

Principios de diseño de una secuencia de enseñanza problematizada para el aprendizaje del modelo de carga eléctrica en Educación Primaria

Carolina Nicolás Castellano 

Didáctica General y Didácticas Específicas. Universidad de Alicante. España.
carolina.nicolas@ua.es

Rubén Limiñana Morcillo 

Didáctica General y Didácticas Específicas. Universidad de Alicante. España.
ruben.lm@ua.es

Asunción Menargues Marcilla 

Didáctica General y Didácticas Específicas. Universidad de Alicante. España.
a.menargues@ua.es

Sergio Rosa Cintas 

Didáctica General y Didácticas Específicas. Universidad de Alicante. España.
sergio.rosacintas@ua.es

Alexandra Rey Cubero 

Didáctica General y Didácticas Específicas. Universidad de Alicante. España.
sandra.rey@ua.es

Joaquín Martínez Torregrosa 

Didáctica General y Didácticas Específicas. Universidad de Alicante. España.
joaquin.martinez@ua.es

[Recibido: 20 agosto 2024, Revisado: 13 noviembre 2024, Aceptado: 14 enero 2025]

Resumen: En este estudio presentamos un análisis histórico y epistemológico como parte del proceso de investigación basada en el diseño (IBD), para el diseño de una secuencia de actividades para la enseñanza sobre carga eléctrica para alumnos de 10 a 12 años (o principiantes, en general). Nuestro trabajo profundiza en la investigación que se llevó a cabo desde la publicación del *De Magnete* de Gilbert (1600) hasta la invención, por Dufay (1733), de un modelo de carga eléctrica como propiedad general de todos los materiales que tiene dos variedades. Nuestras observaciones van acompañadas de un análisis didáctico para identificar posibles obstáculos para su aprendizaje. Como resultado se obtiene, además, la identificación del problema estructurante y de un plan para avanzar en él, dentro del modelo de enseñanza por investigación guiada o enseñanza problematizada.

Palabras clave: Enseñanza sobre carga eléctrica; Historia de la ciencia; Investigación basada en el diseño (IBD); Enseñanza problematizada

Design based research principles of a problematized teaching sequence for learning the electric charge model in primary education

Abstract: In this study, we present a historical and epistemological analysis as part of the design-based research (DBR) process for the design of a sequence of activities for teaching about electric charge to 10-12 year old students (or beginners, in general). Our paper delves into the research that has been carried out from the publication of Gilbert's *De Magnete* (1600) to the invention by Dufay (1733) of a model of electric charge as a general property of all materials that has two varieties. Our observations are accompanied by a didactic analysis to identify possible obstacles to their learning. As a result, we obtain, in addition, the identification of the structuring problem and a plan to advance in it, within the model of teaching by guided investigation or problematized teaching.

Keywords: Teaching about electric charge; History of Science; Design based research (DBR); Problem-based teaching

Para citar este artículo: Nicolás Castellano, C., Limiñana, R., Menargues, A., Rosa Cintas, S., Rey Cubero, A. y Martínez Torregrosa, J. (2025). Principios de diseño de una secuencia de enseñanza problematizada para el aprendizaje del modelo de carga eléctrica en Educación Primaria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 22(1), 1801. doi: 10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2025.v22.i1.1801

Introducción

En un editorial de esta revista, Guisasola y Oliva (2020) animaban a publicar trabajos dentro de la línea de investigación basada en el diseño (IBD, o DBR en inglés). Efectivamente, dicha línea, con la que nos sentimos identificados desde la década de los ochenta del siglo pasado (Gil y Martínez-Torregrosa, 1987; Gil et al., 1991; Verdú y Martínez-Torregrosa, 2004; Osuna et al., 2007) favorece la relevancia de la investigación didáctica para la práctica en las aulas, al unificar investigación e innovación (McKenney y Reeves, 2014; Guisasola et al., 2021; Guisasola, 2024a, 2024b).

En los últimos años se está haciendo un esfuerzo por abordar este tipo de investigación para poder mejorar el diseño de las secuencias de enseñanza y aprendizaje (en adelante SEAs), y por eso esta metodología no presume de imponer una teoría educativa específica, sino que da a los investigadores la oportunidad de implementar su investigación con libertad (Easterday et al., 2014). Sin embargo, sí que atiende a una estructura de fases en la investigación que comienza en la fundamentación teórica, que será la guía de la investigación, y el conocimiento de la epistemología científica sobre los contenidos tratados que será el eje alrededor del que se diseñará la SEA (Oliva y Aragón, 2024). El diseño, en su fase inicial se ocupará de la identificación del nivel educativo al que la SEA va dirigida y del análisis de los aspectos epistemológicos, para así concretar los objetivos de aprendizaje. Estos objetivos, junto con el análisis de las ideas previas del alumnado, las dificultades de aprendizaje, así como la definición de las estrategias de enseñanza, conducirán a una propuesta de intervención educativa que se pondrá a prueba, implementándose en el contexto para el cual se ha diseñado (Cobo-Huesa et al., 2021; Guisasola et al., 2021). La SEA diseñada parte de la premisa de que mejorará el aprendizaje de los estudiantes, pero ¿esto es así? El registro y análisis del proceso de implementación, basado en consideraciones teóricas (Ametller et al., 2007) permite ajustes en la propuesta que constituirán los datos del ‘experimento’. Por último, ha de existir una evaluación de la propuesta que conducirá a un rediseño de la SEA y una nueva iteración. Aunque no existe una herramienta específica para evaluar el impacto de la IBD, Guisasola et al. (2021) proponen un análisis retrospectivo de instrumentos de medida de aprendizaje (cuestionarios) y de calidad de la SEA (cuaderno del estudiante, diario del profesor/a, observadores externos) que son útiles para el rediseño. Teniendo en cuenta las herramientas de la fase de diseño de la IBD, en este trabajo presentamos un análisis histórico-epistemológico del que se derivarán las ideas clave y los objetivos de aprendizaje. Esto formará parte de una investigación destinada a fomentar la enseñanza de las ciencias de manera coherente y duradera (Nicolás-Castellano et al., 2023), basada en la metodología de investigación guiada, o enseñanza problematizada, para la etapa de educación primaria.

Por tanto, como el objetivo final de esta investigación será diseñar una secuencia sobre carga eléctrica basada en el modelo de enseñanza-aprendizaje problematizada (SpEA en adelante) para el para el último ciclo de primaria, en este estudio justificaremos primero por qué hemos elegido dicho tema, a qué alumnado va dirigido y qué pretendemos conseguir (meta orientadora u objetivo clave); y a continuación, presentaremos los resultados del estudio histórico-epistemológico destinado a tomar decisiones para la elaboración de la SpEA y conseguir el/los objetivo/s dentro del modelo de enseñanza

problematizada. En particular, la evolución histórica de las ideas clave nos ayudará a tomar decisiones para concretar la estructura problematizada de la secuencia (Guisasola et al., 2021), lo que requerirá:

1. Identificar qué preguntas o problemas están en el origen de lo que queremos que aprendan los estudiantes y qué pasos e ideas permitieron o pueden permitir responder a dichas preguntas (necesario para seleccionar objetivos más concretos);
2. Identificar ideas y dificultades que hubo que superar para avanzar, y prever en qué medida podrían estar presentes en nuestro alumnado según los hallazgos de la investigación didáctica (necesario para prever obstáculos para la consecución de los objetivos); y
3. Seleccionar un plan (el índice del tema) coherente con una lógica problematizada que permita poner en práctica los compromisos epistémicos de la actividad científica (es decir, las actividades, físicas y mentales, que conducen a la producción, justificación, evaluación y mejora del conocimiento según reglas acordadas por la comunidad científica (Izquierdo-Acebes y Taber, 2024) que deseamos que los alumnos/as adquieran.

Además, no se trata solamente de identificar ideas-obstáculo: si queremos evitar una estrategia de enseñanza de cambio conceptual por choque (lo que piensas está mal, y te voy a explicar lo que está bien), debemos identificar qué situaciones, experimentos y/o razonamientos produjeron o pueden producir el cambio de unas ideas por otras mejores científicamente para que dicho avance sea factible y firme (Martínez-Torregrosa et al., 1994). Las decisiones que tomemos antepondrán que la SpEA resulte factible e interesante para los alumnos/as, que lleguen a apropiarse de la o las preguntas estructurantes y que el plan para tratar de responderlas permita la introducción lógica y el desarrollo de los conceptos y/o modelos nucleares de dicho campo. El uso de los tiempos verbales pasado y presente en algún párrafo anterior es, pues, deliberado: inventaremos y elegiremos las actividades que creamos que pueden ser más adecuadas para aprender, provengan del pasado o del presente.

