



Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación
de las Ciencias

ISSN:

ISSN: 1697-011X

revista.eureka@uca.es

Universidad de Cádiz

España

Modelo Científico de la Nutrición Vegetal: análisis epistemológico y propuesta de progresión de aprendizaje

 Pedrera, Oier

 Barrutia, Oihana

 Díez, José Ramón

Modelo Científico de la Nutrición Vegetal: análisis epistemológico y propuesta de progresión de aprendizaje

Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, vol. 20, núm. 3, pp. 310201-310219, 2023

Universidad de Cádiz

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92074779011>

DOI: https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i3.3102

Fundamentos y líneas de trabajo

Modelo Científico de la Nutrición Vegetal: análisis epistemológico y propuesta de progresión de aprendizaje

Scientific Model of Plant Nutrition: epistemological analysis and a learning progression proposal

Oier Pedrera

Departamento de Didáctica de las Matemáticas, Ciencias Experimentales y Sociales, Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Bilbao, España


oier.pedrera@ehu.eus

 <https://orcid.org/0000-0001-8173-7984>

Oihana Barrutia

Departamento de Didáctica de las Matemáticas, Ciencias Experimentales y Sociales, Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Donostia-San Sebastián, España

oihana.barrutia@ehu.eus

 <https://orcid.org/0000-0003-4118-7791>

José Ramón Díez

Departamento de Didáctica de las Matemáticas, Ciencias Experimentales y Sociales, Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Bilbao, España

joseramon.diez@ehu.eus

 <https://orcid.org/0000-0003-3967-0186>

DOI: <https://doi.org/10.25267/>

Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i3.3102

Recepción: 30 Noviembre 2022

Revisado: 09 Abril 2023

Aprobación: 10 Mayo 2023



Acceso abierto diamante

Resumen

La enseñanza/aprendizaje del Modelo Científico de la Nutrición Vegetal (MCNV) es un tema fundamental en la enseñanza de las ciencias. Sin embargo, se trata de uno de los contenidos más difíciles tanto de enseñar como de aprender. Con el objetivo de guiar al profesorado en el diseño de secuencias de enseñanza/aprendizaje y en la construcción de ambientes de aprendizaje efectivos, este estudio consta de tres secciones. En la primera se realiza un análisis epistemológico del MCNV para definir las ideas clave que han de ser trabajadas durante el recorrido académico. En la segunda se define el modelo escolar que debería alcanzar el alumnado al finalizar la educación secundaria tomando como base la investigación didáctica y el análisis del contexto y del currículum. En la última sección se configura una propuesta de progresión de aprendizaje que explicita una secuenciación del contenido del modelo tomando en consideración las dificultades de enseñanza/aprendizaje de la temática, propuestas de progresión previas, así como orientaciones curriculares internacionales.

Palabras clave: Modelos, Nutrición vegetal, Ideas clave, Progresión de aprendizaje.

Abstract

The teaching and learning of the Scientific Model of Plant Nutrition (SMPN) is a pivotal topic in science education. However, it is also one of the most difficult contents to both teach and learn. With the aim of guiding teachers in the design of teaching/learning sequences and the construction of effective learning environments, this study consists of three sections. First, an epistemological analysis of the SMPN is performed in order to define the key ideas that must be worked on during schooling. In the second, considering the didactic research and the analysis of the context and school curriculum, it is defined the school science model students should construct by the end of secondary education. In the last section a learning progression is proposed which describes a hypothetical sequencing of the contents of the model is articulated by taking into account the teaching/learning difficulties of the topic, previously proposed learning progressions, and international curricular orientations.

Keywords: Models, Plant nutrition, Key ideas, Learning progression.

Introducción

La nutrición vegetal es un contenido fundamental y recurrente en el currículum escolar desde la Educación Primaria (EP) a la Universitaria (EU) que se mantiene a pesar de los cambios curriculares (González Rodríguez, 2018). Diferentes aspectos del tema son trabajados a lo largo de todo el recorrido académico (cf. bit.ly/3N0HjeU; BOPV, 2015; 2016). Y no es para menos, pues la comprensión integral de cómo las plantas obtienen materia y energía subordina el conocimiento de multitud de conceptos relacionados como el ciclo de carbono o el flujo de energía en los ecosistemas y en los sistemas socioecológicos (Lin y Hu, 2003; Mohan *et al.*, 2009). Por ello, dominar un modelo de la nutrición vegetal cercano al científico es un prerrequisito para comprender el funcionamiento de los ecosistemas, así como para entender y ser capaz de tomar decisiones informadas en torno a varias de las cuestiones socio-científicas a las que actualmente nos enfrentamos (Hartley *et al.*, 2011).

No obstante, construir ese modelo cercano al científico no es una tarea sencilla, ya que las ideas intuitivas del alumnado, las dificultades para aplicar principios termodinámicos fundamentales, el lenguaje cotidiano y la propia abstracción y complejidad del fenómeno hacen que tanto enseñar como aprender sobre este proceso sea un reto (Pedrera *et al.*, 2023). Por ese motivo, con la finalidad de fundamentar principios para el diseño de secuencias de enseñanza/aprendizaje (SEAs) que acerquen al alumnado a conceptualizaciones científicas de la nutrición vegetal, los objetivos de este estudio son: a) definir las ideas clave que emergen del análisis epistemológico del Modelo Científico de la Nutrición Vegetal (MCNV); b) describir el modelo científico escolar que el alumnado debería adquirir al finalizar la Educación Secundaria (ES); y c) proponer una progresión de aprendizaje del mismo basada en los resultados que arroja la literatura científica de la Didáctica de las Ciencias Experimentales para ayudar a guiar el proceso de enseñanza/aprendizaje.

Modelos científicos y modelos científicos escolares

Antes de comenzar a describir el MCNV conviene definir qué es un modelo y las diferencias entre modelos científicos y escolares. Según su significado más extendido, un modelo es una representación que reproduce los principales aspectos e incluso traduce de otra forma la naturaleza de la entidad modelada (Justi, 2007). En el caso particular de las ciencias y la enseñanza de las ciencias, la mayoría de investigaciones consensúa que un modelo científico es una representación de objetos, fenómenos, procesos, ideas y/o sistemas cuyo objetivo es desarrollar y probar descripciones, explicaciones y predicciones científicas (Gilbert, 1998; Gilbert y Boulter, 2000; Oh y Oh, 2011).

Una característica clave de los modelos científicos es su papel como mediadores o puentes entre la teoría y los datos empíricos de fenómenos naturales normalmente demasiado complejos (Morrison y Morgan, 1999). Mediante los procesos de idealización, abstracción y simplificación, un fenómeno del mundo real puede organizarse en un modelo que puede ser comprendido como una simplificación cuidadosamente seleccionada de la entidad referente (Oh y Oh, 2011; Taber y Akpan, 2017). No obstante, esto no significa que los modelos sean imprecisos o inexactos, pues el hecho de ser representaciones conceptuales externas, concretas y explícitas consensuadas por la comunidad científica los dota de coherencia, precisión y límites de aplicación definidos y estables (Greca y Moreira, 2000). Así, aunque no todos los detalles del objeto modelado sean reflejados y se ajusten a la perfección, la información que proporcionan los modelos científicos es útil y profunda, siendo suficiente para responder preguntas científicas, comunicar ideas y estructurar el conocimiento (Acevedo-Díaz *et al.*, 2017; Adúriz-Bravo, 2012; Oh y Oh, 2011). Por ello, los modelos científicos actúan como entidades representacionales primarias de la ciencia moderna y su construcción, aplicación, prueba, comparación, interpretación y revisión son cruciales en la práctica científica (Acevedo-Díaz *et al.*, 2017; Giere, 2004).

Asimismo, una enseñanza de las ciencias auténtica también debería enfatizar los modelos y la modelización tanto por su importancia epistémica como por la veracidad con la que reflejan la naturaleza de la ciencia (Bryce *et al.*, 2016; Gilbert y Justi, 2016; Oliva, 2019; Osborne, 2014; Treagust *et al.*, 2002).

