

Modelización en el aula de ciencias: objetivos, enfoques y prácticas

02.1 Revisión de alcance de la investigación actual sobre el Aprendizaje Basado en Modelización (MBL) en la educación científica



2025



Empowering Teachers for Science Learning
Through Modelling-Based Approaches

Proyecto Erasmus+ EMPOWER

CAPACITACIÓN DE LOS DOCENTES PARA EL APRENDIZAJE DE LAS CIENCIAS A TRAVÉS DE LA
MODELIZACIÓN

Tom Bielik (RU), Felicitas Haupts (IPN), Wouter van Joolingen (UU), Moritz Krell (IPN), Kim Krijtenburg-Lewerissa (UU), Kim Lobner (IPN), Víctor López Simo (UAB), Loucas Louca (EUC), Marios Papaevripidou (UCY), Kyriaki Vakkou (UCY).

Contenido.....	1
Introducción	1
Método.....	2
Resultados.....	3
Marcos teóricos del aprendizaje basado en la modelización	3
Responder a las necesidades pedagógicas de los estudiantes en materia de modelización	6
Ámbitos.....	11
Herramientas.....	17
Conclusión general y discusión.....	21
Referencias	23

Introducción

El presente informe tiene por objeto ofrecer una visión actualizada del estado de la investigación sobre el aprendizaje basado en la modelización (MbL, por sus siglas en inglés de “Modelling based Learning”), en lo que respecta a los enfoques utilizados, los temas tratados, las herramientas empleadas y las edades de los alumnos, así como a los resultados de aprendizaje esperados. La modelización como actividad de aprendizaje existe desde la década de 1980 (Gilbert y Justi, 2016), como lo ejemplifica el trabajo de Jon Ogborn (Ogborn y Wong, 1984) y otros. Desde entonces, el tema ha evolucionado significativamente, tanto en lo que respecta a los conocimientos teóricos sobre el papel de la modelización como al desarrollo de herramientas y prácticas (p. ej., Constantinou et al., 2019; Louca y Zacharia, 2012).

En este informe pretendemos resumir los avances más recientes en la investigación sobre el aprendizaje basado en la modelización (MbL). Nos centramos en varios aspectos: los objetivos de aprendizaje esperados y observados para el MbL, los enfoques (pedagógicos) utilizados en la implementación del MbL, las herramientas de modelización utilizadas y los ámbitos en los que se ha aplicado el MbL. Abordamos estas cuestiones en el contexto de la educación científica para edades comprendidas entre los 5 y los 15 años, el grupo de edad objetivo del proyecto Empower.

Para delimitar el proyecto, definimos primero los conceptos principales relacionados con el MbL, comenzando por el más básico: el concepto de *modelo*. Lo definimos como:

Un modelo es una herramienta representativa utilizada para comprender, predecir o explicar un fenómeno.

Esta definición es una descripción bastante general de lo que implican los modelos en el contexto de las actividades científicas: objetos, virtuales o concretos, que los científicos construyen para representar las cosas que estudian. Esto incluye maquetas, imágenes, representaciones esquemáticas, simulaciones por ordenador y mucho más. Lo importante es que los modelos tienen una función en la comprensión, la predicción y la explicación: a través del modelo somos capaces de hacer afirmaciones sobre el sistema representado. A partir de esta definición podemos avanzar hacia la definición de modelización científica:

La modelización científica es el proceso iterativo de construir, comparar, probar, revisar y utilizar modelos en el estudio de los fenómenos.

En esta definición, se añade la palabra «científico» para subrayar que la modelización es una actividad destinada a comprender más profundamente los fenómenos estudiados, es decir, la modelización es una actividad científica. Por último, debemos definir el aprendizaje basado en la modelización como:

El aprendizaje basado en la modelización es un enfoque de enseñanza y aprendizaje en el que los estudiantes participan en la modelización científica.

A partir de las tres definiciones en conjunto, deducimos que el aprendizaje basado en la modelización es una actividad de enseñanza y aprendizaje en la que los alumnos participan en un proceso de construcción, comparación, comprobación, revisión y uso de representaciones para comprender, predecir o explicar fenómenos. El objetivo del MBL suele incluir dos aspectos: el aprendizaje sobre los fenómenos objeto de estudio y el desarrollo de *la competencia en modelización*, que podemos definir como la capacidad de modelizar, así como una comprensión más profunda de los modelos, a menudo denominada «conocimiento de metamodelización». A continuación, trabajaremos para sentar unas bases sólidas para el concepto de competencia en modelización.

