados que jugando 20 veces con 10 dados. Las reglas del juego para un conjunto de dados de un tipo determinado, por ejemplo de 6 caras, son:

- Se dispone de 6 dados de 6 caras y se elige un número que pudiera salir al lanzar los dados. Este número y el tipo de dados se registran en una hoja de cálculo.
- Se lanzan los dados y aquellos en los que salga el número seleccionado se retiran del juego: representan núcleos desintegrados. Al lado de un número

que representa la tirada, se anota el número de dados que permanecen en el juego. La tirada 0 representa que aún no hemos lanzado los dados.

- Se continúa jugando con los dados restantes. El juego finaliza cuando el número elegido ha salido en los 6 dados.

La actividad se llevaría a cabo en el aula de informática, agrupando a los alumnos por parejas. En una clase típica de 20 alumnos, si cada pareja repite cuatro veces el juego con un tipo de dados y se juntan los resultados de todas las parejas, el número total de dados en el juego sería 240 ( $10 \times 4 \times 6$ ). Para simular los resultados que se obtendrían, hemos realizado el juego 40 veces empleando en cada juego 6 dados de 6 caras, lo que es equivalente a un juego con 240 dados. El juego se realizó también con dados de 4 caras.

Un aspecto fundamental para que la analogía sea eficaz es que el alumno identifique correctamente los análogos, los tópicos y las relaciones entre ellos. En la Tabla 1 se presentan los tópicos y sus correspondientes análogos.

**Tabla 1. Relación entre el análogo y el tópico.**

ANÁLOGO	TÓPICO
Conjunto de 240 dados de 4 caras	Isótopo radiactivo A
Conjunto de 240 dados de 6 caras	Isótopo radiactivo B
Dado de 4 caras	Núcleo del isótopo radiactivo A
Dado de 6 caras	Núcleo del isótopo radiactivo B
Una tirada	Unidad de tiempo
Dados en los que ha salido el número elegido (dados que se retiran del juego)	Núcleos desintegrados que se ha transformado en núcleos estables.
Dados que permanecen en el juego	Núcleos que no se han desintegrado
Número de tiradas hasta que se retiran la mitad de los dados iniciales	Periodo de semidesintegración: tiempo transcurrido hasta que la mitad de los núcleos iniciales se desintegran
Fin del juego (en todos los dados ha salido el número elegido)	Isótopo estable (no radiactivo) formado por núcleos estables que no se desintegran

El tiempo estimado para la práctica del juego en el aula es de unos 15 minutos, ya que, en promedio, se tarda 6 minutos en finalizar cuatro juegos con dados de 4 caras y 9 minutos con dados de 6 caras. Los dados de 4 caras se pueden conseguir en tiendas especializadas en comics y juegos específicos; el precio de cada dado es de 1€ por lo que el coste total de los dados de este tipo necesarios

para realizar la experiencia sería de 60 € cantidad asumible por cualquier centro. Los dados de 6 caras son mucho más asequibles y baratos.

### 3.1.2. Tratamiento de datos y análisis de resultados

El tratamiento de los datos obtenidos con el juego de dados requiere la elaboración de tablas y gráficas, para lo cual se utilizó el programa Excel. Todos los datos empleados para construir las gráficas que se presentan a continuación son reales.

Para cada tipo de dados se elabora una tabla en la hoja de cálculo, en la que se anotan los resultados obtenidos en los 40 juegos. La fracción permanente es el cociente entre la suma de los dados que permanecen en el juego después de cada tirada y el número de dados iniciales.

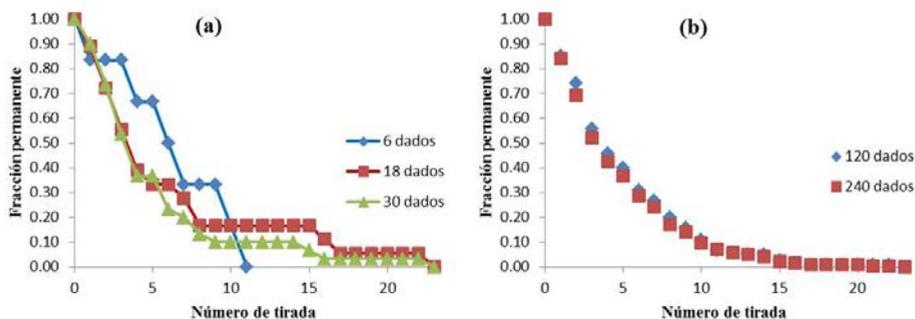
Uno de los objetivos que se pretenden con esta analogía es que el alumno comprenda que se necesita un gran conjunto de núcleos para establecer una ley que describa la desintegración radiactiva, ya que es un *proceso aleatorio*. Es importante que entienda que no tiene sentido intentar predecir cuánto tiempo va a tardar en desintegrarse un determinado núcleo de la misma manera que no puede saberse al lanzar un dado en qué tirada saldrá el número seleccionado. Sólo se puede averiguar, en un conjunto muy grande de núcleos, cuántos van a permanecer en un tiempo determinado o cuántos van a desintegrarse al cabo de un cierto tiempo.