Sin embargo, cuando hablamos de modelos en la educación de las ciencias no nos referimos a los -a menudo demasiado sofisticados- modelos científicos como tal, sino a las adaptaciones de los mismos denominados modelos escolares o curriculares (Justi, 2007). Estos últimos son el resultado de la transposición didáctica -o elementarización según Duit *et al.* (2012)- de los modelos científicos a las características y al contexto del alumnado objetivo de la instrucción con la finalidad específica de acercar al alumnado al modelo científico consensuado (Galagovsky y Adúriz-Bravo, 2001). Al igual que los modelos científicos, los modelos escolares también son modelos conceptuales externos, coherentes y compartidos por una comunidad -en este caso la educativa-, por lo que pueden definirse de forma precisa y en concordancia con el conocimiento científico consensuado (Greca y Moreira, 2000). Así, a pesar de ser adaptaciones de representaciones, los modelos escolares pueden ser tan útiles y auténticos como los científicos siempre y cuando se mantengan fieles a las ideas científicas nucleares del modelo que intentan acomodar y asientan unos cimientos apropiados para la posterior progresión y complejización hacia el modelo científico completo (Taber y Akpan, 2017).

Análisis epistemológico e ideas clave del Modelo Científico de la Nutrición Vegetal (MCNV)

En lo que al MCNV respecta, construir un modelo sofisticado y cercano al científico implica un desarrollo progresivo de ideas de las cuales algunas sientan las bases para trabajar con ideas más avanzadas en el futuro (Campbell *et al.*, 2016; Vosniadou, 2019). Por ello, una de las formas de asegurar que el modelo escolar que se define es útil y no obstaculiza el aprendizaje posterior es definir las ideas clave del modelo científico (Taber, 2000). Como Guisasola *et al.* (2021) exponen, hay multitud de herramientas que permiten, por un lado, la destilación de las ideas clave de un modelo y, por otro, la definición del modelo escolar y los indicadores de aprendizaje mediante la transposición didáctica del mismo. De este modo, a la hora de identificar las ideas clave del MCNV en este trabajo se ha optado por el uso de la herramienta del *Análisis Epistemológico*, al igual que Guisasola *et al.* (2021).

Autores como Kuhn o Bachelard remarcan que el proceso histórico de construcción de modelos científicos es comparable a la construcción de modelos mentales que el alumnado realiza durante el proceso de enseñanza/aprendizaje (Kuhn, 1984; Matthews, 2004). De hecho, varios estudios señalan que algunos obstáculos epistemológicos a los que se enfrentaron los investigadores en el pasado se reflejan hasta cierto punto en los estudiantes a modo de dificultades y concepciones (Métioui *et al.*, 2016; Wandersee, 1986). Por este motivo el análisis epistemológico permite, tomando como base la estructura interna del conocimiento científico, determinar las ideas o componentes conceptuales clave del modelo científico y especificar indicadores de aprendizaje fundamentados y respaldados por la evidencia epistemológica (Guisasola *et al.*, 2008, 2017; Zuza *et al.*, 2018).

El análisis epistemológico se realiza estudiando el desarrollo histórico del modelo e investigando las fuentes históricas y filosóficas primarias y secundarias relacionadas con los contenidos a enseñar (e.g. Cañal, 1990; González Rodríguez *et al.*, 2014; Métioui *et al.*, 2016). De esta forma, mediante la revisión del desarrollo de las ideas, los argumentos y los modelos explicativos utilizados por investigadores del pasado, se identifican los principales obstáculos epistemológicos y ontológicos que tuvieron que superarse en la construcción del modelo científico consensuado actual de los que derivan las ideas clave (Guisasola *et al.*, 2021).

En lo que a la construcción del MCNV respecta, diferentes autores remarcan que el obstáculo epistemológico principal fue transitar del modelo heterotrófico de la *teoría del humus* al autotrófico de la *teoría de la fotosíntesis*, suceso que tuvo lugar con el descubrimiento de dicha reacción a finales del s. XVIII (ver Figura 1) (Cañal, 1990; González Rodríguez *et al.*, 2014; Métioui *et al.*, 2016). De hecho, incluso tras descubrir la fotosíntesis, el conocimiento práctico derivado de la agricultura provocó que modelos interpretativos mutuamente exclusivos coexistieran hasta el s. XIX cuando se describió la necesidad de componentes inorgánicos para el crecimiento vegetal (González Rodríguez *et al.*, 2014). Finalmente, gracias al desarrollo de técnicas de investigación bioquímicas durante el s. XX., se describió de manera

detallada, entre otras cosas, que la fotosíntesis consta de dos fases y que el oxígeno que las plantas expulsan proviene del agua absorbida por las raíces y transportada por el xilema junto con los nutrientes (i.e. sales minerales) hasta las partes verdes de la planta (Lambers *et al.*, 2008).

Por otro lado, otro aspecto clave del MCNV que costó integrar fue el de la respiración como proceso *productor de energía utilizable* (Figura 1). Aunque a día de hoy existe consenso en la Biología para integrar la respiración como un proceso más de la nutrición al menos a nivel celular, durante muchas décadas éste fue considerado un mero intercambio de gases (González Rodríguez *et al.*, 2014; Meidner, 1985). El proceso se describió por primera vez en plantas en el s. XVIII, pues los primeros científicos que detallaron la fotosíntesis observaron que el intercambio gaseoso se invertía en la oscuridad e incluso se generaba calor. Sin embargo, no fue hasta que Julius von Sachs (s. XIX) describió empíricamente la pérdida de masa que acontecía en las plantas durante este proceso que se comenzó a considerar como una reacción de combustión o catabólica (Meidner, 1985). Este cambio de paradigma, junto con los descubrimientos bioquímicos y celulares de la época, permitieron la descripción detallada del proceso de respiración celular universal para todos los seres vivos aeróbicos, con la peculiaridad de que la materia orgánica utilizada por las plantas es de origen endógeno (Lambers *et al.*, 2008).

Finalmente, es remarcable el papel que la nutrición vegetal tiene a nivel de ecosistema, llegando a Arnon (1982) a mencionar que la fotosíntesis merece el puesto del proceso bioquímico más importante de la Tierra. Las plantas no solo son las responsables de la producción del oxígeno indispensable para los seres vivos aerobios, sino que, además, son consideradas la puerta de entrada de energía y materia de los ecosistemas (Lin y Hu, 2003). Pese a que la mayoría de los descubrimientos que permitieron construir el MCNV actual se basaron en experimentos a nivel de organismo y bioquímico, considerar la relevancia de este proceso en el ciclo del carbono y el flujo de la energía en los ecosistemas, al igual que su relación con las redes tróficas y la importancia de la producción de oxígeno, es una parte fundamental del MCNV. Así pues, ambos hechos permiten relacionar los procesos a lo largo de los diferentes niveles de organización y permiten comprender el modelo de manera integral y anidada (Akçay, 2017; Brown y Schwartz, 2009; González Rodríguez *et al.*, 2014).