En consecuencia, esta revisión se centrará en las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Qué marcos de referencia para la competencia en modelización son relevantes y en qué se diferencian en cuanto al desarrollo entre los 5 y los 15 años?
2. ¿Qué intervenciones pedagógicas para el MBL se sugieren en la literatura para estudiantes de entre 5 y 15 años, y qué se sabe sobre su eficacia?
3. ¿Qué temas, contextos y fenómenos se utilizan en las actividades de MBL?
4. ¿Qué herramientas (herramientas de modelización específicas, herramientas genéricas y/o herramientas de IA) se indica que se utilizan como herramientas de modelización?

Método

Dado que el presente estudio es una revisión exploratoria centrada en los avances recientes, adoptamos un enfoque pragmático. Comenzamos resumiendo siete estudios de revisión recientes (Chang et al., 2024; Jin y Jian, 2024; Langbeheim y Bielik, 2025; Lobner et al., en proceso de publicación; Louca y Zacharia, 2012; Margolin et al., 2022; Nicolaou y Constantinou, 2014a) relevantes para nuestras preguntas de investigación. Estos resúmenes proporcionaron una base de referencia para este estudio. A continuación, buscamos bibliografía reciente de 2020 a 2025. Se ha elegido el periodo 2020-2025 ya que los estudios de revisión que utilizamos como base cubren hasta el año 2020. Para cada una de las preguntas de investigación, primero resumimos la investigación actual tal y como se deduce de los artículos de revisión y, a continuación, resumimos los resultados descritos en la bibliografía recuperada. Empleamos la siguiente cadena de búsqueda:

```
TS=(model-ba*)  
AND (TS=(learning) OR TS=(education))  
AND (TS=(Ciencias) OR TS=(Biología) OR TS=(Física) OR  
TS=(Química) OR TS=(Geo*))  
NOT (TS=(educación superior))  
NOT (TS=(aprendizaje automático) OR (TS=(aprendizaje  
profundo) OR TS=(robot*)))
```

Esta cadena de búsqueda arrojó 132 resultados en Web of Science. Redujimos este conjunto utilizando la función de selección que ofrece Web of Science para incluir únicamente los

artículos que abordaban temas educativos y excluir los modelos en el contexto de la IA. Finalmente, revisamos los resúmenes para seleccionar solo los artículos que trataban sobre la educación primaria y secundaria inferior, así como la formación del profesorado. Al final, obtuvimos 49 artículos en inglés. El procedimiento de búsqueda y selección posterior se repitió en bases de datos en alemán, lo que arrojó 2 artículos en alemán, así como en bases de datos en español (Enseñanza de las Ciencias y Eureka), lo que arrojó 16 artículos. Cada artículo se evaluó en función de su relevancia para cada una de las preguntas de investigación. No todos los artículos son relevantes para todas las preguntas de investigación.

Resultados

Marcos teóricos para la competencia en modelización

De los estudios de revisión que estudiamos como punto de partida, dedujimos que los modelos científicos (en adelante, «modelos») se definen como representaciones abstractas de fenómenos que se utilizan como medios para representar y comunicar ideas científicas, así como herramientas epistémicas empleadas para investigar y dar sentido a los fenómenos científicos (Gouvea y Passmore, 2017; Lobner et al., en proceso de publicación). La modelización científica (en adelante, «modelización») es el proceso iterativo de construir y utilizar modelos científicos. El aprendizaje basado en la modelización (MbL) se refiere a los enfoques pedagógicos utilizados para aprender con y sobre modelos científicos. Se trata de un proceso de múltiples fases en el que los estudiantes participan en la construcción y el uso de modelos (Louca y Zacharia, 2012; Margolin et al., 2022). Este proceso incluye la participación en prácticas como el desarrollo, la evaluación, la revisión, la comparación y el uso de modelos para explicar y predecir fenómenos (Schwarz et al., 2009). Gouvea y Passmore (2017) hicieron hincapié en la importancia de un agente cognitivo a la hora de desarrollar y utilizar modelos, pasando de la heurística del «modelo de» a la del «modelo para». Esta idea se manifiesta en los niveles del conocimiento de metamodelización (Upmeyer Zu Belzen et al., 2019), en los que el nivel I se refiere a los modelos como una réplica de fenómenos en la realidad y el nivel III se refiere a los modelos como herramientas epistémicas utilizadas para explicar y predecir fenómenos.