En la Figura 1 se representa la fracción de dados que permanecen después de cada tirada en función del número de tiradas para juegos con un número pequeño de dados: 6, 18 y 30 (Figura 1 a) y con un número grande de dados: 120 y 240 (Figura 1 b). A partir de los resultados presentados en la Figura 1(a) es evidente que no se puede establecer una ley que proporcione una descripción matemática de un proceso aleatorio cuando el número de dados (núcleos) es pequeño. Sin embargo, si el número de dados (núcleos) es grande (Figura 1 b) se observa una regularidad en los resultados; éstos se ajustan a una función exponencial negativa similar a la ley de desintegración radiactiva. Durante la realización del juego con 6 dados, los alumnos ya han podido comprobar el carácter aleatorio del mismo al observar que, en cada juego, el número de tiradas necesarias para finalizarlo es diferente.

Otro aspecto que se muestra con esta analogía es que diferentes isótopos radiactivos presentan diferente estabilidad. Se observa que, en promedio, se necesitan menos tiradas para finalizar el juego con el conjunto de dados que tenga el menor número de caras, ya que en este caso hay más posibilidades de

que salga el número elegido. De esta forma, el dado de 4 caras representa a un núcleo de un isótopo más inestable que el de 6.

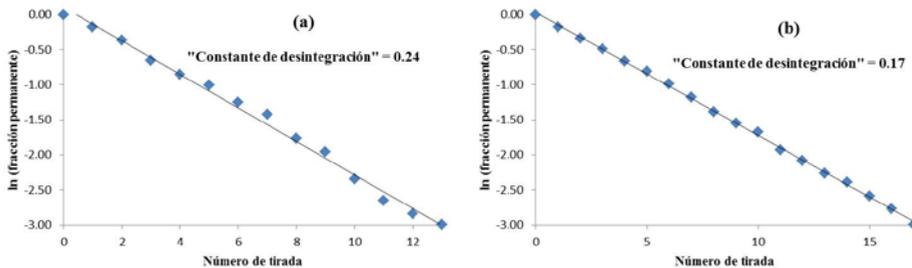
**Figura 1. Resultados obtenidos en el juego (dados de 4 caras): (a) con un número pequeño de dados; (b) con un número elevado de dados.**



Un error típico de los alumnos es creer que  $N$  en la ley de desintegración radiactiva representa el número de núcleos que se desintegran. Las actividades realizadas, representar en una tabla y en gráficas la fracción de dados que permanecen en el juego, ayudan a comprender y recordar que  $N$  representa el número de núcleos que permanecen sin desintegrar después de un tiempo  $t$ .

Con la analogía también se puede explicar el procedimiento para calcular la constante de desintegración,  $\lambda$ . Si se toman logaritmos neperianos en la ecuación de la Ley de desintegración radiactiva, se tiene  $\ln N/N_0 = -\lambda t$ . La representación gráfica de  $\ln N/N_0$  frente a  $t$  es una línea recta cuya pendiente es  $-\lambda$ . En las figuras 2(a) y 2(b) se representan los mejores ajustes a una función logarítmica para los juegos con los conjuntos de dados de 4 y 6 caras, respectivamente.

**Figura 2. “Constante de desintegración”: (a) en el juego de dados de cuatro caras: (b) en el juego de dados de seis caras**

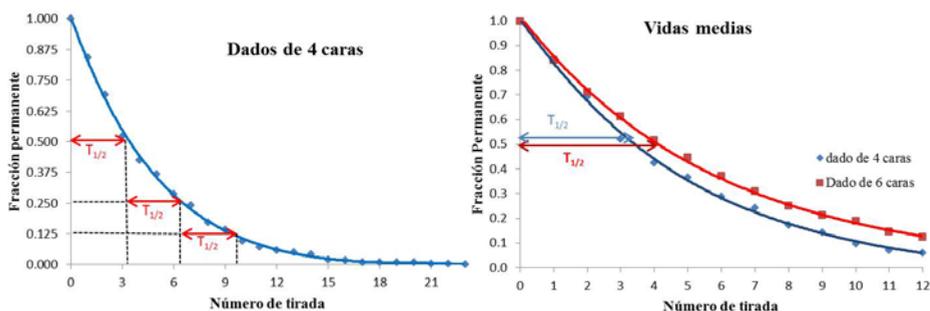


Los valores de  $\lambda$  obtenidos son 0.24 y 0.17 para los conjuntos de dados de 4 y 6 caras, respectivamente. Este resultado muestra que la constante de desintegración es característica de cada isótopo radiactivo y que, cuanto mayor sea su valor, el isótopo será más inestable. También se puede observar que la *vida media* ( $1/\lambda$ ) es característica de cada isótopo y que cuanto mayor sea más estable es el isótopo.