Principios de diseño

Tal y como describe Oliva (2020), en una investigación didáctica es importante la contextualización del objeto de estudio, por eso creemos que es importante dedicar este espacio para identificar y describir el marco didáctico que constituirá la referencia del planteamiento de nuestra propuesta.

Análisis del contexto educativo: ¿Carga eléctrica para alumnos de Educación Primaria? ¿Qué nos gustaría conseguir?

En el bloque sobre “Materia, fuerzas y energía” del currículo para la Educación Primaria (BOE RD 157/2022 del 1 de marzo y DOGV, Decreto 106/2022, del 5 de agosto), aparecen contenidos como: “propiedades observables de los materiales”, “masa, volumen, densidad”, “Energía eléctrica”, “materiales conductores y aislantes” “circuitos eléctricos básicos”. En los textos de Educación Primaria, el tratamiento de las propiedades comunes se suele restringir a la masa (peso) y el volumen, olvidando que la carga eléctrica es otra propiedad común de todas las cosas (materiales) imprescindible para explicar y hacer predicciones sobre el mundo físico y, por tanto, poder intervenir en él. La carga eléctrica permite explicar fuerzas que de otro modo parecerían mágicas, la existencia de materiales con propiedades diferentes, las reacciones químicas con el modelo atómico molecular, la especificidad de las proteínas, etc. En definitiva, es una pieza esencial para la comprensión intelectual del mundo físico, químico y biológico.

Sin embargo, la atención a la carga eléctrica en los textos de primaria, cuando existe, se suele limitar a enunciar que hay fuerzas atractivas y repulsivas debidas a la existencia de cargas positivas y negativas, añadiendo que cargas del mismo signo se repelen y de distinto se atraen. Por propia experiencia, lo que hemos encontrado en las aulas de primaria es una ausencia de enseñanza sobre el modelo de carga eléctrica o ejemplos de transmisión de conocimientos que fomentan un aprendizaje escasamente ligado a las ideas, experiencias y razonamientos que podrían poner en práctica los alumnos/as. Es verdad que no tenemos acceso directo a las propiedades de la materia (es decir, comunes a todos los objetos de cualquier material): son conceptos teóricos, abstractos. Pero eso no quiere decir que no existan. El conocimiento científico de la naturaleza es fruto de un *triálogo* entre objetos reales, objetos teóricos y la comunidad científica. Hemos inferido, y probado, su *existencia* a partir de las fuerzas que se producen entre objetos (que sí son accesibles a nuestros sentidos o instrumentos). Sabemos que la materia tiene masa por la existencia de fuerzas gravitatorias (el peso) y que tiene carga eléctrica por la existencia de fuerzas eléctricas.

Nuestro objetivo clave, pues, será que los estudiantes admitan que existe una propiedad de la materia, a la que llamamos carga eléctrica, que permite explicar las fuerzas que aparecen entre objetos que no son ni el peso, ni como las que hay entre imanes y objetos de hierro. Además, también deseamos que comprendan que, para explicar esas fuerzas en distintas situaciones, es necesario admitir que dicha propiedad tiene dos variedades (a diferencia de la masa), es decir, que existen dos tipos de carga eléctrica (a las que podemos llamar *vítrea* y *resinosa*; *positiva* y *negativa*, o *verde* y *azul*), que se encuentran *compensados* (en cantidad) en los objetos neutros y *descompensados* en los objetos electrizados, y que pueden moverse o desplazarse en los objetos. Por supuesto, necesitaremos conectar con las ideas y experiencias que ya tienen los alumnos/as, lo que requerirá partir de preguntas o situaciones concretas para ir generalizando y abstrayendo, volver para explicar y dar sentido a esas preguntas y situaciones concretas, y realizar predicciones que podamos someter a pruebas.

No obstante, la mayor parte de la investigación sobre el aprendizaje del modelo de carga eléctrica se ha realizado con alumnos mayores que a los que dirigimos nuestra investigación (Furió y Guisasola 1998; Mi et al., 2023), con profesores en formación y en activo (Criado y García-Carmona, 2010; Melo et al., 2016), o enfocándose principalmente en la corriente eléctrica (Leone, 2014), por lo que tiene gran interés investigar en qué medida podemos conseguir nuestro objetivo con alumnos del último ciclo de educación primaria y cómo hacer que los maestros también puedan conseguirlo.

Perspectiva social-constructivista: ideas del alumnado y modelo de enseñanza problematizada

Respecto a la cuestión de si los alumnos de último ciclo de primaria (de 10 a 12 años) pueden aprender el modelo de carga eléctrica, investigadores sobre el tema responden afirmativamente (Criado y Cañal, 2002). Más aún, Schalk et al. (2019) han demostrado que la enseñanza por indagación de temas de física a alumnos de 9 años mejora aspectos epistémicos generales, como el control de variables, respecto a grupos de control que han sido instruidos de otras formas, y que obtienen mejores resultados en la etapa secundaria (Edelsbrunner et al., 2024). Nuestra posición, pues, es que no hay que esperar a que los alumnos alcancen un pensamiento abstracto, supuestamente general, que les permita elaborar explicaciones de manera razonada: hay que favorecer que ocurra, proponiendo situaciones de aprendizaje problematizadas con contenido específico que fomenten, adecuadamente, el pensamiento hipotético-deductivo. Este modelo de enseñanza se organiza a partir de un problema estructurante, que es abordado por profesor/a y alumnos/as (organizados en pequeños grupos), siguiendo un plan (índice del tema) que

sería lógico seguir si fuéramos un grupo de investigadores noveles que se enfrentan a avanzar en el problema planteado. El plan se concreta en una secuencia de actividades que son planteadas a los pequeños grupos, que reflexionan, debaten y expresan sus ideas en las puestas en común. En ese ambiente tentativo, las ideas expresadas por los grupos y el profesor/a son sometidas a análisis, a pruebas, lo que genera un avance de todos/as de una manera razonada. Un adecuado diseño, requiere, pues, conocer los problemas que están en el origen de los conocimientos que deseamos que adquieran los alumnos/as; las ideas que permitieron avanzar en su solución y, también, las dificultades que fue necesario superar para que dicho avance fuera posible (Gil y Martínez-Torregrosa, 1987; Gil et al., 1991; Verdú y Martínez-Torregrosa, 2004). Por supuesto, esta metodología ya ha sido ampliamente probada, y los resultados muestran que cuando los estudiantes abordan problemas importantes (estructurantes), no sólo obtienen mejores resultados de aprendizaje respecto a grupos de control, sino que por supuesto, mejora significativamente su capacidad para desarrollar explicaciones fundamentadas. Además, este enfoque no sólo favorece la comprensión de conceptos, sino que también promueve otras habilidades cognitivas, como el pensamiento crítico y la capacidad de transferencia a nuevos contextos (Martínez-Torregrosa et al., 1994, Osuna et al., 2007; Nicolás-Castellano et al., 2021, Nicolás-Castellano et al., 2023).

Así pues, si se ha tratado el modelo corpuscular de los materiales, podríamos, además, integrar la carga eléctrica como una de las propiedades, junto con la masa, de las partículas, al preguntar por el origen de las fuerzas que mantienen más unidas las partículas en líquidos y sólidos que en gases, y por qué *aparecen* dichas fuerzas en los cambios de fase (de gas a líquido, y de líquido a sólido). No obstante, en la etapa primaria, consideramos conveniente que cada SpEA tenga sentido en sí misma y, que al mismo tiempo suponga un paso para avanzar en un hilo argumental que, a lo largo de toda la etapa, favorezca un aprendizaje coherente, secuenciado (véase el Anexo I) y, cada vez, con mayor poder explicativo sobre el mundo físico (Nicolás-Castellano et al., 2021; Reiser et al., 2021; Penuel et al., 2022). El desarrollo que pretendemos aquí queda abierto, por tanto, para que la carga eléctrica pueda integrarse, posteriormente y con relativa facilidad, con el modelo cinético corpuscular de la materia (Martínez-Torregrosa et al., 2020).