La educación científica tiene como objetivo apoyar la competencia en modelización de los estudiantes. Las definiciones de la competencia en modelización son diversas, y existen diferentes marcos de competencia en modelización en la literatura sobre educación científica. En términos generales, la competencia en modelización puede considerarse como «un sistema de conocimientos, habilidades y capacidades necesarias para participar en el proceso de desarrollo y uso de modelos para el razonamiento científico, incluyendo las disposiciones motivacionales para aplicar estas capacidades a la resolución de problemas en situaciones específicas» (Göhner et al., 2022, p. 4). La mayoría de las definiciones y marcos de la competencia en modelización se centran en tres dimensiones fundamentales: el

conocimiento de la metamodelización, las prácticas de modelización y el producto de la modelización.

El conocimiento de la metamodelización se refiere a las ideas epistémicas y la comprensión sobre los modelos y el proceso de modelización, es decir, el conocimiento declarativo sobre los modelos y la modelización (Chan et al., 2025). Nicolaou y Constantinou (2014a) sugieren que esto incluye el conocimiento de la metamodelización sobre la naturaleza de los modelos y el conocimiento sobre el proceso de modelización. Upmeier zu Belzen et al. (2019) describen cinco aspectos del conocimiento de la metamodelización: naturaleza de los modelos, modelos múltiples, finalidad de los modelos, prueba de modelos y modificación de modelos. También incluyen aspectos no cognitivos, como la motivación y la voluntad. Chiu y Lin (2019) sugieren que el conocimiento de la modelización incluye aspectos ontológicos, epistemológicos y metodológicos, junto con el conocimiento metacognitivo de los modelos y el modelado. Las prácticas de modelización se refieren a las actividades de modelización observables en las que participan los estudiantes. Nicolaou y Constantinou (2014a) sugieren que las prácticas de modelización incluyen prácticas como crear, utilizar, comparar, revisar y validar modelos. El producto de la modelización se refiere a la calidad y precisión de los artefactos de modelización resultantes (Chan et al., 2025; Chiu y Lin, 2019; Göhner et al., 2022).

En su revisión destinada a establecer una definición global de la competencia en modelización, Lobner et al. (en revisión) proponen un marco para la competencia en modelización compuesto por cuatro dimensiones: (1) disposiciones, que incluyen el metaconocimiento de la modelización, el conocimiento específico de la materia y las disposiciones no cognitivas, (2) habilidades específicas de la situación, (3) prácticas de modelización del rendimiento, y (4) producto de modelización.

Si bien se espera que todas las dimensiones de la metamodelización estén correlacionadas positivamente (Chiu y Lin, 2019; Schwarz et al., 2009), los pocos estudios empíricos que se propusieron explorar estas posibles correlaciones no encontraron suficiente evidencia para respaldar esta afirmación. Centrándose en los estudiantes, Schwarz y White (2005) concluyeron que un mayor conocimiento de la metamodelización puede contribuir a la implicación de los estudiantes en el proceso de modelización, sobre todo cuando se apoya en debates reflexivos explícitos. Sins et al. (2009) encontraron una correlación positiva entre las capacidades de procesamiento profundo de la modelización de los estudiantes y un alto nivel de comprensión epistémica de la modelización. Centrándose en los profesores de biología en formación, Göhner et al. (2022) encontraron solo una correlación débil entre la complejidad del proceso de modelización de los profesores y la calidad de sus productos de modelización, sin correlación con ninguna de las otras dimensiones de la modelización. Engelschalt et al. (2024) encontraron una correlación moderada entre el conocimiento de los profesores sobre la naturaleza iterativa del proceso de modelización y el conocimiento de metamodelización de los modelos como herramientas para predecir fenómenos. Por lo tanto, es necesario seguir evaluando empíricamente las relaciones entre las dimensiones de la competencia en modelización tanto con profesores como con estudiantes.

Existen varias limitaciones adicionales que se derivan de la bibliografía actual sobre MbL. Tal y como sugieren Lobner et al. (en proceso de publicación), la competencia en modelización presenta particularidades específicas de cada materia que deben tenerse en cuenta, y estas también deberían abarcar ámbitos más allá de las ciencias naturales. También cabe señalar que otros marcos de modelización se centran en términos alternativos, como habilidades, capacidades y prácticas, que se solapan con la mayoría de las dimensiones de la competencia en modelización, pero que pueden incluir aspectos adicionales. Además, los estudios empíricos sobre la competencia en modelización en alumnos de educación infantil y primaria están infrarrepresentados en la bibliografía.