El juego de los dados también ayuda a comprender el significado del término *periodo de semidesintegración*. Al estar relacionado con el número de tiradas necesario para que permanezcan en el juego la mitad de los dados iniciales, se puede ver que hace referencia al tiempo transcurrido hasta que se desintegran la mitad de los núcleos iniciales de un isótopo.

En la Figura 3 (a) se representa el “periodo de semidesintegración” obtenido con el juego realizado con los dados de 4 caras. En esta gráfica se observa que dicho período es independiente del número de átomos iniciales del isótopo radiactivo, es decir, del tamaño de la muestra. La constancia del periodo de semidesintegración se utiliza en la práctica para determinar las edades de objetos arqueológicos. También se puede ver que para períodos de semidesintegración sucesivos cada vez se desintegran menos núcleos en un mismo tiempo, por lo que una muestra radiactiva puede tardar mucho en convertirse en inactiva. Este es uno de los peligros de la radiactividad.

**Figura 3. “Períodos de semidesintegración”:** (a) para el conjunto de dados de 4 caras; (b) para los conjuntos de dados de 4 y 6 caras.



Otro aspecto que se puede mostrar con esta analogía es que cada isótopo radiactivo tiene un periodo de semidesintegración característico (Figura 3b) y que éste es una medida de la estabilidad del isótopo; cuanto menor sea  $T_{1/2}$ , con mayor rapidez se producirá la desintegración y el isótopo será menos estable.

Una vez finalizado el tratamiento de datos, se realizará una puesta en común en la que se reflexionará sobre las siguientes cuestiones:

- ¿Se puede saber cuándo se desintegrará un núcleo de un isótopo radiactivo?
- ¿Por qué es necesario hacer un tratamiento estadístico para estudiar el proceso de desintegración radiactiva? ¿Qué significa que la radiactividad es un proceso aleatorio?
- ¿Qué tipo de función matemática relaciona la fracción de núcleos que permanece sin desintegrarse y el tiempo?
- Si queremos determinar la constante de desintegración radiactiva ¿Qué variables tenemos que representar en los ejes  $x$  e  $y$  de la gráfica?
- ¿Qué significa el término periodo de semidesintegración? ¿Tiene sentido determinar el período de semidesintegración de un núcleo radiactivo?
- ¿Cuál es la relación entre la vida media y la constante de desintegración?
- ¿Cuál es la diferencia entre período de semidesintegración y vida media?
- Cuanto mayor sea la constante de desintegración, los núcleos de un isótopo radiactivo serán ¿más o menos estables?
- Si el período de semidesintegración es muy grande ¿son muy inestables los núcleos del isótopo? El valor de la constante de desintegración será ¿alto o bajo?
- Un isótopo radiactivo ¿desaparece a medida que transcurre el tiempo?
- Los períodos de semidesintegración del carbono-14 y del uranio-238 son 5730 años y 4500 millones de años, respectivamente. ¿Por qué se emplea uranio-238 en investigaciones sobre la edad de la tierra en lugar de carbono-14?

Un problema que puede presentar esta analogía es que, como el juego finaliza cuando no quedan dados presentes en el mismo, el alumno crea que cuando un núcleo se desintegra desaparece. Conviene insistir, por tanto, en que los núcleos inestables no desaparecen sino que se convierten en núcleos estables (dados retirados del juego). No obstante, creemos que el uso de la analogía es muy recomendable ya que no sólo puede ayudar al aprendizaje y la enseñanza de conceptos abstractos complejos sino que permite que el alumno desarrolle las competencias, actitudes y habilidades propias del trabajo científico.

### 3.2 Experimento científico sobre el decaimiento exponencial

En la formación científica del alumno es fundamental la realización de experimentos pues le acercan al modo de trabajar de los científicos. En el bachillerato, no es fácil realizar prácticas de laboratorio relacionados con la radiactividad por razones tanto económicas (un equipo básico puede costar alrededor de 1800 euros) como de seguridad. Sin embargo, se puede estudiar el decaimiento exponencial característico de la ley de desintegración radiactiva observando la disminución de la altura de la espuma de la cerveza con el tiempo (Leike, 2002, García-Molina, 2013).