Aunque la meta parece clara, seleccionar los objetivos más concretos, y los obstáculos asociados para llegar hasta ahí, no es una tarea sencilla. El estudio epistemológico nos ayudará a identificar ideas que permitieron avanzar hasta admitir que la carga eléctrica era una propiedad de todos los materiales que (a diferencia de la masa) podía ser de dos tipos (positiva o negativa; vítrea o resinosa). A continuación, haremos un análisis que corresponde con la fase *Understand* del proceso de IBD descrito por Guisasola et al. (2017) y será el primer paso para la planificación de la enseñanza problematizada sobre el tema (Oliva y Aragón, 2024).

Análisis histórico, ontológico y epistemológico en la construcción del concepto de carga eléctrica

A continuación, presentamos los logros relevantes o/e ideas explicativas sobre los fenómenos eléctricos de los investigadores, seleccionados por su relevancia en la construcción del modelo de carga eléctrica que queremos enseñar. El análisis histórico mucho más detallado, se encuentra en Martínez-Torregrosa et al. (2024), donde se describe y comenta el extenso recorrido de las principales ideas y experimentos que han contribuido a la construcción del modelo de carga.

Cuando se habla de la historia de la electricidad debemos remontarnos en el mundo occidental a Tales de Mileto (600 a.C.), fue él quien descubrió, seguramente por

casualidad, que el ámbar cuando se frotaba con cualquier material adquiría la propiedad de atraer otros cuerpos livianos (efecto triboeléctrico). No hubo avances significativos sobre electricidad hasta los trabajos de Sir William Gilbert. Por eso nuestro análisis sobre el desarrollo del concepto de carga eléctrica comienza desde las ideas de Gilbert expresadas en *De Magnete* (1600) hasta los trabajos de Dufay presentados en 1733. Hemos utilizado trabajos de físicos e historiadores de la ciencia que han analizado las fuentes primarias, especialmente de Harré (1979), Meyer (1972), Roller y Roller (1954), Torres Assis (2010) y Whittaker (1910). Además, nuestra intención también es resaltar la pasión de los investigadores para transmitir que la ciencia es fruto de una empresa humana, aunque en los textos escolares, desafortunadamente se ignoren los sujetos (hombres, pero mucho más a mujeres) de la ciencia (Martínez-Torregrosa et al., 2014).

La motivación del estudio sobre la electrización de Gilbert era mostrar que la atracción eléctrica y magnética eran diferentes, por eso en su trabajo solo dedica un capítulo a los fenómenos eléctricos, con la intención de diferenciarlos de los magnéticos, mientras que Dufay consiguió avanzar y dejar bien establecido la existencia de dos tipos de carga. Gilbert amplió los materiales que adquirirían la capacidad de atraer a otros objetos, además del ámbar. Su objetivo era generalizar los materiales que podían ser atraídos (Harré, 1979). Tras frotar diferentes materiales (como el diamante, zafiro, mica, ópalo, berilio, entre otros), resaltó que todos mostraban el mismo comportamiento: atraían trozos pequeños de diversos materiales. Este fue un primer avance importante, ya que permitió reconocer que distintos materiales se comportaban de manera similar en determinadas circunstancias. Sin embargo, Gilbert asociaba erróneamente la atracción con el acercamiento físico, lo que le llevó a pensar que solo se atraían objetos pequeños. En su concepción, si no había acercamiento, no existía atracción.

De esta explicación, se derivan dos posibles obstáculos conceptuales:

- El objeto atraído es considerado pasivo. No se trata de una atracción mutua, sino de una *fuerza violenta* ejercida por el efluvio eléctrico emanado del objeto electrizado, que envuelve y empuja al cuerpo atraído. Para los estudiantes esto puede llevar a la creencia errónea de que la atracción no es mutua, es decir, que el tercer principio de la Dinámica no se cumple cuando un cuerpo electrizado atrae a uno neutro.
- La carga no existe previamente al frotamiento, sino que se genera al frotar ciertos objetos. Un objeto cargado atrae a otros sin carga, por lo que la atracción no se produce entre cargas opuestas, sino entre un cuerpo cargado y uno sin carga. Esto implica que el objeto neutro atraído no experimenta ningún cambio en su naturaleza que justifique la atracción.

Al continuar con sus experimentos, Gilbert se dio cuenta de que había sustancias que no eran capaces de atraer pequeños cuerpos sino solo ladearlos. Para poder detectar esas atracciones débiles sobre cuerpos grandes inventó un nuevo instrumento, más sensible, el versorio, el primer electroscopio conocido y el primer instrumento para medir cargas eléctricas, y que efectivamente contribuyó a la universalización de los objetos que son atraídos. Poder colocar alternativamente el objeto electrizado o el neutro en la plataforma móvil facilita la idea de atracción mutua, pero Gilbert no lo utilizó para tal fin porque su modelo explicativo se lo impedía. Ni siquiera describió los *rebotes* o *repulsiones* que, sin duda, ocurrían durante sus experimentos. Solo pensaba en atracciones y que, una vez se pegaba el cuerpo atraído al electrizado, «el efluvio se gastaba o desvanecía y el cuerpo atraído se despega por su propio peso» (Roller y Roller, 1954, p. 11).

Se planteó que la atracción podía ser debida al calentamiento del objeto electrizable al frotarlo. Para contrastarlo calentó algunos objetos de esas sustancias electrizables y vio que

no atraían al versorio, «a menos que el calor se produzca por fricción o frotamiento. La causa es el frotamiento y no el calor». Descartó, por tanto, la idea de que el calor era el responsable de la atracción. Sin embargo, tendremos en cuenta que muchas personas, erróneamente, pueden pensar que la atracción se debe al calentamiento del objeto al frotarlo.

También identificó sustancias que, *aunque se las frote, no atraen* y las calificó como no-eléctricas. Hizo, pues, una clasificación de los materiales en dos grupos: eléctricos y no-eléctricos. Estaba muy lejos aún la idea de conducción o transmisión de la *virtud eléctrica*.

Durante la realización de sus experiencias eléctricas, Gilbert observó que las condiciones ambientales influían en los resultados. Señaló que «podemos observar mejor esta atracción cuando, en pleno invierno, la atmósfera está muy fría, clara y transparente». Este es un factor importante que habrá que tener en cuenta al realizar experimentos electrostáticos en el aula.

Según el modelo causal de Gilbert, la propiedad eléctrica se activa por frotamiento de los materiales eléctricos y no se transmite. Según esto, un cuerpo atraído por un cuerpo electrizado no se hace *eléctrico*, la atracción eléctrica es por *impulsión* sobre el objeto atraído, que no experimenta ninguna modificación en su *fuerza original*. La posibilidad de la conducción eléctrica, es decir, la transferencia de la excitación eléctrica de un cuerpo a otro quedaba aparentemente descartada por su convicción de que un objeto en contacto real con otro electrizado tiende «a suprimir el efluvio desde su mismo comienzo». Aquí emerge una nueva idea errónea: la carga no se conserva, se crea por frotamiento y se va gastando, desapareciendo, con el tiempo; los cuerpos solo son atraídos, y se *despegan* del cuerpo electrizado, porque la carga se ha gastado y ya no puede sostener su peso.

Podríamos resumir los avances e ideas clave de Gilbert como:

- Universalización de los objetos que son atraídos.
- Invención del versorio para detectar fuerzas pequeñas.
- La carga no existe antes de frotar, se crea al frotar determinados objetos y se va gastando (la carga no se conserva).
- Clasificación de los materiales en eléctricos (que se cargan al frotarlos) y no eléctricos (no se cargan al frotarlos). Esta fue una primera aproximación a lo que hoy conocemos como aislantes y conductores.
- La atracción es debida al frotamiento. Identifica atracción con acercamiento.
- El objeto atraído es pasivo, no existe la atracción mutua, ni hay cambio en su naturaleza que explique la atracción.
- La propiedad eléctrica no se transmite.

En 1629, Niccolo Cabeo se cuestionó la hipótesis del origen de los eléctricos: «muchas cosas que son duras y provienen de humores solidificados no se electrizan, y muchas otras cosas que atraen no parecen ser solidificaciones de un humor». Según Cabeo, los objetos que son atraídos y hacen contacto con el objeto electrizado, a menudo no caen por su peso, sino que rebotan a una distancia de varias pulgadas. Esto sería la primera identificación de la repulsión eléctrica, aunque para Cabeo, el efecto observado era debido a un mero rebote mecánico de un objeto ligero que choca con otro pesado. Cabeo afirmó: si no hubiera aire alrededor de un objeto electrizable no atraería objetos, aunque se frotara. Dicha hipótesis se podía contrastar, pero la bomba de vacío, necesaria producir la ausencia de aire, aún no estaba lo suficientemente desarrollada y los problemas de tipo técnico hicieron que los resultados no fueran concluyentes.