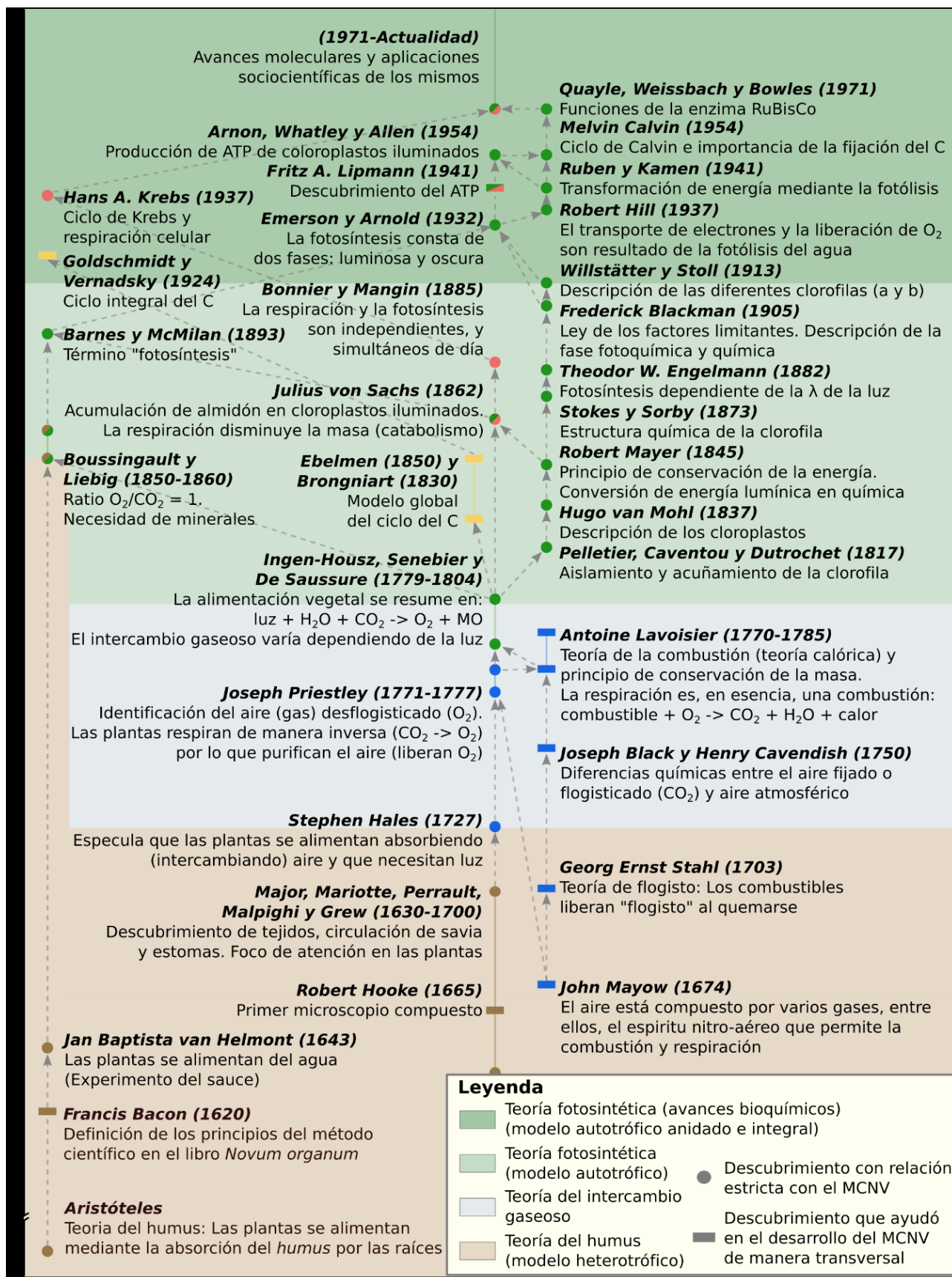


Figura 1

Esquema del desarrollo histórico del MCNV.

Tras el análisis de las principales características epistemológicas del MCNV sintetizadas anteriormente emergen cuatro claves epistemológicas (CE) o ideas clave esenciales para su comprensión. Estas ideas,

además de contar con la fundamentación epistemológica para su justificación, han sido validadas por personas expertas tanto del ámbito de la Didáctica de las Ciencias Experimentales como de la Fisiología Vegetal. Asimismo, están respaldadas por diferentes publicaciones relativas a la enseñanza/aprendizaje del MCNV (e.g. González Rodríguez *et al.*, 2014; Stern y Roseman, 2004):

CE1. *Nutrición autótrofa*. Del mismo modo que el resto de seres vivos, las plantas tienen estructuras especializadas para las funciones de nutrición (e.g. absorción, transporte, etc.). Sin embargo, la nutrición vegetal es autótrofa, por lo que, aunque las plantas precisan de sales minerales que absorben del suelo, la materia orgánica que necesitan para sintetizar compuestos y estructuras (biomasa) y obtener energía para el trabajo celular la producen las propias plantas.

CE2. *Fotosíntesis*. El proceso fundamental de la nutrición vegetal es la reacción de la fotosíntesis que tiene lugar en las partes verdes y consiste en la síntesis de materia orgánica a partir de compuestos inorgánicos simples (i.e. CO₂, H₂O...) y energía lumínica, expulsando O₂ como subproducto.

CE3. *Respiración*. Además de la fotosíntesis, las plantas necesitan realizar la respiración celular continuamente y en todas sus células para producir la energía (ATP) necesaria para los procesos metabólicos mediante la oxidación de la materia orgánica producida en la fotosíntesis.

CE4. *Ecosistema*. La nutrición vegetal en sentido amplio y, en particular, la fotosíntesis, es un proceso bioquímico vital para el funcionamiento de los ecosistemas pues sirve como fuente de oxígeno para el resto de seres vivos y punto de inicio del ciclo de carbono y flujo de energía.


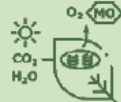
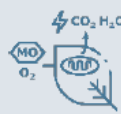

Transposición didáctica del Modelo Científico de la Nutrición Vegetal (MCNV)

La identificación de las ideas clave epistemológicas permite, a través de la transposición didáctica del modelo, la definición de un modelo escolar y sus respectivos indicadores de aprendizaje ajustados al contexto objetivo (Guisasola *et al.*, 2021). Para ello, en esta propuesta se ha triangulado la información derivada del análisis epistemológico del MCNV, de la revisión del currículum educativo, y de las aportaciones de estudios y personas expertas del área de la Didáctica de las Ciencias Experimentales.

Las primeras ideas sobre los procesos de nutrición vegetal en los currículos escolares internacionales aparecen durante la EP (p. ej. BOPV, 2015; Willard, 2020). Sin embargo, es en la ES cuando estos temas se empiezan a complejizar, y en Bachillerato cuando se profundiza en ellos y se consideran totalmente desarrollados alcanzando niveles de concreción bioquímico (BOPV, 2016). Es particularmente remarcable la complicada transición de la comprensión del MCNV que se da al pasar de la perspectiva fenomenológica, macroscópica y centrada en la fotosíntesis que se trabaja en la EP, a la comprensión conceptual simbólica que se aspira a obtener al finalizar la ES mediante la interrelación de los procesos, tanto horizontal (fotosíntesis-respiración) como verticalmente (fotosíntesis-ecosistema) (Pedrera *et al.*, 2023). Esto provoca que determinadas dificultades de enseñanza/aprendizaje aumenten a medida que el modelo se complica a lo largo de las diferentes etapas educativas (Angosto Sánchez y Morcillo Ortega, 2020; Cañal, 2005). Por ello, y porque es la última etapa educativa en la que se trabaja el MCNV de manera integral en la ES, 1º de Bachillerato constituirá nuestro objetivo de estudio.

Tabla 1

Ideas clave y respectivos indicadores de aprendizaje del modelo escolar de la nutrición vegetal para 1° de Bachillerato.