A continuación se describe el experimento, en el que las variables que se van a medir son la altura de la espuma ( $h$ ) y el tiempo ( $t$ ). Para realizar la experiencia, se necesita un botellín de cerveza, un vaso cilíndrico, regla, cronómetro y el programa Excel para el tratamiento de datos. Inmediatamente después de abrir el botellín, se echa la cerveza en el vaso. La espuma alcanza una altura máxima en pocos segundos. Una vez alcanzada dicha altura se pone en marcha el cronómetro. La espuma de la cerveza tarda unos pocos minutos en desaparecer, por lo que se aconseja medir el tiempo en intervalos de 15 segundos. En la Tabla 2 se presentan algunos de los resultados obtenidos en el presente experimento con cerveza “Mahou”.

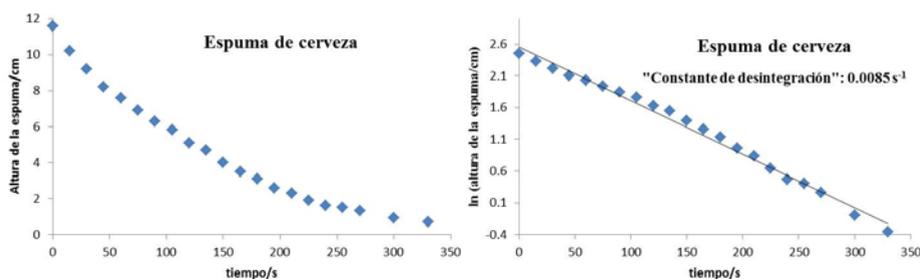
**Tabla 2. Valores obtenidos en la experiencia con cerveza.**

<b>t/s</b>	0	15	30	45	60	75	90	105	120	150	180	210	240	270	300	330
<b>h/cm</b>	11.6	10.2	9.2	8.2	7.6	6.9	6.3	5.8	5.1	4.0	3.1	2.3	1.6	1.3	0.9	0.7

Como se puede observar en la Figura 4 (a), la disminución de la altura de la espuma con el tiempo se aproxima a un decaimiento exponencial. Para confirmarlo se representa  $\ln h$  frente a  $t$ ; el comportamiento lineal que se aprecia en la Figura 4 (b) evidencia claramente el decaimiento exponencial de la espuma de la cerveza con el tiempo. El comportamiento de la espuma es análogo al comportamiento de una sustancia radiactiva. El valor negativo de la

pendiente de la recta es el valor de la “constante de desintegración de la espuma” ( $0,0085 \text{ s}^{-1}$ ), que sería el análogo de la constante de desintegración radiactiva de un isótopo.

**Figura 4. (a) Disminución de la altura de la espuma de la cerveza con el tiempo; (b) representación logarítmica.**



La actividad se plantea a los alumnos con un interrogante ¿disminuirá la espuma de la cerveza con el tiempo según una ley exponencial como lo hace la desintegración radiactiva? Es importante que comprendan que para conocer la respuesta necesitan experimentar. A continuación se les pide que diseñen el procedimiento experimental. El material necesario para realizar la experiencia es fácil de conseguir, por lo que el experimento se propone como actividad individual fuera del aula. Las actividades a realizar por el alumno son:

- Realización del experimento, registro de datos y elaboración de una tabla en la que se indiquen las variables físicas y sus correspondientes unidades.
- Tratamiento gráfico de los datos utilizando una hoja de cálculo y obtención de la “constante de desintegración de la espuma”.
- Elaboración de un informe que incluya la descripción del experimento, los resultados expresados en las formas habitualmente empleada en ciencias (tablas y gráficas), la interpretación de los resultados, los comentarios que consideren oportunos y las conclusiones obtenidas.

Es lógico suponer que los alumnos habrán utilizado cervezas de diferentes marcas en sus experimentos y, por lo tanto, diferirán los valores que obtienen de la “constante de desintegración de la espuma”. Comparando sus resultados, podrán concluir que dicha constante depende del tipo de cerveza empleada en clara analogía con la constante de desintegración radiactiva característica de cada tipo de isótopo radiactivo.

Esta experiencia, además de despertar el interés de los alumnos al investigar un fenómeno cotidiano, demuestra cuantitativamente la consistencia de una ley

fenomenológica con los datos experimentales. Por otra parte, refuerza el aprendizaje de los contenidos y procedimientos relativos a la radiactividad tratados con la analogía del juego de los dados.