Entre 1657 y 1667, en la Academia Florentina, se realizaron importantes experimentos sobre la atracción eléctrica. En uno de ellos, colgaron un trozo de ámbar electrizado de una cuerda y un objeto no electrizado en otra, observando cómo ambos péndulos se acercaban mutuamente. La explicación causal, que implicó un avance, fue que la atracción eléctrica es mutua (entre objeto electrizado y no electrizado). Este descubrimiento permitió la creación de una escala semicuantitativa de materiales electrizables, clasificándolos según su capacidad de atraer.

Sin embargo, frotar manualmente los objetos electrizables, manteniéndolos fijos, resultaba ineficiente y agotador. En 1660, Otto von Guericke inventó el primer generador triboeléctrico, lo que facilitó la realización de experimentos que antes resultaban imposibles. Además, Otto von Guericke es conocido por su invención de la primera bomba de vacío en 1650. Esta herramienta fue fundamental para que, en 1675, Robert Boyle pudiera probar la hipótesis de Cabeo sobre el papel del aire en la atracción eléctrica. Boyle descubrió que la atracción ocurría tanto en el aire como en el vacío. Por tanto, el efluvio debía ser algo material, quizás partículas o átomos.

En el mismo año que Boyle contrastó la hipótesis de Cabeo, Jean Picard descubrió la luz barométrica (destellos luminosos en el volumen vacío de un barómetro de mercurio, cuando se agitaba el mercurio contra el vidrio). Entre 1705 y 1719, este descubrimiento permitió a Hauksbee realizar una serie de avances experimentando con dicha luz:

- Identificó la humedad como *el gran enemigo de la electrización*. Las moléculas polares del agua son atraídas por los cuerpos electrizados, disminuyendo enormemente su poder de atracción. Este avance fue importante para superar la idea errónea de que la pérdida de electrización de un cuerpo, al dejarlo sobre una base aislante, ocurría porque la carga se desgastaba o desaparecía con el tiempo. En realidad, esa pérdida de naturaleza eléctrica pasa a otros cuerpos (moléculas) o es neutralizada porque atrae a otros (moléculas de agua, si es en un ambiente húmedo).
- Describió la producción de destellos luminosos en un tubo de vidrio en el que se había hecho el vacío cuando lo acercaba, sin tocar, a un objeto electrizado. La interpretación de este hecho podría haberle llevado al descubrimiento de la electrización por influencia. Sin embargo, Hauksbee mantuvo la creencia de que los destellos eran producto del efluvio del cuerpo electrizado que frotaba el tubo vacío, manteniendo así la creencia de que la electrización siempre se tenía que producir por frotamiento. Incluso intentó dar explicaciones parciales asignando propiedades de sólido al efluvio (para que pudiera frotar). Por analogía con la atracción hacia el centro en gravitación y magnetismo, animó a buscar relaciones entre la electricidad, magnetismo y gravitación, reconociendo que estaban fuera de su alcance (Roller y Roller, 1954, p. 26-27).
- «Tras el contacto con un cuerpo electrizado aparece la repulsión, pero si toca algún objeto no electrizado (como la pared), no solo deja de ser repelido, sino que es, de nuevo, atraído por el tubo electrizado». No está claro cómo reconcilió la idea de un efluvio que atrae y que también repele al mismo cuerpo, lo que sí está claro es que para encajar todos los fenómenos que Hauksbee había observado en un solo esquema conceptual, era necesaria una transformación radical de la hipótesis/ modelo del efluvio material (Roller y Roller, 1954, p. 28).

Los problemas, no resueltos, planteados por Hauksbee condujeron la naciente ciencia de la electricidad a una etapa revolucionaria, cuya consecuencia más inmediata fue el descubrimiento de la conducción eléctrica por Stephen Gray.

En 1720, Gray amplió los materiales electrizables por frotamiento: la seda, el lino, la lana,

el papel, la madera, el cabello humano y las pieles, entre otros. Sin embargo, el método que utilizaba (calentar sujetando con la mano y posterior frotamiento vigoroso también a mano) fue un obstáculo al intentar electrizar metales, ya que al sostenerlos impedía su electrificación y continuó clasificándolos como no eléctricos.

No fue hasta 1729 cuando, al probar si un tubo de vidrio se electrificaba de igual manera con los extremos abiertos o cerrados con tapones de corcho (para evitar la entrada de polvo), Gray hizo un descubrimiento significativo. Observó que los tapones, sin haber sido frotados directamente, adquirirían la capacidad de atraer y repeler plumas simplemente por estar en contacto con el tubo electrificado (Roller y Roller, 1954, p. 30-31). Tras este hallazgo, insertó una bola de marfil en el extremo de una varilla de abeto que colocó en el tapón de corcho y observó que la bola, igual que el corcho, también se electrificaba. A continuación, experimentó con bolas y varillas de diferentes materiales obteniendo siempre los mismos resultados. Cuando las varillas comenzaron a doblarse y a vibrar debido al frotamiento del tubo de vidrio, Gray las reemplazó por una cuerda de embalar trenzada. Ató un extremo al tubo de vidrio y dejó caer una bola desde un balcón sujeta al otro extremo. Fue cambiando el material de la bola y la longitud de las cuerdas (llegó hasta un metro), y obtuvo los mismos resultados. Este descubrimiento supuso un avance fundamental, ya que reveló la *conducción eléctrica*: la propiedad eléctrica podía transmitirse no solo por contacto directo, sino también a través de un cuerpo intermedio.

Gray repitió los experimentos colgando de la cuerda objetos metálicos que no se electrificaban cuando los frotaba sujetándolos con la mano. En todos los casos, observó que adquirirían lo que él denominaba *virtud eléctrica*, es decir, podían atraer y repeler a otros objetos. Tras este importante avance, decidió explorar la posibilidad de transmitir la propiedad eléctrica a mayores distancias. Para ello, diseñó un experimento en el que unió cañas de bambú y varillas de abeto a un tubo previamente electrificado, colocando esferas en el extremo opuesto. De este modo, el 31 de mayo de 1729, consiguió electrizar una esfera a una distancia de 15,85 metros.

Para seguir aumentando la distancia, Gray decidió intentar una disposición horizontal para la cuerda o el cable de transmisión, creando un recorrido en zigzag entre las vigas de una estancia, utilizando lazos de cuerda para sujetar el cable. Al final del trayecto, colocó una esfera de marfil colgando verticalmente, apenas unos centímetros por encima de una bandeja con virutas de latón y plumas. Sin embargo, al frotar el tubo de vidrio, no se detectó ninguna atracción en las virutas o plumas. Gray explicó el fracaso del experimento aludiendo a que la virtud eléctrica se desvió hacia las vigas a través de los lazos de cuerda que sostenían la transmisión, reduciendo significativamente la carga que llegaba a la esfera (Roller y Roller, 1954, p. 33).

Mientras mostraba sus experimentos al Dr. Wheler, este le sugirió reemplazar los lazos de cuerda que empleaba por trozos de hilo de seda. Gray pensó que, al ser más fino el hilo de seda, se perdería menos virtud eléctrica en el proceso de transmisión, pues creía que el grosor del hilo era lo que influía, y no el tipo de material (Roller y Roller, 1954, p. 34). Al hacer que la cuerda de transmisión descansara sobre hilos de seda que atravesaban la estancia de viga a viga, sostenidos por clavos de hierro, logró una transmisión exitosa hasta una distancia de 89,31 metros. A través de este experimento, descubrieron que el éxito en la transmisión dependía del tipo de material que sostenía la cuerda (seda) y no de su grosor. Así, concluyeron que los materiales utilizados para sujetar la línea de transmisión influyen en el proceso porque también pueden transmitir la propiedad eléctrica. De este modo, los materiales se dividieron en dos grandes categorías: aquellos que transmiten fácilmente la propiedad eléctrica y aquellos que no (ahora les llamamos *conductores* y *no conductores* (o aislantes)).

Gray fue pionero en el uso de cables para la transmisión eléctrica: utilizando pares de postes con hilos de seda para sostener la cuerda de transmisión, consiguió electrizar una esfera de marfil a una distancia de 198 metros, construyendo así la primera línea de transmisión aérea sobre postes. Además, logró realizar la transmisión simultánea a través de tres líneas desde un solo tubo electrizado.