Ideas clave del modelo (Epistemología)	Indicadores de aprendizaje (Análisis contexto-curriculo-teoría)
<p>CE1. Nutrición autótrofa</p> 	<p>i1. Explica que las plantas son autótrofas, por lo que, al contrario de los animales, sintetizan su propia materia orgánica (alimento).</p> <p>i2. Entiende que, del mismo modo que los animales, las plantas tienen estructuras específicas para la nutrición como las raíces o los sistemas de transporte de savia.</p> <p>i3. Comprende que la materia orgánica tiene el rol dual de actuar tanto como bloque de construcción (sintetizar biomasa y estructuras nuevas) como de fuente de energía.</p> <p>i4. Señala que, a pesar de sintetizar su materia orgánica, las plantas necesitan absorber varias sustancias del medio para la realización de la fotosíntesis (e.g. agua, CO₂) y la síntesis de ciertas biomoléculas (e.g. minerales).</p>
<p>CE2. Fotosíntesis</p> 	<p>i5. Entiende que la fotosíntesis es un proceso transformador de carbono y de energía.</p> <p>i5.1. Identifica que la mayoría de la biomasa de las plantas tiene su origen en el CO₂ atmosférico que se transforma en materia orgánica y utiliza como bloque de construcción. (Fotosíntesis como proceso transformador de carbono/materia).</p> <p>i5.2. Comprende que la energía lumínica necesaria para iniciar la fotosíntesis se transforma en energía química (Fotosíntesis como proceso transformador de energía).</p> <p>i6. Representa la fotosíntesis como un proceso bioquímico donde la luz fotoliza el agua en oxígeno (fase dependiente de la luz) y el dióxido de carbono se fija sintetizando materia orgánica (fase no-dependiente de la luz).</p> <p>i7. Comprende que la fotosíntesis sucede en los tejidos clorofílicos (partes verdes) de las plantas solo en presencia de la luz.</p>
<p>CE3. Respiración</p> 	<p>i8. Entiende que la respiración es un proceso transformador de carbono y de energía donde se consume la materia orgánica sintetizada en la fotosíntesis (Respiración como proceso transformador de carbono y energía; Relación horizontal fotosíntesis-respiración).</p> <p>i9. Representa la respiración como un proceso bioquímico donde la energía química de la materia orgánica se libera mediante la oxidación (O₂) y se producen ATP para el trabajo celular y CO₂, agua y calor como desechos.</p> <p>i10. Comprende la respiración como un proceso continuo que se da en todas las células vegetales vivas.</p>
<p>CE4. Ecosistema</p> 	<p>i11. Identifica la importancia de las plantas para la vida en la Tierra y el funcionamiento de los ecosistemas.</p> <p>i11.1. Entiende el papel de las plantas en los ecosistemas como productoras de O₂ necesario para la respiración aeróbica (Relación vertical fotosíntesis-ecosistema).</p> <p>i11.2. Comprende la relevancia de las plantas como inicio del ciclo de la materia y flujo de la energía en los ecosistemas relacionándolas con las redes tróficas (Relación vertical fotosíntesis-ecosistema).</p>
	<p>i12. Presenta habilidades propias de la práctica científica y competencias para la resolución de problemas utilizando procedimientos científicos: planteamiento de problemas, generación de hipótesis, interpretación y análisis de datos, obtención de conclusiones...</p>

El primer paso para la transposición didáctica del MCNV es un análisis en profundidad del currículum educativo de la CAV para 1º de Bachillerato (BOPV, 2016). Esto permite comparar los contenidos con las ideas clave y establecer el nivel de complejidad exigido en este nivel educativo. Sin embargo, cabe destacar que al igual que la mayoría del profesorado (González Rodríguez *et al.*, 2012), el currículum enfatiza la perspectiva fisiológica y los aspectos descriptivos o factuales del MCNV mientras omite aspectos que en base al análisis epistemológico son esenciales (e.g. respiración). En consecuencia, para completar la triangulación, se ha realizado un estudio comparativo de la bibliografía del ámbito (e.g. González-Rodríguez *et al.*, 2009; Lewis, 2009; Mohan *et al.*, 2009; Parker *et al.*, 2012; Stern y Roseman, 2004; Ummels *et al.*, 2015) y estándares de las ciencias internacionales (AAAS, 2001; Harlen, 2015; Willard, 2020) que proponen ideas e indicadores clave del tópico a enseñar/aprender. En resumen, documentos con propuestas de modelos escolares y progresiones del MCNV para ES ya sea de manera implícita o explícita. Posteriormente, tras ordenar esta información por ideas clave epistemológicas, se han realizado varias reuniones entre expertos de la Biología y de la Didáctica de las Ciencias Experimentales que han resultado en el consenso de los indicadores de aprendizaje del MCNV para 1º de Bachillerato (Tabla 1).

Cabe destacar que el último indicador (i12) de la Tabla 1 no hace referencia a ningún contenido conceptual del MCNV, sino que enlaza directamente con la aplicación de habilidades y procedimientos científicos indispensables para el desarrollo de la competencia científica. La descripción de indicadores de aprendizaje competenciales se torna fundamental puesto que la capacidad para movilizar y utilizar los conocimientos tanto conceptuales como procedimentales son los que definen a un alumno y, por ende, a una sociedad científicamente competente y alfabetizada (Roberts, 2007). Por consiguiente, para dar por alcanzados los objetivos educativos y concluir que el alumnado domina un modelo escolar cercano al científico, además de articular los contenidos, hace falta ser capaz de desarrollar las competencias específicas de la materia, siendo una aproximación didáctica adecuada para desarrollarlas la participación en indagaciones auténticas y actividades de modelización (Osborne, 2014).

Finalmente, los conceptos e ideas formuladas en los indicadores de aprendizaje se han ordenado a modo de esquema conceptual. Así, se ha definido el modelo escolar a adquirir al final de ES para el nivel 1º de Bachillerato (Figura 2).