### **3. 3 Medios de comunicación y radiactividad.**

El descubrimiento de la radiactividad ha tenido un gran impacto en el desarrollo tecnológico, económico y militar de la sociedad actual, motivo por el cual se publican frecuentemente noticias relacionadas con este tópico en los medios de comunicación. Sin embargo, una gran parte de la información se refiere al armamento nuclear y a los problemas de salud y medio ambiente asociados a los contaminantes radiactivos de los residuos de las centrales nucleares. Debido a esta “educación no formal”, los alumnos, en su mayoría, se han formado una opinión negativa acerca de radiactividad; la asocian a bombas atómicas y catástrofes como las de Chernobyl y Fukushima.

La formación científica implica, además de la adquisición de los conocimientos y métodos de la ciencia, el conocimiento de los beneficios e inconvenientes que generan los descubrimientos científicos. Así se estará en condiciones de analizar críticamente la información que se encuentra en los distintos medios y de tener una opinión bien fundamentada sobre temas polémicos que afectan a la sociedad. El desarrollo de estas competencias está recogido en dos de los objetivos fijados para el bachillerato en la LOMCE<sup>1</sup>: “desarrollar en los alumnos y las alumnas las capacidades que les permitan utilizar con solvencia y responsabilidad las tecnologías de la información y la comunicación” y “Conocer y valorar de forma crítica la contribución de la ciencia y la tecnología en el cambio de las condiciones de vida, así como afianzar la sensibilidad y el respeto hacia el medio ambiente”.

A continuación se proponen una serie de actividades orientadas a que los alumnos conozcan las relaciones entre ciencia, tecnología y sociedad. Con ellas se pretende también fomentar el hábito de lectura de temas científicos.

#### **3.3.1. Lectura de noticias de prensa relacionadas con la radiactividad**

Como introducción a los contenidos referentes a la radiactividad y con el propósito de atraer la atención y el interés de los alumnos, se propone la lectura de noticias que conecten contenidos científicos que van a aprender con el mundo real. El debate sobre la contribución de la energía nuclear a la solución

---

<sup>1</sup> Real Decreto 1105/2014, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato. BOE, Núm. 3, 3 de enero de 2015

del problema energético y los riesgos que entraña su uso (residuos radiactivos) está presente en la sociedad, por lo que es fácil encontrar noticias en la prensa relacionadas con la radiactividad. Hemos seleccionado dos noticias publicadas en periódicos de ámbito nacional. La primera se publicó en la sección de Medio Ambiente de El Mundo el 14/04/2015 y hace referencia al peligro de las emisiones de radiación en la central nuclear de Fukushima. La segunda noticia, publicada en El País el 25/11/2015 con motivo de la Cumbre de París sobre el Cambio Climático, alude al uso de energía nuclear como fuente no contaminante. En los Cuadros 1 y 2 se muestran extractos de ambas noticias.

**Figura 5. Extracto de una noticia del periódico EL MUNDO.**

**EL MUNDO, 14 Abril 2015**

**La máquina no pudo soportar los niveles de radiactividad  
El primer robot que entra en Fukushima 'muere' en tres horas**

La empresa japonesa responsable de la central nuclear de Fukushima ha admitido que los niveles de radiación actuales en uno de los reactores afectados por el desastre del 2011 siguen siendo tan altos que representan la muerte para un ser humano en menos de una hora de exposición

La conclusión se ha alcanzado tras el experimento ... con un robot al que se introdujo en el reactor ... La propia máquina no pudo soportar las ingentes dosis de radiactividad a la que se vio sometida, pese a que fue diseñada expresamente para dicha misión. Se pensaba que podía durar hasta 10 horas, pero dejó de responder a las 3 horas. El robot tuvo que ser abandonado en la vasija de contención del reactor después de recorrer sólo 15 metros, según admitió Tepco, la firma nipona propietaria de Fukushima.

Las mediciones del aparato no dejaban duda del ingente peligro que todavía representa esa estructura y oscilaron entre los 7 y hasta 9,7 Sievert por hora, .... La Unión Europea sólo admite 100 miliSievert cada 5 años para trabajadores expuestos a radiaciones y sólo 1 miliSievert, para la población normal.

Según, ...portavoz de Tepco, el objetivo final de esta maquinaria es encontrar un sistema que permita desmantelar el reactor, algo que está claro que no se puede realizar por medios humanos.

**Figura 6. Extracto de una noticia del periódico EL PAÍS.**

**EL PAÍS, 25 Noviembre 2015**

**La industria nuclear se reivindica en la lucha contra el cambio climático**

Unos lo llaman reconversión, otros hablan de una revolución. Si de la [cumbre del Clima de](#)

[París \(COP21\)](#) que arranca el próximo lunes sale un acuerdo sólido contra el calentamiento global, cambiará el esquema de producción de energía. Este sector es responsable de alrededor del 35% de las emisiones los gases de efecto invernadero generadas por el ser humano en todo el mundo. El objetivo a largo plazo que se quiere fijar es la descarbonización de la economía.