Es importante subrayar que el descubrimiento de la conducción eléctrica se realizó con líneas de transmisión hechas de materiales como cañas, varillas de madera y cuerda, que hoy en día sabemos que son malos conductores. El éxito de los experimentos podría haberse debido a las condiciones climáticas húmedas, lo que provocaba que las líneas de transmisión estuvieran húmedas, tal como demostró posteriormente Dufay. Además, tanto la madera como la cuerda, cuando están secas, conducen algo de electricidad. En cuanto a los aislantes eléctricos utilizados por Gray, como el hilo de seda, no solo son muy malos conductores en seco, sino que tampoco absorben fácilmente la humedad del ambiente (Roller y Roller, 1954, p. 37). Este hecho ayuda a explicar una idea errónea que se ha popularizado: la creencia de que la capacidad de un material para aislar o conducir electricidad es dicotómica y absoluta, cuando en realidad es una propiedad con un amplio rango de variación.

Ese mismo año, en 1729, Gray hizo otro descubrimiento crucial: la *electrización por influencia*, es decir, sin contacto directo. En este experimento, acercó un tubo electrizado a una cuerda de la que colgaba una bola de plomo, y observó cómo la bola atraía y repelía virutas metálicas repetidas veces, sin haberla tocado. A diferencia de Hauksbee, Gray no intentó explicar este fenómeno mediante la teoría del efluvio, ya que esta noción aparentemente no desempeñaba un papel relevante en su interpretación (Roller y Roller, 1954, p. 38).

Un posible obstáculo en la comprensión de la electrización por influencia sería la creencia de que este fenómeno se limita únicamente a electroscopios u objetos metálicos. Sin embargo, un objeto neutro es atraído por otro electrizado debido a la electrización por influencia o inducción. Este proceso polariza el objeto, de modo que las cargas de signo opuesto al cuerpo electrizado quedan más cercanas que las de igual signo. Este efecto ocurre incluso si el objeto no está completamente neutro. En consecuencia, un objeto débilmente cargado podría ser atraído por otro cargado con el mismo tipo de carga, en lugar de ser repelido.

Durante 1732 continuaron sus avances. Gray logró electrizar varias sustancias, incluyendo el agua, al colocarlas en las proximidades de un tubo electrizado, sin necesidad de tocarlas (ya que atraían virutas y plumas). Además, demostró que podía electrizar un trozo de línea de transmisión por influencia y que este, a su vez, podía inducir electrización en otro trozo de línea separada por una distancia de hasta un pie (Roller y Roller, 1954, p. 42). En otro experimento, observó que una varilla de hierro cuyos extremos terminaban en punta, suspendida de hilos de seda, emitía conos de luz por ambos extremos en la oscuridad al aproximar un tubo electrizado (comparando los ruidos y las chispas con los truenos y relámpagos) (Meyer, 1972, p. 17). A continuación, observó que cuando se acercaba una barra de metal puntiaguda a un objeto electrizado, este perdía su electricidad de manera lenta y silenciosa, descargándose de manera casi imperceptible. En cambio, si la barra era roma, la descarga se producía con un fuerte chasquido. Esta observación lo posicionó como un precursor del pararrayos, mostrando una relación entre ciencia, tecnología y sociedad.

El trabajo de Gray supuso un gran avance en la ciencia de la electricidad donde podríamos destacar 3 hitos:

- Descubrimiento de la conducción eléctrica.
- Identificación de los materiales como transmisores o no de la propiedad eléctrica (lo que hoy en día conocemos como conductores y no conductores o aislantes).
- Descubrimiento de la electrización por influencia.

En 1736, Jean Desaguliers continuó las investigaciones de Gray y redefinió los materiales no eléctricos como conductores (Whittaker, 1951, p. 42).

Por su parte, Dufay en 1733, recopiló y resumió los trabajos de Gray, presentándolos ante la Royal Society, añadiendo sus propias ideas y experimentos. A continuación, describiremos brevemente los avances que resultaron de su trabajo:

- Amplió la lista de *eléctricos*. Y, aunque seguía excluyendo a los metales y al cuerpo humano, su clasificación suponía la culminación del catálogo de cuerpos eléctricos iniciado por Gilbert.
- Enunció que todos los cuerpos, sin excepción, podían ser electrizados por influencia, tanto sólidos como líquidos, incluyendo el hielo y el carbón. Notó que los materiales clasificados como menos eléctricos por frotamiento adquirirían un alto grado de electricidad cuando se les acercaba un tubo de vidrio electrizado.
- Demostró que la afinidad por el agua influía en la atracción eléctrica. Anteriormente, Gray había afirmado que el color de las cintas de seda que usaba influía en la atracción eléctrica, pero Dufay concluyó que era debido a la diferente absorción de los tintes empleados para colorear las cintas.
- La transmisión de la electrización a través de una cuerda de embalar mejoraba si esta se humedecía. Afirmó también que el cuerpo humano conduce la electricidad y para ello, repitió los experimentos de Gray con diferentes seres vivos y con él mismo.
- Enunció un principio fundamental: «Un cuerpo electrizado atrae a cualquier cuerpo no electrizado y lo repele tan pronto como este adquiere electricidad por contacto». Aunque Dufay continuaba explicando este fenómeno con la noción de efluvios, su teoría incluía la idea de que el efluvio era autorrepulsivo, lo que explicaba por qué un objeto electrizado repelía a otro después del contacto: la repulsión era debida a que ambos cuerpos estaban cargados (modelo monocarga).
- Él mismo advirtió su error cuando comprobó que un objeto repelido por otro electrizado, era atraído por otro cargado, pero de distinto material. Formuló, entonces, la hipótesis de la existencia de dos tipos de carga.

Dufay desarrolló un nuevo principio al descubrir que había dos tipos de electricidad: la *vítrea* y la *resinosa*. La electricidad vítrea se asociaba al vidrio frotado y a materiales como el cristal de roca, piedras preciosas, pelo de animales y lana, mientras que la electricidad resinosa se atribuía al ámbar, copal, seda, goma laca, y otros cuerpos similares. Según su hipótesis, bastaba con electrizar un hilo de seda (electricidad resinosa) y observar si un cuerpo electrizado lo atraía o repelía para determinar su tipo de electricidad. Si lo atraía, era de electricidad vítrea; si lo repelía, era de electricidad resinosa.

No obstante, el mismo Dufay reconoció que una posible idea errónea era asociar el tipo de electricidad al material del objeto. Experimentos posteriores demostraron que el tipo de electrificación que adquiría un objeto dependía tanto del material frotado como del material frotante, y variaba según las condiciones de las superficies involucradas. Por ejemplo, el vidrio frotado con seda, lana o piel de gato, generalmente mostraba electricidad vítrea, pero al frotarlo con piel de conejo mostraba electricidad resinosa.

Finalmente, el modelo de las dos variedades de carga debía explicar por qué los objetos electrizados, ya sea con carga positiva o negativa, atraían a los objetos neutros. Dufay concluyó que los objetos neutros sufrían cambios internos cuando se les acercaba un cuerpo electrizado, y estos cambios eran diferentes si el cuerpo tenía carga positiva o negativa. La atracción mutua se explicaba por la menor distancia media entre las partículas cargadas de signo contrario, comparada con la distancia media entre partículas del mismo tipo.

A continuación, vamos a inferir posibles implicaciones de este estudio para el diseño de una SpEA en el contexto que habíamos definido. El objetivo es conseguir que los estudiantes consideren la carga eléctrica como una propiedad general de todos los materiales, con dos variedades, que explica las fuerzas eléctricas que aparecen en la interacción entre objetos.

Ideas para la planificación de la enseñanza problematizada sobre carga eléctrica: claves epistemológicas y objetivos de aprendizaje

En este apartado, presentamos los objetivos concretos/parciales de aprendizaje y los obstáculos asociados inferidos del estudio anterior, así como los avances históricos que han contribuido a su consecución. El resumen de la relación explícita entre las ideas clave identificadas en el estudio y los objetivos de aprendizaje, puede verse en el Anexo II.