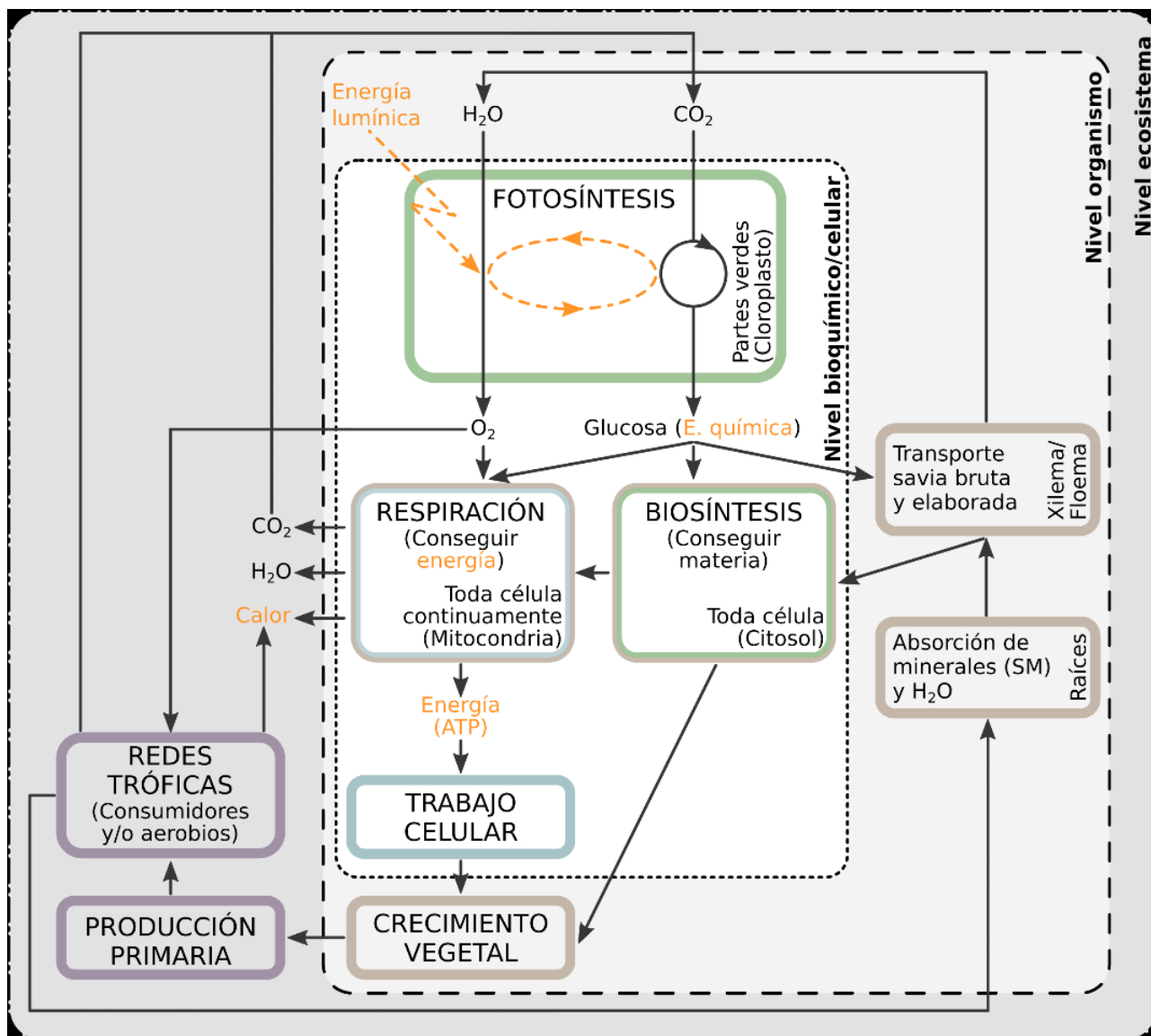


Figura 2

Esquema conceptual del modelo escolar del MCNV para 1º de Bachillerato que muestra los diferentes niveles anidados de organización biológica y algunos de los conceptos más relevantes por idea clave epistemológica (CE1, marrón; CE2, verde; CE3, azul, CE4, morado).

Propuesta de progresión de aprendizaje del Modelo Científico de la Nutrición Vegetal (MCNV)

Tanto la definición de los indicadores de aprendizaje como la descripción del modelo escolar de la nutrición vegetal permiten describir la meta que el alumnado debería alcanzar al finalizar la ES. Sin embargo, el proceso de enseñanza/aprendizaje es gradual y para guiarlo, además de conocer el objetivo final o estadio superior que se espera conseguir tras la instrucción, también es necesario conocer el punto de partida y, sobre todo, definir los niveles intermedios (Gotwals y Songer, 2009).

Con este objetivo surgió en Estados Unidos (EEUU) un área de investigación que en la última década se ha erigido como un aspecto esencial de la Enseñanza de las Ciencias Experimentales, el de las progresiones de aprendizaje (Duncan y Hmelo-Silver, 2009; Duschl *et al.*, 2011; Jin *et al.*, 2019). En este trabajo se ha optado por proponer una progresión de aprendizaje fundamentada en la *teoría del enriquecimiento del conocimiento* que identifican Jin *et al.* (2019) puesto que, a pesar de ser la menos basada en las ideas del alumnado, enfatiza la lógica de la ciencia. Es decir, algunos conceptos científicos son más complejos y, por tanto, cognitivamente más exigentes que otros (Jin *et al.*, 2019). Además, es la que mejor se ajusta a la idea

de progresión curricular como propuesta de trayectoria y puede ser de mayor utilidad al profesorado en activo para facilitar el diseño de SEAs que contribuyan a la construcción progresiva del MCNV.

En lo que a progresiones de aprendizaje del MCNV respecta, existen propuestas previas y secuenciaciones del contenido publicadas para diferentes niveles educativos (e.g. Alonzo *et al.*, 2009; González Rodríguez, 2009; Mohan *et al.*, 2009). No obstante, dado que la mayoría de la investigación se ha realizado en los EEUU bajo el paraguas del diseño curricular de los Next Generation Science Standards (NGSS), estas progresiones se centran en analizar cómo la materia y la energía se transforman y fluyen en los ecosistemas tanto en plantas como en animales (e.g. Jin *et al.*, 2013; Mohan *et al.*, 2009; Willard, 2020). Cabe destacar que esta aproximación es totalmente válida e incluso útil para la tarea que nos ocupa. Aun así, siguiendo el currículum educativo de la CAV donde el MCNV representa un bloque de contenido en sí mismo en varios niveles educativos (BOPV, 2015; 2016), posee mayor sentido proponer una progresión de aprendizaje que sitúe las plantas y el MCNV en el centro del análisis. De este modo, se propone una trayectoria o secuenciación hipotética e idealizada para cada una de las ideas claves derivadas del análisis epistemológico del MCNV.

Para determinar la secuenciación de ideas que permitan la construcción de modelos mentales cercanos al científico se han tomado en consideración 1) la construcción y lógica interna del MCNV, 2) resultados de revisiones sistemáticas en torno a las dificultades de enseñanza/aprendizaje del MCNV (Charrier Melillán *et al.*, 2007; Pedrera *et al.*, 2023), 3) progresiones de aprendizaje previamente propuestas tanto sobre la nutrición vegetal como sobre procesos transformadores de carbono y energía (Alonzo *et al.*, 2009; Cañal, 2005; Dauer *et al.*, 2014; González Rodríguez, 2009; Jin *et al.*, 2013; Mohan *et al.*, 2009; Parker *et al.*, 2013, 2015; Schramm *et al.*, 2018), y 4) propuestas internacionales de orientación curricular relacionadas con la enseñanza/aprendizaje del MCNV (materia y energía principalmente) (AAAS, 2001; Harlen, 2015; VCAA, 2015; Willard, 2020). Asimismo, articulando la información analizada en torno a las cuatro ideas clave descritas, proponemos cuatro niveles o estadios sucesivos para cada una de las ideas (Figura 3) al igual que se realiza en algunas de las secuenciaciones curriculares internacionales más relevantes (e.g. Harlen, 2015; Willard, 2020).

La progresión propuesta muestra que el estadio más básico para las tres primeras ideas clave que se obtiene de manera intuitiva durante la infancia y se trabaja durante los primeros años de la EP es que las plantas, al igual que los animales, necesitan habilitadores para crecer (Figura 3) (AAAS, 2001; Harlen, 2015; Jin *et al.*, 2013; Mohan *et al.*, 2009). Es decir, en el nivel más fundamental el alumnado identifica la necesidad de sustancias o elementos del medio para *alimentarse* y crecer, y es capaz de razonar con explicaciones causa-efecto de nivel macroscópico (Alonzo *et al.*, 2009; Dauer *et al.*, 2014; Schramm *et al.*, 2018).

En el estadio intermedio de la primera idea clave, los estudiantes comprenden el rol dual del alimento o materia orgánica al mismo tiempo que entienden que las plantas producen su propio alimento utilizando algunas sustancias del medio y luz (Alonzo *et al.*, 2009; AAAS, 2001; Harlen, 2015). En el estadio avanzado el alumnado identifica que las plantas poseen órganos especializados en la nutrición (raíces, sistema de transporte y hojas) y los relaciona explicando la absorción de agua y nutrientes, transporte de savia bruta, producción de alimento (i.e. fotosíntesis) y transporte de savia elaborada al resto del organismo (Cañal, 2005; González Rodríguez, 2009). Finalmente, en el estadio superior el alumnado comprende y explica que, a pesar de producir su propia materia orgánica a partir de materia inorgánica, la fotosíntesis no es suficiente para que las plantas crezcan y sobrevivan, pues además de la materia orgánica o alimento también necesitan otras sustancias como los minerales que absorben del suelo para sintetizar algunas biomoléculas (Alonzo *et al.*, 2009).