... las distintas tecnologías de producción buscan un hueco en el futuro energético. Así ocurre con la industria nuclear. El [Foro Nuclear de España](#) ha presentado un informe este miércoles en el que se reivindica como un arma contra el cambio climático. "Es una tecnología capaz de suministrar grandes cantidades de electricidad sin contaminar la atmósfera", sostiene esta organización. En efecto, las centrales no expulsan CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Pero tiene otros problemas asociados, [como el de los residuos](#), que permanecen activos durante miles de años y para los que no se ha encontrado una solución definitiva.

En el protocolo que se espera que se cierre durante la COP21 no está previsto que se hable de tecnologías concretas. Aunque solo se fija la necesidad descarbonizar la economía en general, muchos organismos internacionales sostienen que la mejor vía para ello son [las energías renovables](#).

Una vez leídas (fuera del aula), se les pide a los alumnos que identifiquen la información que se pretende transmitir con su publicación y se plantean preguntas orientadas a explorar si están al tanto de lo que sucede a su alrededor. Se indaga acerca de sus conocimientos sobre la catástrofe de Fukushima, el cambio climático, las cumbres del clima y sus objetivos, el efecto invernadero y los gases que lo producen, el significado de "descarbonización de la economía", la situación de la energía nuclear en España, etc. Los aspectos de la información que desconozcan los buscarán en Internet favoreciendo así la competencia de trabajo autónomo.

Las noticias presentadas, además de motivar a los alumnos, sirven para averiguar los conocimientos que tienen sobre la radiactividad y sus aplicaciones y detectar posibles concepciones erróneas. Con este fin, se les formulan preguntas del tipo ¿qué fuentes radiactivas conocéis?; ¿sólo producen radiación las armas nucleares o la industria nuclear?; si una persona es irradiada ¿se convierte en radiactiva?; ¿qué tipo de radiaciones emiten los materiales radiactivos?; ¿qué tipo de reacción se produce en una central nuclear?; ¿y en el sol?; ¿conocéis otras aplicaciones prácticas de la radiactividad?; las sustancias radiactivas ¿desaparecen cuando emiten radiación?

### **3.3.2. Investigaciones sobre la relación entre ciencia, tecnología y sociedad**

El aprendizaje de la radiactividad implica no solo comprender contenidos puramente científicos sino también conocer y valorar las repercusiones que los desarrollos tecnológicos propiciados por su descubrimiento han tenido y tienen en la sociedad. El tiempo limitado para impartir la materia hace que las relaciones entre ciencia, tecnología y sociedad, sean tratadas superficialmente

en las clases. Como alternativa proponemos que sean los propios alumnos quienes investiguen los beneficios y peligros de la radiactividad utilizando Internet como fuente de información.

La planificación, redacción y presentación del trabajo se plantea como una actividad cooperativa, potenciando así el trabajo en equipo. Se hará en pequeños grupos para que puedan contrastar ideas y, al mismo tiempo, aprendan a respetar las opiniones de los demás. Cada grupo elegirá uno de los temas siguientes:

- La radiactividad aplicada a la medicina (uso de radiaciones y de radioisótopos en medicina nuclear con propósitos de diagnóstico o con fines terapéuticos).
- La radiactividad aplicada a la agricultura y alimentación (control de plagas y preservación de alimentos).
- La radiactividad aplicada a la investigación en geología y arqueología (edad del planeta Tierra y de restos arqueológicos).
- Reactores nucleares para generar electricidad (ventajas y riesgos, situación de la energía nuclear en España).
- Contaminación radiactiva (origen, efectos y protección)
- Investigaciones en energía de fusión nuclear y tratamiento de residuos radiactivos.
- Biografía de Marie Curie.

La tarea se plantea como una actividad fuera del aula, a realizar paralelamente al desarrollo de los contenidos en las clases. El papel del profesor será el de orientador y guía en el desarrollo de la actividad y la búsqueda de información. En nuestra experiencia docente, hemos podido constatar que algunos alumnos se limitan a buscar en Internet una página web que trate la información pedida y a copiarla literalmente. Es esencial que los alumnos aprendan a valorar de forma crítica la información obtenida, es decir, a analizar la calidad del contenido de la página web y la fiabilidad de la fuente. Para ello se les recomienda: utilizar diferentes webs para contrastar la información, informarse de la cualificación del autor y cuál es el objetivo que pretende con la información.

Es imprescindible que, además de un informe escrito, cada grupo elabore una presentación en Power Point que servirá de base para una puesta en común con el resto de compañeros. En la valoración del trabajo se tendrá en cuenta su estructura general, la utilización de esquemas, gráficas, fotografías, etc., la calidad de las fuentes de información utilizadas y la conexión entre contenidos científicos, aspectos sociales y medioambientales. Los trabajos se subirán a una plataforma virtual para que estén a disposición de todos los alumnos.