Así pues, en primer lugar, a lo largo del recorrido histórico se constata un objetivo siempre presente: el de ampliar el tipo de materiales que son atraídos por un objeto electrizado, y el tipo de materiales que pueden electrizarse. Pasos necesarios para aceptar la universalización de la naturaleza eléctrica de todos los materiales, fueron:

- Todos los materiales son atraídos por un objeto electrizado. La consecución de este avance fue facilitada por:
 - Sistematización empírica.
 - Instrumentos adecuados (versorio, péndulo eléctrico, ...), que permitieron detectar pequeñas fuerzas y mostrar que la atracción era mutua.
 - Toma de conciencia de la influencia de las condiciones meteorológicas (especialmente, la humedad) en los fenómenos eléctricos.
- Posibles obstáculos:
 - Identificación de atracción con acercamiento, lo que conduce a la creencia de que sólo son atraídos objetos *pequeños*.
 - Ignorar que sobre un objeto actúan otras fuerzas además de la de atracción eléctrica (*si fuera atraído, se movería*).
- Todos los materiales se pueden electrizar (pueden adquirir la capacidad de atraer a objetos neutros). La consecución de este avance fue facilitada por:
 - Mejora en los métodos de electrización por frotamiento (por ejemplo: calentar antes de frotar (reduciendo la humedad), que fue ampliando el conjunto de materiales *eléctricos* (electrizables por frotamiento) y reduciendo el de los *no eléctricos* a metales y *cuerpos blandos* (líquidos, gases; posiblemente el cuerpo humano).
 - Descubrimiento de que la *propiedad eléctrica* se podía transmitir a un objeto neutro por contacto con otro ya electrizado por frotamiento. Incluso que se podía transmitir a objetos lejanos del electrizado a través de objetos inter-

puestos (conducción eléctrica). Especialmente, los materiales considerados *no eléctricos*, como los metales, se electrizaran fácilmente por contacto, y eran buenos o muy buenos conductores de la electricidad.

- Todos los materiales se pueden electrizar, pero se pueden clasificar como conductores o aislantes, según transmitan más o menos fácilmente la electrificación. Los metales son buenos o muy buenos conductores (cobre, plata, oro). El vidrio y la seda son muy buenos aislantes (además, absorben muy poco la humedad del aire). La conductividad es una propiedad que varía enormemente. Algunos malos conductores (como la madera seca, cuerda de embalar, ...) mejoran su conductividad al absorber la humedad del aire o al mojarse.

En segundo lugar, este avance hacia la universalización de la electrificación fue acompañado de posibles explicaciones sobre las causas de ese comportamiento, hasta llegar a la hipótesis de que había una propiedad (la carga eléctrica), común a todos los objetos, que tenía dos variedades, cuya cantidad está igualada en los objetos no electrizados. Un objeto manifiesta dicha propiedad (atrayendo a objetos no electrizados) cuando (por algún método) adquiere mayor cantidad de una variedad de carga que de la otra (se dice, entonces, que está cargado) o cuando, sin estar cargado, debido a la cercanía a un objeto cargado, la concentración de ambas variedades es diferente en distintas partes del objeto (se dice, entonces, que está *electrizado por influencia o polarizado*). La capacidad de atraer de un objeto polarizado desaparece en cuanto se aleja del objeto cargado. Además, objetos cargados con variedades diferentes se atraen y cargados con la misma variedad se repelen.

Los pasos necesarios para llegar a aceptar que la carga eléctrica es una propiedad de la materia (de cualquier objeto o material) con dos variedades, fueron:

- La superación de un modelo monocarga (solo un tipo de carga) del objeto electrificado que atraía a objetos neutros sin que se produjera cambio alguno en el objeto atraído (pasivos). La consecución de este avance fue facilitada por:
 - La atracción era mutua (utilizando versorios o dos péndulos).
 - El descubrimiento de fuerzas repulsivas entre el objeto electrificado por contacto y el que le transmite la propiedad eléctrica (el modelo monocarga tenía que explicar por qué unas veces atraía y otras repelía; Dufay tuvo que introducir la idea de que la carga era autorrepulsiva: un cuerpo cargado siempre atraía a uno descargado, pero dos cuerpos cargados *siempre* se repelían).
 - El estudio de la interacción entre cuerpos cargados: entre objetos cargados puede haber fuerzas repulsivas o atractivas (esto no podía ser explicado por el modelo monocarga). En particular, el descubrimiento de que todos los cuerpos cargados (por cualquier método) que eran repelidos por otro objeto cargado, se repelían entre sí; y que todos los cuerpos cargados (por cualquier método) que eran atraídos por otro objeto cargado, se repelían, también, entre sí. Cuando un objeto cargado atraía a otro también cargado, atraía a todos los objetos cargados que eran repelidos por él. *Tenían que existir dos variedades de la propiedad eléctrica. Nunca ha hecho falta una tercera variedad.*
 - La explicación de por qué ambas variedades atraían a objetos neutros. Esto implica admitir que los objetos neutros no eran *pasivos*, sino que tenían ambas variedades de carga que se desplazaban de distinta forma dependiendo del tipo de carga del objeto electrificado que se le acercaba: ¡en los objetos

neutros estaban siempre presentes ambas variedades de cargas en la misma cantidad! Electrizar o *cargar* un cuerpo equivale a dejarlo con exceso de una de las dos variedades de carga.

Además, el estudio histórico-epistemológico aporta conocimiento práctico (cómo electrizar mejor objetos por frotamiento, la necesidad de disminuir al máximo la humedad en el aula, cómo aislar, ...) que facilitará que los experimentos de electrización no sean tan imprevisibles o caóticos como podrían ser si no se tiene este conocimiento.

Por último, en el estudio presentado también se han indicado posibles ideas erróneas que pueden tener nuestros alumnos/as que incluyen las encontradas en la investigación didáctica (Furió y Guisasola, 1998; Criado y Cañal, 2002; Criado y García Carmona, 2010; Mi et al., 2023) para alumnado principiante. También, pueden encontrarse argumentos y contraargumentos para hacer reflexionar a los alumnos/as sobre sus ideas en las puestas en común de las actividades de la SpEA (Martínez-Torregrosa et al., 2024).

Estructura de la secuencia de enseñanza problematizada para el aprendizaje del modelo de carga eléctrica en Educación Primaria

Todo el conocimiento adquirido hasta aquí facilita la planificación de una SpEA sobre carga eléctrica para los últimos años de la educación primaria. En la fase inicial, de toma de conciencia, planteamiento y apropiación del problema, empezaremos electrizando (cada equipo de alumnos dispondrá de materiales para hacerlo), por frotamiento con lana, un tubo, varilla o lámina de plástico y mostrando cómo atrae pequeños trozos de papel. Si dejamos caer dichos trozos sobre la lámina electrizada también se verá que algunos trozos rebotan muy llamativamente. Tras unos minutos, en los que los alumnos/as pueden evocar experiencias similares, pediremos que expresen posibles preguntas e ideas (Penuel et al., 2022) que sería interesante tratar, conocer, investigar, sobre el fenómeno. Saldrán preguntas de tipo práctico («¿es por el calor?; ¿cuánto dura? ¿sólo atrae papelitos?») y teórico («¿por qué ocurre esto?; ¿por qué saltan algunos trocitos?») que apuntaremos en la pizarra y cuadernos personales de los alumnos/as. Expresaremos la necesidad de focalizar nuestra atención en alguna pregunta/ problema, profundizar en ella, e ir abordando el resto según dispongamos de más conocimientos sobre la electrización. El problema que consideramos adecuado para la formación del alumnado y que puede estructurar la SpEA generando un ambiente tentativo que permita introducir las ideas fundamentales siguiendo una lógica de investigación, es *¿Atraer papelitos es una propiedad de todos los materiales?* Estrictamente, deberíamos quitar *papelitos* del título interrogativo anterior, pero para la edad a la que nos vamos a dirigir, preferimos dejarlo por ser más concreto e ir pasando de lo concreto a lo abstracto una vez metidos en el desarrollo del tema.

En la enseñanza problematizada, el *índice* del tema debe ser un posible plan que sería lógico seguir dentro de un ambiente de investigación. Un plan que, esperamos, será fácilmente apropiado (si no propuesto, en parte) por los alumnos, puede ser:

1. ¿Sólo papelitos? ¿Qué materiales son atraídos por el plástico electrizado?
2. ¿Qué otros materiales pueden electrizarse (es decir, atraer objetos)?
3. Si hay materiales que no hayamos podido electrizar por frotamiento, ¿habrá otros métodos para electrizarlos?

Una vez que hayamos profundizado en nuestro conocimiento empírico, podremos tratar de responder preguntas más teóricas:

4. ¿Por qué un objeto electrizado atrae a objetos no electrizados de cualquier material?
Y ¿por qué, como hemos visto, repele a objetos a los que ha tocado?