De los 49 artículos en inglés recuperados de los últimos 5 años, 23 se consideraron relevantes para el tema de los marcos de modelización. De estos artículos surgieron varios temas relacionados con los principales marcos teóricos y definiciones utilizados en los estudios de investigación publicados en los últimos 5 años.

El marco más frecuente en la bibliografía identificada, utilizado en 11 de los 23 artículos (p. ej., Lacy et al., 2022; Peretz et al., 2023), es el marco de la práctica de modelización, que tiene su origen en el Marco para la Educación Científica K-12 (NGSS, 2012). El marco de la práctica de la modelización considera la modelización como una de las prácticas científicas y de ingeniería fundamentales que los estudiantes deben desarrollar, refiriéndose tanto a los conocimientos como a las habilidades para construir y utilizar modelos con el fin de dar sentido a los fenómenos.

En los artículos en español se observa una tendencia similar: de los 16 artículos analizados, 7 recurren explícitamente a las prácticas de modelización como marco teórico o didáctico principal (p. ej., Jiménez-Liso et al., 2021; Oliva et al., 2021), lo que supone una proporción comparable a la del corpus en inglés. Esta convergencia sugiere que las prácticas de modelización también se han convertido en un punto de referencia central en la investigación sobre la enseñanza de las ciencias en el ámbito hispanohablante, tanto para estructurar secuencias didácticas como para analizar la implicación de los alumnos en los procesos fundamentales de modelización.

El segundo marco más utilizado fue el de la indagación basada en modelos (MBI, por sus siglas en inglés de “Model-based inquiry”), que aparece en 7 de los 23 artículos identificados (p. ej., Campbell et al., 2025; Pedrera et al., 2025). Este marco, propuesto inicialmente por Windschitl et al. (2008), concibe el aprendizaje de las ciencias como un sistema de actividades de investigación y discurso que involucra a los estudiantes en un aprendizaje profundo de los contenidos. Esto se lleva a cabo mediante un proceso cíclico de construcción, comprobación, revisión y uso de modelos con el fin de desarrollar explicaciones basadas en la evidencia de fenómenos del mundo real. Según este marco, las ideas de los estudiantes, representadas en forma de modelos, son comprobables, revisables, explicativas, conjeturales y generativas. En el subconjunto en español, también encontramos 3 de los 16 estudios que adoptan explícitamente la indagación basada en la modelización, como Guimarães y Perticarrari (2025).

La competencia en modelización apareció en cinco de los 23 artículos analizados. Sin embargo, solo dos de estos trabajos (p. ej., Garrido y Couso, 2024) hicieron referencia al marco de competencia en modelización propuesto por Upmeyer zu Belzen et al. (2019), el cual integra aspectos relacionados con el conocimiento de metamodelización del alumnado, es decir, su comprensión sobre la naturaleza y la finalidad de los modelos científicos y de la modelización, junto con sus capacidades para participar en prácticas de modelización y para elaborar productos de modelización adecuados. Los otros tres artículos mencionaron la competencia en modelización de forma más general e inespecífica. En la revisión de literatura en lengua española, ningún estudio adoptó explícitamente este marco de competencia en modelización. Aunque algunos trabajos hacen referencia a habilidades de modelización o al uso de modelos, ninguno estructura sus análisis en torno al conocimiento de metamodelización, las prácticas de modelización o los productos de modelización en el sentido definido por este marco teórico. Esta ausencia sugiere que, en el contexto de la investigación en español, aún no existe una tradición sólida de conceptualizar las «competencias de modelización» como un constructo teórico diferenciado, en contraste con el uso más consolidado que se encuentra en la literatura internacional (principalmente anglófona y germanófona).