Estadio superior	<ul style="list-style-type: none"> Las plantas son autótrofas y sintetizan su propia MO que distribuyen por todo el organismo. No obstante, este proceso no es suficiente pues también precisan de minerales que no pueden sintetizar y consiguen del medio para producir ciertas biomoléculas. 	<ul style="list-style-type: none"> La fotosíntesis es un proceso bioquímico que tiene lugar en los cloroplastos y consta de dos fases (fotólisis del agua y fijación del carbono). Tanto la materia como la <i>E</i> se transforman y conservan a lo largo del proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> La respiración es un proceso bioquímico que sucede en las mitocondrias y consiste en la oxidación de la MO que libera la <i>E</i> de los enlaces y produce ATP para el trabajo celular. La materia y <i>E</i> se conservan y transforman en el proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> Debido a ser productoras primarias las plantas son la puerta de entrada de materia y <i>E</i> a los ecosistemas. Por ello, éstas tienen un rol esencial en los ciclos biogeoquímicos manteniendo así el equilibrio dinámico de los ecosistemas.
Estadio avanzado	<ul style="list-style-type: none"> Raíces, xilema, floema, y hojas, son los órganos de las plantas especializados en la nutrición. Estos les permiten absorber sustancias del suelo (e.g. agua, minerales); transportar savia bruta y elaborada; y absorber aire y luz. 	<ul style="list-style-type: none"> La fotosíntesis consiste en la síntesis de MO a partir de agua, CO₂ atmosférico y <i>E</i> lumínica, expulsando O₂ como subproducto. La MO puede "utilizarse" tras ser sintetizada o almacenarse. 	<ul style="list-style-type: none"> La respiración consiste en la consecución de <i>E</i> química en forma de ATP a partir de la MO fotosintética y O₂ atmosférico, expulsando CO₂, agua y calor como subproducto. 	<ul style="list-style-type: none"> Las plantas, además de producir O₂, son las productoras primarias de los ecosistemas. Así, debido a que pueden transformar la materia inorgánica en MO y la <i>E</i> lumínica en <i>E</i> química se encuentran en la base de las redes tróficas.
Estadio intermedio	<ul style="list-style-type: none"> Las plantas, a diferencia de los animales, sintetizan su propia MO (alimento). La MO sirve tanto para construir estructuras como para obtener <i>E</i> para el trabajo de las células. 	<ul style="list-style-type: none"> La fotosíntesis es el proceso esencial que se da en las partes verdes mediante el cual las plantas sintetizan MO (alimento) a partir de materia inorgánica que absorben del medio (agua, minerales, aire) y luz. 	<ul style="list-style-type: none"> La respiración es el proceso constante y ubicuo en el que mediante el consumo de la MO fotosintética las plantas consiguen <i>E</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> Las plantas son alimento para los animales porque sintetizan materiales que ellos no pueden fabricar. Las plantas expulsan el O₂ empleado por los organismos aerobios para respirar.
Estadio inicial	<ul style="list-style-type: none"> Tanto las plantas como los animales necesitan agua, alimento y aire para crecer y sobrevivir. Las plantas además necesitan luz. 			<ul style="list-style-type: none"> La vida en la Tierra es dependiente de las plantas y, más específicamente, de la nutrición autótrofa.

Figura 3

Propuesta de progresión de aprendizaje para cada idea clave del MCNV desde EP hasta ES (1º de Bachillerato) basada en los resultados empíricos de la investigación en Didáctica de las Ciencias Experimentales y orientaciones curriculares internacionales. (Abreviaturas: MO, Materia orgánica; *E*, Energía)

Respecto a las ideas clave de la fotosíntesis y respiración, el estadio intermedio enfatiza la función de ambos procesos junto con su ubicación macroscópica y frecuencia (Figura 3) (AAAS, 2001; Cañal, 2005). En el siguiente nivel los estudiantes comprenden las bases químicas de dichos procesos relacionándolos horizontalmente e identificando tanto los compuestos que se forman como los reactivos que se utilizan (Alonzo *et al.*, 2009; González Rodríguez, 2009; Willard, 2020). Finalmente, en el estadio superior, la fotosíntesis y la respiración son entendidas como procesos celulares y bioquímicos. Por ello, se define la ubicación celular y rutas bioquímicas básicas de ambos procesos haciendo hincapié en las dos fases de la fotosíntesis (Cañal, 2005; González Rodríguez, 2009; Willard, 2020). Cabe mencionar además que para alcanzar este estadio es esperable que el alumnado haya asimilado los principios termodinámicos básicos y sea capaz de identificar que la materia se conserva durante todas estas reacciones aunque se reorganice atómicamente, o que la energía lumínica atrapada se conserva en los enlaces de la materia orgánica (moléculas altamente energéticas) aunque una parte de ésta se degrada inevitablemente a modo de calor (Dauer *et al.*, 2014; Jin *et al.*, 2013; Mohan *et al.*, 2009; Parker *et al.*, 2013; Schramm *et al.*, 2018; Willard, 2020).

Por último, en lo que a la dimensión ecosistémica del MCNV respecta, en el estadio inferior de la progresión el alumnado comprende que la vida en la Tierra es dependiente de las plantas (Figura 3) (Cañal, 2005; Harlen, 2015; VCAA, 2015). En el siguiente nivel, esta dependencia se define y los estudiantes comprenden que las plantas son esenciales para los organismos heterótrofos porque, por un lado, éstas son su alimento ya que elaboran materiales que ellos no pueden fabricar y, por otro, expulsan el O₂ que la mayoría de organismos heterótrofos necesitan para respirar (AAAS, 2001; González Rodríguez, 2009; Willard, 2020). En el estadio avanzado las plantas son definidas como productoras primarias, es decir, el alumnado comprende que, además de expulsar O₂ mediante la fotosíntesis, son capaces de transformar

materia inorgánica en orgánica y energía lumínica en química constituyendo así la base de las redes tróficas y siendo la entrada de materia y energía a los ecosistemas (Cañal, 2005; González Rodríguez, 2009; Harlen, 2015; Willard, 2020). Por último, en la etapa superior, el alumnado comprende el papel esencial de las plantas y la nutrición vegetal en los ciclos biogeoquímicos y el equilibrio dinámico de los ecosistemas por su capacidad para actuar como entrada de materia y energía (González Rodríguez, 2009; Mohan *et al.*, 2009; Parker *et al.*, 2013).

Además, aunque no se mencionen en la progresión de manera explícita, se espera que el alumnado que alcanza el estadio superior sea capaz de transferir los conocimientos y relacionar los sistemas biológicos y socio-ecológicos (Mohan *et al.*, 2009). En definitiva, el objetivo de desarrollar un modelo del MCNV cercano al científico no es solo el de comprender la alimentación de las plantas, sino que también consiste en desarrollar un conjunto de competencias y habilidades que permitan al alumnado tomar decisiones fundamentadas y actuar de forma más razonada y acorde a la evidencia científica hacia un futuro más sostenible.

Conclusiones

Este artículo pretende facilitar el diseño de SEAs y mejorar la enseñanza/aprendizaje del MCNV mediante la definición del modelo escolar esperable al finalizar la ES y la construcción de una propuesta de progresión de aprendizaje, ambos basados en las ideas clave que emergen del análisis epistemológico del modelo. Este análisis muestra que son unas pocas las ideas nucleares del MCNV que permiten construir un modelo significativo y cercano al científico. Sin embargo, el verdadero desafío es el de ir construyendo estas ideas de forma coherente y enfatizando la modelización y las prácticas científicas a lo largo de la escolaridad, pues la mera memorización de estas ideas sin asimilar y saber aplicar el modelo en otros contextos sería en vano. Es más, los currículos de ciencias y marcos pedagógicos vigentes destacan que, al igual que algunos de los indicadores de aprendizaje descritos, para lograr una ciudadanía científicamente alfabetizada la construcción de modelos mentales cercanos al consenso científico no es suficiente. El desarrollo de habilidades científicas, procedimientos y, en definitiva, competencias es tan importante como la construcción de conocimiento conceptual. Como Crowe *et al.* (2008) argumentan, una ciudadanía alfabetizada no se puede caracterizar simplemente por la información que recuerdan sino por lo que son capaces de realizar con lo que saben. Por ello, debido a la marcada importancia de desarrollar perfiles científicamente competentes, la instrucción en torno al MCNV no puede limitarse a transmitir sus contenidos sino a trabajarlos mediante la participación en prácticas científicas auténticas.