5. Según lo anterior, ¿cómo deberían interactuar dos objetos electrizados? ¿Ocurre así? (Estudio de las fuerzas entre objetos cargados).
6. Elaboración de un único modelo de carga eléctrica que explique:
 - Las fuerzas repulsivas y atractivas que aparecen entre objetos cargados.
 - La fuerza atractiva entre cualquier objeto cargado y otro no cargado.
7. Problemas abiertos.

Conclusiones

El análisis de las ideas (y acciones) que condujeron, entre los años 1600 a 1733, a la elaboración de un modelo de carga eléctrica, como una propiedad de la materia con dos variedades, con suficiente poder explicativo de los fenómenos electrostáticos más sencillos, es una base sólida para: 1) prever ideas que permiten avanzar y obstáculos que habrá que superar, que incluyen en gran medida las ideas espontáneas encontradas por la investigación didáctica; 2) planificar la enseñanza problematizada sobre carga eléctrica, clarificando los objetivos, identificando el problema estructurante y sugiriendo un plan lógico coherente con capacidad para crear un ambiente tentativo, favorecedor del cambio conceptual y metodológico y de la implicación actitudinal de los alumnos/as; 3) identificar argumentos para intervenir con sentido, haciendo reflexionar a los alumnos/as si fuera necesario, en las puestas en común de las actividades de la SEA; 4) adquirir transparencia conceptual sobre el proceso que conduce al modelo deseado y conocimiento práctico muy útil para la realización de experimentos electrostáticos en el aula. Si se llegó al modelo en las condiciones de la húmeda Inglaterra, a principios del siglo XVIII, ¿cómo no vamos a poder hacerlo en nuestras aulas, con los materiales y tecnología disponibles en el siglo XXI?

Discusión y perspectivas

Buena parte de las posibles ideas erróneas resaltadas en el análisis epistemológico que hemos presentado, han sido, como se ha dicho, identificadas por muchos investigadores. Son trabajos que detectan ideas erróneas (de origen espontáneo o adquiridos en la enseñanza previa) de los alumnos/as cuando tratan de aplicar un modelo de cargas que, supuestamente, deberían haber aprendido. Señalan así, ideas erróneas que persisten tras la enseñanza sobre el tema. Nuestro trabajo va dirigido, en cambio, a cómo se debería enseñar y aprender dicho modelo de una forma problematizada, por alumnos/as que se enfrentan al tema por primera vez. Esperamos probar que de esa manera se consiguen mejores resultados (de aprendizaje y en las actitudes) que con la enseñanza habitual.

Este trabajo es un paso importante dentro de la IBD, que corresponde con la fase de fundamentación teórica y prediseño (Guisasola et al., 2021), y debe ser completado con: 1) su concreción en una secuencia problematizada de actividades; 2) puesta en práctica por profesores/investigadores y por maestros/as-colaboradores formados y; 3) evaluación y rediseño. Se trata de tareas sobre las que esperamos aportar resultados próximamente.

Referencias bibliográficas

- Ametller, J., Leach, J. y Scott, P. (2007). Using perspectives on subject learning to inform the design of subject teaching: an example from science education. *The curriculum journal*, 18(4), 479-492.
- Criado, A. y Cañal, P. (2002). Obstáculos para aprender conceptos elementales de electrostática y propuestas educativas. *Investigación en la Escuela*, 47, 53-63.

- Criado, A. M. y García-Carmona, A. (2010). Prospective Teachers' Difficulties in Interpreting Elementary Phenomena of Electrostatic Interactions: Indicators of the status of their intuitive ideas. *International Journal of Science Education*, 32(6), 769-805. <https://doi.org/10.1080/09500690902792393>
- Cobo-Huesa, C., Abril, A.M. y Ariza, M. R. (2021). Investigación basada en el diseño en la formación inicial de docentes para una enseñanza integrada en la naturaleza de la ciencia y el pensamiento crítico. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18(3), 1-17.
- Decreto 106/2022, de 5 de agosto, del Consell, de ordenación y currículo de la etapa de Educación Primaria. Diario Oficial de la Comunidad Valenciana (DOGV 9402).
- Easterday, M. W., Lewis, D. R., y Gerber, E. M. (2014). *Design-based research process: Problems, phases, and applications*. Boulder, CO: International Society of the Learning Sciences.
- Edelsbrunner, P. A., Schumacher, R., Hänger-Surer, B., Schalk, L., y Stern, E. (2024). Preparation for future conceptual learning: Content-specific long-term effects of early physics instruction. *Journal of Educational Psychology*, 116(8), 1479–1499. <https://doi.org/10.1037/edu0000887>
- Furió, C. y Guisasola, J. (1998). Dificultades de aprendizaje de los conceptos de carga y de campo eléctrico en estudiantes de bachillerato y universidad. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(1), 121-146.
- Gil, D., Carrascosa, J., Furió, C. y Martínez-Torregrosa, J. (1991). *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*. Horsori, 232.
- Gil, D., y Martínez-Torregrosa, J. (1987). Los programas-guía de actividades: una concreción del modelo constructivista de aprendizaje de las ciencias. *Investigación en la Escuela*, 3, 3-12.
- Guisasola, J. (2024a). La investigación basada en el diseño: algunos desafíos y perspectivas. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 21(2), 2801-2801. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2024.v21.i2.2801
- Guisasola, J. (2024b). Research on Designing Teaching–Learning Sequences: Accomplishment and Challenges. En E. Aydiner, E. B. G. Sidharth, M. Michelini y C. Corda (Eds.), *Frontiers of Fundamental Physics FFP16. FFP 2022* (Vol. 392). *Springer Proceedings in Physics*, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38477-6_18
- Guisasola, J. y Oliva, J. M. (2020). Nueva sección especial de REurEDC sobre investigación basada en el diseño de secuencias de enseñanza. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 17(3), 3001-3001. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3001
- Guisasola, J., Zuza, K., Ametller, J. y Gutiérrez-Berraondo, J. (2017). Evaluating and redesigning teaching learning sequences at the introductory physics level. *Physical Review Physics Education Research*, 13(2), 020139.

- Guisasola, J., Ametller J. y Zuza K. (2021). Investigación basada en el diseño de Secuencias de Enseñanza-Aprendizaje: una línea de investigación emergente en Enseñanza de las Ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18(1), 1801.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i1.1801
- Harré, R. (1979). *El Método Científico*. Hermann Blume.
- Izquierdo-Acebes, E. y Taber, K. S. (2024). Secondary Science Teachers' Instructional Strategies for Promoting the Construction of Scientific Explanations. *Science and Education*, 33, 853–899. <https://doi.org/10.1007/s11191-022-00412-5>
- Leone, M. (2014). History of physics as a tool to detect the conceptual difficulties experienced by students: The case of simple electric circuits in primary education. *Science and Education*, 23, 923-953.
- Martínez-Torregrosa, J., Domènech, J. L. y Verdú, R. (1994). Del derribo de ideas al levantamiento de puentes: la Epistemología de las ciencias como criterio organizador de la enseñanza en las ciencias/ Física y Química. *Revista De Enseñanza De La Física*, 7(2), 22–34.
<https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/16214>
- Martínez-Torregrosa, J., Limiñana, R. y Menargues, A. (2014). *Formar Ciudadanos del Conocimiento: El Desafío de una Educación Científica para Todos*. Concepciones sobre la ciencia transmitidas por la enseñanza, UNESCO, Montevideo.
<http://hdl.handle.net/10045/55825>
- Martínez-Torregrosa, J., Álvarez, J. F., Limiñana, R., Menargues, A., Nicolás, C., Rey, A., Rosa, S. y Savall, F. (2020). Enseñanza sobre gases, líquidos y sólidos: Una progresión hacia la estructura de todas las cosas. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 101, 8-15. <http://hdl.handle.net/10045/108969>
- Martínez-Torregrosa, J., Limiñana, R., Menargues Marcilla, M. A., Nicolás Castellano, C., Rey Cubero, A. y Rosa Cintas, S. (2024). *Estudio histórico evolutivo sobre carga eléctrica* [Dataset]. Universidad de Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/148061>
- McKenney, S. y Reeves, T. C. (2014). Educational Design Research. En J. Spector, M. Merrill, J. Elen, M. Bishop (Eds.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology*. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_11
- Melo, L.V., Cañada, F., Mellado, V. y Buitrago, A. (2016). Desarrollo del Conocimiento Didáctico del Contenido en el caso de la enseñanza de la Carga Eléctrica en Bachillerato desde la práctica de aula. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 13(2), 459-475. <http://hdl.handle.net/10498/18300>
- Meyer, H. W. (1972). *A History of Electricity and Magnetism*. Burndy Library.
- Mi, S., Ye, J., Li, Y. y Bi, H. (2023). Development and validation of a conceptual survey instrument to evaluate senior high school students' understanding of electrostatics. *Physical Review Physics Education Research*, 19, 010114.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010114>
- Nicolás-Castellano, C., Limiñana, R., Menargues, A., Rosa-Cintas, S. y Martínez-Torregrosa, J. (2021). ¿Es factible cambiar la enseñanza de las ciencias en primaria?. *Enseñanza de las Ciencias*, 39(3), 135-156.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3260>