El aprendizaje basado en la modelización apareció en 4 de los 23 artículos en inglés (p. ej., Erumit y Yuksel, 2023), lo que incluye también el aprendizaje basado en la modelización sociocientífica (SIMBL, p. ej., Durak y Topçu, 2025), y también en cuatro de los 16 artículos en español (p. ej., Domènech-Casal, 2020). Las explicaciones basadas en modelos aparecieron en tres de los 23 artículos (p. ej., Lindgren et al., 2021), y el razonamiento basado en modelos se mencionó en dos artículos (p. ej., Lacy et al., 2022). Otros marcos que solo se abordaron una vez en la bibliografía identificada incluyeron marcos sobre modelos mentales, epistemología de los modelos, modelización conceptual, habilidades de modelización, enseñanza basada en la modelización y rendimiento en la modelización.

En la bibliografía identificada, los modelos se definen típicamente como representaciones de fenómenos del mundo real y de sistemas naturales, e incluyen componentes relevantes del fenómeno investigado, sus características y sus interacciones. En la mayor parte de la bibliografía identificada, los modelos se utilizan para describir y explicar los mecanismos y las relaciones causales del sistema, así como para realizar predicciones. Los modelos mentales se definen como modelos que se construyen en la mente de los individuos como resultado de procesos cognitivos. En la bibliografía identificada, la modelización se concibe generalmente como el proceso iterativo de desarrollar, evaluar, comparar, revisar y utilizar modelos para explicar y predecir fenómenos. En el contexto educativo, la modelización se percibe como una herramienta pedagógica esencial para el proceso de desarrollo del conocimiento científico.

Responder a las necesidades pedagógicas de los estudiantes en materia de modelización

En los estudios de revisión que utilizamos como referencia, los enfoques pedagógicos de la modelización suelen basarse en involucrar a los estudiantes en procesos reales de modelización, es decir, en la construcción, exploración y revisión de modelos. Muchos autores han abordado cómo introducir estas prácticas de modelización en la educación. Por ejemplo, Windschitl y sus colegas (2008) relacionan la práctica de la modelización con el razonamiento científico y las «conversaciones» relacionadas, resumidas como «¿Qué sabemos ya?», «Generar hipótesis», «Buscar pruebas» y «Construir un argumento». Bielik et al. (2022) definen varios aspectos que se centran más en la construcción del modelo en sí: definir límites, determinar componentes y límites, utilizar pruebas y razonamiento, e interpretar el comportamiento del modelo. En su búsqueda de apoyo para los docentes, Campbell et al. (2025) basan su herramienta de planificación didáctica en un esquema similar del proceso de modelización. Un intento de integrar estos y muchos otros enfoques es el ciclo de «Enseñanza-aprendizaje modelizador (IPM, por sus siglas en inglés de “Instruction performance modelling”）」 (Garrido y Couso, 2025). Una característica importante de este ciclo es que separa el rendimiento de la modelización de los alumnos y las fases de instrucción relacionadas (véase Figura 1).