Por otro lado, para alcanzar el modelo escolar definido en base al análisis epistemológico y del contexto, este artículo propone una progresión de aprendizaje o trayectoria conjetural idealizada para la adquisición y construcción gradualmente más compleja de las ideas clave del modelo. Esta parte del conocimiento previo de los estudiantes y considera tanto la construcción interna del contenido a enseñar como lo que se espera que aprendan al final de la escolarización secundaria. No obstante, cabe remarcar que las ideas presentadas no deben ser utilizadas como contenidos de enseñanza literales ni, como ya se ha mencionado, ser comprendidas de manera aislada de la práctica científica. Estas ideas han de concebirse como una hoja de ruta para la construcción de modelos mentales significativos que permitan al alumnado transferir estos conocimientos a contextos cotidianos relevantes. Al fin y al cabo, el objetivo de construir un modelo mental cercano al científico de la nutrición vegetal no es solo un logro intelectual deseable, sino que es también un requisito para la consecución de competencias para la toma de decisiones informada en torno a algunos de los problemas socio-ecológicos actuales.

Finalmente, conviene aclarar que la progresión que aquí proponemos no deja de ser una secuenciación de ideas que, a pesar de estar robustamente fundamentada, no ha sido empíricamente validada. Por ello, este trabajo abre el camino a futuras líneas de investigación que, basándose en los resultados del mismo, 1) exploren y diagnostiquen los niveles de conceptualización del alumnado de distintas etapas educativas con el objetivo de mejorar el conocimiento teórico/escolar del MCNV, y 2) se centren en el diseño y evaluación

de SEAs basadas en evidencias y que faciliten la construcción de modelos mentales cercanos a los científicos facilitando el desarrollo competencial del alumnado.

Agradecimientos

Al Programa de Formación de Investigadores Predoctorales de la UPV/EHU (PIF20/65) y al Gobierno Vasco en reconocimiento a grupos de investigación consolidados (IKASGARAIA. Educación, cultura y desarrollo sostenible; IT1637-22) que financian parcialmente este trabajo.

Referencias

- Acevedo-Díaz, J. A., García-Carmona, A., Aragón-Méndez, M. del M., y Oliva-Martínez, J. M. (2017). Modelos científicos: Significado y papel en la práctica científica. *Revista científica*, 3(30), 155. <https://doi.org/10.14483/23448350.12288>
- Adúriz-Bravo, A. (2012). Algunas características clave de los modelos científicos relevantes para la educación química. *Educación Química*, 23, 248-256. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(17\)30151-9](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(17)30151-9)
- Akçay, S. (2017). Prospective elementary science teachers' understanding of photosynthesis and cellular respiration in the context of multiple biological levels as nested systems. *Journal of Biological Education*, 51(1), 52-65. <https://doi.org/10.1080/00219266.2016.1170067>
- Alonzo, A. C., Benus, M., Bennett, W., y Pinney, B. (2009). A learning progression for elementary school students' understanding of plant nutrition. En G. Çakmakci y M. F. Taşar (Eds.), *Contemporary science education research: learning and assessment* (pp. 323-332). Ankara, Turkey: Pegem Akademi.
- American Association for the Advancement of Science (AAAS) (Ed.). (2001). *Atlas of science literacy*. American Association for the Advancement of Science: National Science Teachers Association.
- Angosto Sánchez, I., y Morcillo Ortega, J. G. (2020). Teaching vegetable nutrition: From the problem to the proposal. *Journal of Biological Education*, 56(4), 416-431. <https://doi.org/10.1080/00219266.2020.1808514>
- Arnon, D. I. (1982). Sunlight, Earth, Life: The grand design of photosynthesis. *The Sciences*, 22(7), 22-27. <https://doi.org/10.1002/j.2326-1951.1982.tb02101.x>
- BOPV. (2015, diciembre 22). *Por el que se establece el currículo de Educación Básica y se implanta en la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Decreto 236/2015.
- BOPV. (2016, septiembre 6). *Por el que se establece el currículo del Bachillerato y se implanta en la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Decreto 127/2016.
- Brown, M. H., y Schwartz, R. S. (2009). Connecting photosynthesis and cellular respiration: Preservice teachers' conceptions. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(7), 791-812. <https://doi.org/10.1002/tea.20287>
- Bryce, C. M., Baliga, V. B., De Nesnera, K. L., Fiack, D., Goetz, K., Tarjan, L. M., Wade, C. E., Yovovich, V., Baumgart, S., Bard, D. G., Ash, D., Parker, I. M., y Gilbert, G. S. (2016). Exploring models in the biology classroom. *The American Biology Teacher*, 78(1), 35-42. <https://doi.org/10.1525/abt.2016.78.1.35>
- Campbell, T., Schwarz, C., y Windschitl, M. (2016). What we call misconceptions may be necessary stepping-stones toward making sense of the world. *Science and Children*, 53(7). https://doi.org/10.2505/4/sc16_053_07_28
- Cañal, P. (1990). *La enseñanza en el campo conceptual de la nutrición de las plantas verdes: Un estudio didáctico en la Educación Básica*. Universidad de Sevilla.
- Cañal, P. (2005). *La nutrición de las plantas: Enseñanza y aprendizaje*. Síntesis.
- Charrier Melillán, M., Cañal, P., y Rodrigo Vega, M. (2007). Student's alternative conceptions on photosynthesis and respiration: A bibliographical revision in relation to plant nutrition researches

and learning. *Enseñanza de las Ciencias*, 24(3), 401-409. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3790>

- Crowe, A., Dirks, C., y Wenderoth, M. P. (2008). Biology in Bloom: Implementing Bloom's taxonomy to enhance student learning in Biology. *CBE—Life Sciences Education*, 7, 368-381 <https://doi.org/10.1187/cbe.08-05-0024>
- Dauer, J. M., Doherty, J. H., Freed, A. L., y Anderson, C. W. (2014). Connections between student explanations and arguments from evidence about plant growth. *CBE—Life Sciences Education*, 13(3), 397-409. <https://doi.org/10.1187/cbe.14-02-0028>
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., y Parchmann, I. (2012). The model of educational reconstruction – a framework for improving teaching and learning science. En D. Jorde y J. Dillon (Eds.), *Science Education Research and Practice in Europe* (pp. 13-37). SensePublishers. https://doi.org/10.1007/978-94-6091-900-8_2
- Duncan, R. G., y Hmelo-Silver, C. E. (2009). Learning progressions: Aligning curriculum, instruction, and assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 606-609. <https://doi.org/10.1002/tea.20316>
- Duschl, R., Maeng, S., y Sezen, A. (2011). Learning progressions and teaching sequences: A review and analysis. *Studies in Science Education*, 47(2), 123-182. <https://doi.org/10.1080/03057267.2011.604476>
- Galagovsky, L. R., y Adúriz-Bravo, A. (2001). Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de modelo didáctico analógico. *Enseñanza de las Ciencias*, 19(2), 231-242. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4000>
- Giere, R. N. (2004). How models are used to represent reality. *Philosophy of Science*, 71(5), 742-752. <https://doi.org/10.1086/425063>
- Gilbert, J. K. (1998). Explaining with models. En *ASE guide to secondary science education* (M. Ratcliffe, pp. 159-166). Stanley Thornes.
- Gilbert, J. K., y Boulter, C. J. (Eds.). (2000). *Developing models in science education*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0876-1>
- Gilbert, J. K., y Justi, R. (2016). *Modelling-based teaching in science education* (Vol. 9). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29039-3>
- González Rodríguez, C. (2009). Problemática de la nutrición vegetal en la educación obligatoria. Una propuesta de secuencia. *Revista de Educación en Biología*, 12(2), 36-43.
- González Rodríguez, C. (2018). ¿Han mejorado las ciencias de la naturaleza en los currículos de la E.S.O. desde L.O.G.S.E hasta la L.O.M.C.E: la nutrición vegetal? En C. Martínez Losada y S. García Barros (Eds.), 28 *Encuentros de didáctica de las ciencias experimentales: Iluminando el cambio educativo* (pp. 697-702). Universidade da Coruña.
- González Rodríguez, C., García Barros, S., y Martínez Losada, C. (2012). La nutrición vegetal desde el pensamiento docente. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias.*, 9(1), 93-105. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2012.v9.i1.07
- González Rodríguez, C., Martínez Losada, C., y García Barros, S. (2014). El modelo de nutrición vegetal a través de la historia. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 11(1), 2-12. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2014.v11.i1.02
- González-Rodríguez, C., García-Barrios, S., y Martínez-Lozada, C. (2009). Plant nutrition in Spanish secondary textbooks. *Journal of Biological Education*, 43(4), 152-158. <https://doi.org/10.1080/00219266.2009.9656175>
- Gotwals, A. W., y Songer, N. B. (2009). Reasoning up and down a food chain: Using an assessment framework to investigate students' middle knowledge. *Science Education*, 259-281. <https://doi.org/10.1002/sce.20368>