- Nicolás-Castellano, C., Limiñana, R., Menargues, A., Rosa-Cintas, S. y Martínez-Torregrosa, J. (2023). Sustainable Change in Primary Science Education: From Transmissive to Guided Inquiry-Based Teaching. *Sustainability*, 15(15), 11710. <https://doi.org/10.3390/su151511710>
- Oliva, J. M. (2020). Sobre la importancia de contextualizar las investigaciones en didáctica de las ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 17(1), 1001. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i1.1001
- Oliva, J. M. y Aragón, L. (2024). *Propuesta para caracterizar la investigación basada en el diseño para desarrollar secuencias de enseñanza y aprendizaje de las ciencias*. Repositorio RODIN, Universidad de Cádiz. <http://hdl.handle.net/10498/33492>
- Osuna, L., Martínez-Torregrosa, J., Carrascosa, J. y Verdú, R. (2007). Planificando la enseñanza problematizada: el ejemplo de la óptica geométrica en educación secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 25(2), 277–294. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3778>
- Penuel, W. R., Reiser, B. J., McGill, T. A. W., Novak, M., Van Horne, K. y Orwig, A. (2022). Connecting student interests and questions with science learning goals through project-based storylines. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s43031-021-00040-z>
- Real Decreto 157/2022, de 1 de marzo, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Primaria. *Boletín Oficial del Estado*, 52, de 2 de marzo de 2022.
- Reiser, B. J., Novak, M., McGill, T. A.W. y Penuel, W. R. (2021). Storyline Units: An Instructional Model to Support Coherence from the Students' Perspective. *Journal of Science Teacher Education*, 32(7), 805-829. <https://doi.org/10.1080/1046560X.2021.1884784>
- Roller, D. y Roller, D. H. D. (1954). *The Development of the Concept of Electric Charge. Electricity from the Greeks to Coulomb*. Harvard University Press.
- Schalk, L., Edelsbrunner, P. A., Deiglmayr, A., Schumacher, R. y Stern, E. (2019). Improved application of the control-of-variables strategy as a collateral benefit of inquiry-based physics education in elementary school. *Learning and Instruction*, 59, 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2018.09.006>
- Torres Assis, A. K. (2010). *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*. Apeiron Montreal.
- Verdú, R. y Martínez-Torregrosa, J. (2004). *La estructura problematizada de los temas y cursos de Física y Química como instrumento de mejora de su enseñanza y aprendizaje*. <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/2782/1/tesis.pdf>
- Whittaker, E. T. (1910). *A History of the Theories of the Aether and Electricity. From the Age of Descartes to the Close of the Nineteenth Century*. Dublin University Press Series.

Anexo I

Itinerario de secuencias de enseñanza sobre *¿Cómo están hechas todas las cosas por dentro? ¿En qué se parecen? ¿En qué se diferencian?*, para la etapa de Educación Primaria.

Problema estructurante (Origen del hilo argumental)	Título/s habitual/es	Título/s en forma interrogativa secuencia de temas/ problemas	
¿Cómo están hechas todas las cosas por dentro? ¿En qué se parecen? ¿En qué se diferencian?	Propiedades específicas	¿En qué se diferencian los materiales?	¿De qué material están hechos estos objetos? ¿Podrían estar hechos de otros? (1.º E.P.)
	Propiedades comunes: masa y volumen	¿Todas las cosas que vemos son totalmente distintas o tienen algo en común?	¿Cuál pesa más? ¿Cuál ocupa más espacio? (2.º E.P.) ¿Cómo es el aire? (3.º E.P.) ¿Cómo medir las propiedades de los objetos (medida)? (4.º-5.º E.P.)
	Densidad	¿Todas las cosas que vemos son totalmente distintas o tienen algo en común?	¿Qué material es más «ligero»? ¿Y más «pesado»? (5.º-6.º E.P.)
	Carga eléctrica	¿Todas las cosas que vemos son totalmente distintas o tienen algo en común? (Otra propiedad general: la carga eléctrica)	¿Atraer papelitos es una propiedad de todos los materiales? (5.º-6.º E.P.)
	Modelo corpuscular	¿Cómo están formadas las cosas «por dentro»?	¿Cómo son los gases (como el aire) «por dentro»? (6.º E.P.)
	Cambio químico*	¿Cómo se explican los cambios o transformaciones que ocurren en la Naturaleza?	¿Cómo explicar los cambios en que desaparecen sustancias y aparecen otras diferentes? (adecuado para ESO*)

Anexo II

Relación entre ideas clave epistemológicas y objetivos de aprendizaje

IC.1 Todos los objetos de cualquier material son atraídos por un objeto electrizado.	OA.1 Un objeto electrizado por frotamiento atrae a objetos no electrizados (neutros), grandes o pequeños, móviles o inmóviles de cualquier material.
IC.2 Todos los materiales se pueden electrizar <ul style="list-style-type: none"> • IC.2.1. La electrización de un objeto se puede transmitir a otros. • IC.2.2. La humedad influye en el proceso de electrización/ deselectrización. 	OA.2 Saber que todos los objetos se pueden electrizar por frotamiento o por contacto, y saber cómo hacerlo <ul style="list-style-type: none"> • OA.2.1 Comprender que el estado de electrización se puede transmitir a otros objetos (y distinguir empíricamente electrización de polarización). • OA.2.2 Comprender que los materiales pueden ser desde muy buenos conductores a muy buenos aislantes y saber cómo identificarlos. Los buenos conductores (como los metales) se electrizan fácilmente por contacto siempre que estén sujetos por un material aislante. El cuerpo humano es un conductor aceptable.
IC.3 Entre dos objetos electrizados puede haber fuerzas repulsivas o atractivas <ul style="list-style-type: none"> • IC.3.1 Las fuerzas repulsivas siempre aparecen entre dos objetos electrizados (es decir, que atraen a objetos neutros). • IC.3.2 Un objeto repelido por otro electrizado, puede ser atraído por otro electrizado de distinto material (o del mismo, pero electrizado de manera distinta). 	OA.3 Comprender que para explicar las fuerzas que se ejercen objetos electrizados y entre éstos y objetos neutros se debe admitir la existencia de una propiedad (la carga eléctrica) que tiene dos variedades, y que se encuentran en la misma cantidad en los objetos neutros y en exceso de una de ellas en los objetos electrizados <ul style="list-style-type: none"> • OA.3.1 Elaborar un primer modelo que pueda explicar que un cuerpo electrizado atraiga a uno neutro y que se repelan al tocarse. • OA.3.2 Realizar un diseño experimental para comprobar si todos los objetos electrizados se repelen entre sí.
IC.4 Tienen que existir dos tipos de carga eléctrica. <ul style="list-style-type: none"> • IC.4.1 Todos los objetos electrizados que son repelidos por un objeto electrizado, se repelen entre sí. • IC.4.2 Todos los objetos electrizados que son atraídos por un objeto electrizado, se repelen entre sí. • IC.4.3 Cualquier objeto cargado, sea con un tipo y otro de carga, atrae a un objeto neutro. Los objetos neutros deben tener ambas variedades de carga en la misma cantidad, que se pueden mover dentro del objeto. 	OA.4 Elaborar un modelo que pueda explicar los resultados anteriores <ul style="list-style-type: none"> • OA.4.1 y OA.4.2 Elaborar un modelo que explique las fuerzas repulsivas y atractivas entre objetos electrizados. • OA.4.3 Explicar por qué un objeto neutro puede electrizarse al frotarlo y/o al tocarlo con otro objeto electrizado. • OA.4.4 Utilizar el modelo para explicar cómo es posible que cualquier objeto cargado, sea con un tipo u otro de carga, atraiga siempre a un objeto neutro.