Como resultado de estas actividades se espera formar alumnos capaces de distinguir la información fiable de la que no lo es y de tener una actitud crítica ante los problemas cotidianos. Al mismo tiempo, se espera fomentar el interés del alumno por las asignaturas de contenido científico al conectar lo que está aprendiendo con el mundo real.

#### **4. CONCLUSIONES**

La enseñanza y el aprendizaje de la radiactividad es una tarea compleja debido al alto grado de abstracción de los conceptos implicados y al lenguaje matemático necesario para su descripción. Estas características, comunes a otros contenidos de la asignatura de Física en el Bachillerato, son una de las razones por las que los alumnos no sienten interés por su estudio. A esta desmotivación contribuye también la forma descontextualizada del mundo real en que suele presentarse en el aula.

La propuesta educativa presentada en este trabajo plantea el uso de diferentes estrategias que, además de facilitar el aprendizaje significativo de los conceptos relacionados con el fenómeno de la radiactividad, favorecen el desarrollo de otras competencias propias de la actividad científica y ponen de manifiesto las relaciones entre ciencia, tecnología y sociedad. Un aspecto importante de dicha propuesta es que se puede llevar a la práctica aunque el centro disponga de pocos recursos, ya que el material requerido es fácilmente accesible. Otro aspecto que cabe destacar es el uso de objetos cotidianos en el desarrollo de las actividades propuestas; de esta manera, se pretende cambiar la percepción que tiene el alumno de las asignaturas de contenido científico como complejas y alejadas del mundo real, y que encuentre, por tanto, sentido a lo que está aprendiendo.

#### **BIBLIOGRAFÍA**

ALFIERI, L., NOKES-MALACH, T. J. y SCHUNN, C. D. (2013). "Learning through case comparisons: a meta-analytic review". *Educational Psychologist*, Vol. 48, nº2, 87-113.

ATWOOD, C. H. y SHELINE, R. K. (1989). "Nuclear chemistry: Include it in your curriculum". *Journal of Chemical Education*, Vol. 66, nº 5, 389-393.

AUBUSSON, P., TREAGUST, D. y HARRISON, A. (2009). "Learning and teaching science with analogies and metaphors". En S. M. RITCHIE (Ed.) *The World of Science Education: Handbook of Research in Australasia Volume 2* (pp. 199-216). Rotterdam, Netherlands: Sense Publishers.

BARBERÁ, O. y VALDÉS, P. (1996). "El trabajo práctico en la enseñanza de las ciencias: una revisión". *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 14, nº 3, 365-379.

BROWN, D. E. y CLEMENT, J. (1989). "Overcoming misconceptions via analogical reasoning: Abstract transfer versus explanatory model construction". *Instructional Science*, Vol. 18, nº 4, 237-261.

DAGHER, Z. y COSSMAN, G. (1992). "Verbal explanation given by science teachers: their nature and implications". *Journal of Research in Science Teaching*, 29, nº 10, 361-374.

DE POSADA, J. M. y PRIETO, T. (1989). "Ideas y representaciones de los alumnos sobre radiactividad". *Revista de Educación*, nº 289, 357-375.

ESTEBAN, S. y PÉREZ-ESTEBAN, J. (2012). "Estudiando el fenómeno de la radiactividad a través de noticias de prensa: el caso del espía ruso envenenado". *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, Vol. 9, nº 2, 294-306.

FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, J., GONZÁLEZ GONZÁLEZ, B. M. y MORENO JIMÉNEZ, T. (2003). "Las analogías como modelo y como recurso en la enseñanza de las ciencias". *Alambique*, nº 35, 82-89.

FLORES, J. y CABALLERO, M. C. (2009). "El laboratorio en la enseñanza de las ciencias: una visión integral en este complejo ambiente de aprendizaje". *Revista de Investigación*, Vol. 33, nº 68, 75-111.

GALLEGOS, J. A. (1996). "Reflexiones sobre la ciencia y la epistemología científica". *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 17, nº 2, 321-326.

GARCÍA-CARMONA, A. (2014). "Naturaleza de la ciencia en noticias científicas de la prensa: análisis del contenido y potencialidades didácticas". *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 32, nº 3, 493-509.

GARCIA-MOLINA, R. (2013). “Cinco experiencias sencillas de física moderna”. *Alambique*, nº 75, 28-35.

GLYNN, S. M. (1991). “Explaining science concepts: a teaching with analogies model”. En S. M. GLYNN, R. H. YEANY, y B. K. BRITTON (Eds.), *The psychology of learning science* (pp. 219-240). Hillsdale, N. J.: Laurence Erlbaum.