- Greca, I. M., y Moreira, M. A. (2000). Mental models, conceptual models, and modelling. *International Journal of Science Education*, 22(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/095006900289976>
- 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), 1-18. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i1.1801
- Guisasola, J., Montero, A., y Fernández, M. (2008). La historia del concepto de fuerza electromotriz en circuitos eléctricos y la elección de indicadores de aprendizaje comprensivo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(1), 1604.1-1604.8. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172008000100018>
- Guisasola, J., Zuza, K., Ametller, J., y Gutierrez-Berraondo, J. (2017). Evaluating and redesigning teaching learning sequences at the introductory physics level. *Physical Review Physics Education Research*, 13(2), 020139. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.020139>
- Harlen, W. (2015). *Principles and big ideas of science education*. Association for science education
- Hartley, L. M., Wilke, B. J., Schramm, J. W., D'Avanzo, C., y Anderson, C. W. (2011). College students' understanding of the carbon cycle: Contrasting principle-based and informal reasoning. *BioScience*, 61(1), 65-75. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.1.12>
- Jin, H., Zhan, L., y Anderson, C. W. (2013). Developing a fine-grained learning progression framework for carbon-transforming processes. *International Journal of Science Education*, 35(10), 1663-1697. <https://doi.org/10.1080/09500693.2013.782453>
- Justi, R. (2007). La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos. *Enseñanza de las Ciencias*, 24(2), 173-184. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3798>
- Kuhn, T. S. (1984). *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica.
- Lambers, H., Chapin, F. S., y Pons, T. L. (2008). *Plant physiological ecology*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3>
- Lewis, J. (2009). Can theoretical constructs in science be generalised across disciplines?: Eduactional Research. *Journal of Biological Education*, 44(1), 5-11. <https://doi.org/10.1080/00219266.2009.9656185>
- Lin, C., y Hu, R. (2003). Students' understanding of energy flow and matter cycling in the context of the food chain, photosynthesis, and respiration. *International Journal of Science Education*, 25(12), 1529-1544. <https://doi.org/10.1080/0950069032000052045>
- Matthews, M. R. (2004). Thomas Kuhn's impact on science education: What lessons can be learned? *Science Education*, 88(1), 90-118. <https://doi.org/10.1002/sce.10111>
- Meidner, H. (1985). Historical Sketches 11. *Journal of Experimental Botany*, 36(11), 1831-1832. <https://doi.org/10.1093/jxb/36.11.1831>
- Métioui, A., Matoussi, F., y Trudel, L. (2016). The teaching of photosynthesis in secondary school: A history of the science approach. *Journal of Biological Education*, 50(3), 275-289. <https://doi.org/10.1080/00219266.2015.1085427>
- Mohan, L., Chen, J., y Anderson, C. W. (2009). Developing a multi-year learning progression for carbon cycling in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 675-698. <https://doi.org/10.1002/tea.20314>
- Morrison, M., y Morgan, M. S. (1999). Models as mediating instruments. En M. S. Morgan y M. Morrison (Eds.), *Models as mediators* (1.^a ed., pp. 10-37). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511660108.003>
- Oh, P. S., y Oh, S. J. (2011). What teachers of science need to know about models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109-1130. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.502191>

- Oliva, J. M. (2019). Distintas acepciones para la idea de modelización en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 37(2), 5-24. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2648>
- Osborne, J. (2014). Teaching scientific practices: Meeting the challenge of change. *Journal of Science Teacher Education*, 25(2), 177-196. <https://doi.org/10.1007/s10972-014-9384-1>
- Parker, J. M., Anderson, C. W., Heidemann, M., Merrill, J., Merritt, B., Richmond, G., y Urban-Lurain, M. (2012). Exploring undergraduates' understanding of photosynthesis using diagnostic question clusters. *CBE—Life Sciences Education*, 11(1), 47-57. <https://doi.org/10.1187/cbe.11-07-0054>
- Parker, J. M., de los Santos, E. X., y Anderson, C. W. (2013). What learning progressions on carbon-transforming processes tell us about how students learn to use the laws of conservation of matter and energy. *Educación Química*, 24(4), 399-406. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(13\)72493-5](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(13)72493-5)
- Parker, J. M., Santos, E. X. de los, y Anderson, C. W. (2015). Learning progressions & climate change. *The American Biology Teacher*, 77(4), 232-238. <https://doi.org/10.1525/abt.2015.77.4.2>
- Pedrerá, O., Barrutia, O., y Díez, J. R. (2023). Teaching/learning difficulties of the Scientific Model of Plant Nutrition – a systematic literature review (2000-2022). [Manuscrito enviado para publicación]
- Roberts, D. A. (2007). Scientific Literacy/Science Literacy. En S. K. Abell y N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of Research on Science Education* (pp. 729-780). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Schramm, J. W., Jin, H., Keeling, E. G., Johnson, M., y Shin, H. J. (2018). Improved student reasoning about carbon-transforming processes through inquiry-based learning activities derived from an empirically validated learning progression. *Research in Science Education*, 48(5), 887-911. <https://doi.org/10.1007/s11165-016-9584-0>
- Stern, L., y Roseman, J. E. (2004). Can middle-school science textbooks help students learn important ideas? Findings from Project 2061's curriculum evaluation study: life science. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(6), 538-568. <https://doi.org/10.1002/tea.20019>
- Taber, K. S. (2000). Finding the optimum level of simplification: The case of teaching about heat and temperature. *Physics Education*, 35(5), 320-325. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/5/301>
- Taber, K. S., y Akpan, B. (2017). *Science education: An international course companion*. Sense Publishers.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G., y Mamiala, T. L. (2002). Students' understanding of the role of scientific models in learning science. *International Journal of Science Education*, 24(4), 357-368. <https://doi.org/10.1080/09500690110066485>
- Ummels, M. H. J., Kamp, M. J. A., De Kroon, H., y Boersma, K. Th. (2015). Promoting conceptual coherence within context-based biology education. *Science Education*, 99(5), 958-985. <https://doi.org/10.1002/sci.21179>
- Victorian Curriculum and Assessment Authority (VCAA). (2015). *Victorian curriculum: Foundation-10*. Victorian curriculum: Foundation-10. <https://victoriancurriculum.vcaa.vic.edu.au/>
- Vosniadou, S. (2019). The development of students' understanding of science. *Frontiers in Education*, 4(32). <https://doi.org/10.3389/educ.2019.00032>
- Wandersee, J. H. (1986). Can the history of science help science educators anticipate students' misconceptions? *Journal of Research in Science Teaching*, 23(7), 581-597. <https://doi.org/10.1002/tea.3660230703>
- Willard, T. (2020). *The NTSA atlas of the three dimensions*. National Science Teaching Association.
- Zuza, K., van Kampen, P., De Cock, M., Kelly, T., y Guisasola, J. (2018). Introductory university physics students' understanding of some key characteristics of classical theory of the electromagnetic field. *Physical Review Physics Education Research*, 14(2), 020117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.020117>

Información adicional

Para citar este artículo: Pedrera, O., Barrutia, O., y Díez, J. R. (2023) Modelo científico de la nutrición vegetal: análisis epistemológico y propuesta de progresión de aprendizaje. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 20(3), 3102. doi: 10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i3.3102