GUTIÉRREZ, E. E., CAPUANO, V. C., PERROTTA, T., DE LA FUENTE, A. M. y FOLLARI, B. (2000) “¿Qué piensan los jóvenes sobre radiactividad, estructura atómica y energía nuclear?” *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 18, nº 2, 247-254.

HARRISON, A. G. y TREGUST, D. F. (2006).”Teaching and learning with analogies”. En P. J. AUBUSSON, A. G. HARRISON y RITCHIE, S. M. (eds.), *Metaphor and Analogy in Science Education* (pp 11-24). Dordrecht, Netherlands: Springer-Verlag.

HODSON, D. (1994). “Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio”. *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 12, nº 3, 299-313.

HODSON, D. (2008). “Exploring nature of science issues: students’ views and curriculum images”. En D. HODSON (Ed.), *Towards Scientific Literacy. A Teachers’ Guide to the History, Philosophy and Sociology of Science* (pp. 23-40). Rotterdam, The Netherlands: Sense Publishers.

HOFSTEIN, A. y LUNETTA, V. N. (2004). “The laboratory in science education: foundations for the twenty-first century”. *Science Education*, Vol. 88, nº 1, 28-54.

JARMAN, R. y McCLUNE, B. (2002). “A survey of the use of newspapers in science instruction by secondary teachers in Northern Ireland”. *International Journal of Science Education*, Vol. 24, nº 10, 997-1020.

LEIKE, A. (2002). “Demonstration of the exponential decay law using beer froth”. *European Journal of Physics*, Vol. 23, 21-26.

MÁRQUEZ, C. y PRAT, A. (2005). “Leer en clase de ciencias”. *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 23, nº 3, 431-440.

METZGER, M. J., FLANAGIN, A. J. y ZWARUN, L. (2003). “College student Web use, perceptions of information credibility, and verification behavior”. *Computers & Education*, Vol. 41, nº 3, 271-290.

MILLAR, R. y GILL, J. S. (1996). “School students’ understanding of processes involving radioactive substances and ionizing radiation”. *Physics Education*, Vol. 31, nº 1, 27-33.

- MILLAR, R., KLAASSEN, K. y EIJKELHOF, H. (1990). "Teaching about radioactivity and ionising radiation: an alternative approach". *Physics Education*, Vol. 25, nº 6, 338-342.
- NAKIBOGLU, C. y TEKIN, B. B. (2006). "Identifying students' misconceptions about nuclear chemistry". *Journal of Chemical Education*, Vol. 8, nº 11, 1712-1718.
- OLIVA, J.M., ARAGÓN, M.M., MATEO, J. y BONAT, M. (2001). "Una propuesta didáctica basada en la investigación para el uso de analogías en la enseñanza de las ciencias". *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 19, nº 3, 453-470.
- OLIVERAS, B., MÁRQUEZ, C. y SANMARTÍ, N. (2013). "The use of newspaper articles as a tool to develop critical thinking in science classes". *International Journal of Science Education*, Vol. 35, nº 6, 885-905.
- PODOLEFSKY, N. S. y FINKELSTEIN, N. D. (2006). "Use of analogy in learning physics: the role of representations". *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, Vol. 2, nº 2, 020101 1-10.
- PRATHER, E. (2005). "Students' beliefs about the role of atoms in radioactive decay and half-life". *Journal of Geoscience Education*, Vol. 53, nº 4, 345-354.
- PRATHER, E. E. Y HARRINGTON, R. R. (2001). "Student understanding of ionizing radiation and radioactivity". *Journal of College Science Teaching*, Vol. 31, nº 2, 89-93.
- RAVIOLO, A. y GARRITZ, A. (2007). "Analogías en la enseñanza del equilibrio químico". *Educación Química*, Vol. 18, nº 1, 15-28.
- SCHULTZ, E. (1997). "Dice-shaking as an analogy for radioactive decay and first-order kinetics". *Journal of Chemical Education*, Vol. 74, nº 5, 505-507.
- SESEN, B. A. y INCE, E. (2010). "Internet as a source of misconception: "radiation and radioactivity". *The Turkish Online Journal of Educational Technology*, Vol. 9, nº 4, 94-100.
- SOLBES, J., MONTSERRAT, R. y FURIÓ C. (2007). "El desinterés del alumnado hacia el aprendizaje de la ciencia: implicaciones en su enseñanza". *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, nº 21, 91-117.
- VOLLMER, V. y MÖLLMANN, K. P. (2012). "Low cost hands-on experiments for Physics teaching". *Latin-American Journal of Physics Education*, Vol. 6 Suppl. I, pp. 3-9.