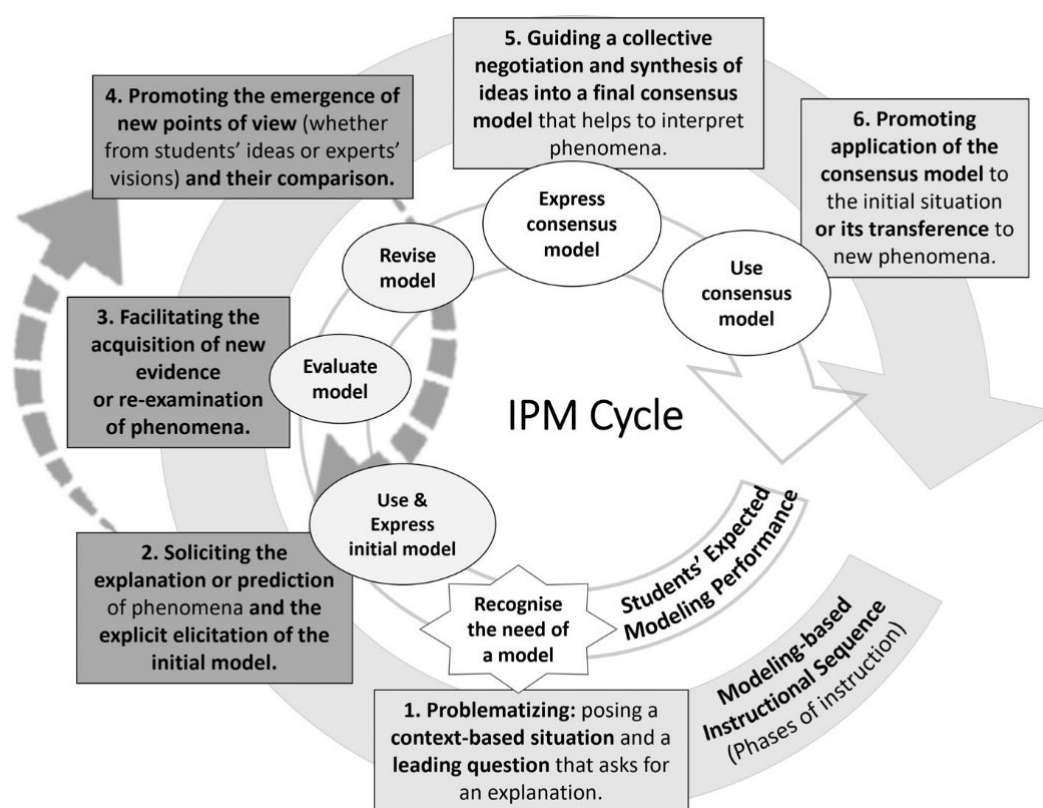


Figura1 El ciclo IPM tal y como lo describen Garrido y Couso (Garrido y Couso, 2025)

Al observar el ciclo, vemos efectivamente esta separación, aunque las fases de instrucción siguen imitando en gran medida a las fases de modelización. En el ciclo podemos distinguir tres fases principales, que podríamos denominar «Orientación», «Modelización» y «Aplicación», representadas en el ciclo IPM como las fases 1, 2-4 y 5-6. No obstante, estas fases de instrucción describen el proceso de modelización a un nivel abstracto, pero no aportan información sobre la intervención instructiva o pedagógica necesaria para respaldar estas fases del proceso de modelización.

Otra cuestión es que el hecho de que los alumnos realicen un proceso de modelización no significa automáticamente que vayan a adquirir conocimientos de (meta)modelización sobre ese proceso o sobre el papel de los modelos en la ciencia. La consecuencia es que, además de apoyar el proceso de modelización, también debemos apoyar un razonamiento más abstracto *sobre* los modelos y la modelización.

Esto significa que, al participar en el aprendizaje de la modelización o al aprender sobre los modelos y la modelización, los estudiantes se enfrentan a muchas preguntas y cuestiones diferentes antes, durante y después del proceso de modelización. En la siguiente tabla se presenta un inventario de dichas preguntas.

Tabla1 Preguntas relacionadas con el proceso de modelización, la competencia en modelización y la competencia en metamodelización

<i>Fase de modelización</i>	<i>Preguntas sobre modelos y modelización</i>	<i>Preguntas sobre metamodelado</i>
<i>Exploración del problema</i>	¿Cuál es el problema? ¿Qué sabemos ya?	¿Es adecuado para la modelización? ¿Qué supuestos hay que hacer? ¿Cuándo estaremos satisfechos con el modelo? ¿Cuál es el propósito del modelo?
<i>Crear el modelo</i>	¿Cuáles son los elementos, variables y parámetros relevantes? ¿Cómo se relacionan?	¿Qué aspectos deben modelarse y cuáles no? ¿En qué medida este modelo es una representación de la realidad?
<i>Probar el modelo</i>	¿Cómo comparamos el modelo con la realidad?	¿Qué constituye un buen modelo en este caso? ¿Qué criterios tenemos para nuestro modelo?
<i>Revisar el modelo</i>	¿Qué cambios son necesarios en el modelo? ¿Cómo se implementan los cambios?	¿Qué aspectos del modelo deben revisarse y por qué?
<i>Utilizar el modelo</i>	¿Qué predice el modelo sobre nuevas situaciones? ¿Cómo se deben configurar las variables o parámetros para obtener resultados útiles del modelo?	¿Cuáles son las limitaciones del modelo? ¿Puedo confiar en sus predicciones, basándome en los supuestos del modelo?

<i>Fase de modelización</i>	<i>Preguntas sobre modelos y modelización</i>	<i>Preguntas sobre metamodelado</i>
<i>Reflexionar sobre el modelo</i>	¿Sirve el modelo para nuestro propósito?	¿Existe consenso sobre el modelo? ¿Existen otros modelos posibles? ¿Cuáles serían sus ventajas e inconvenientes? ¿Es suficiente un solo modelo?
<i>Reflexión sobre el proceso de modelización</i>	¿Hemos dado los pasos necesarios para crear y evaluar un modelo satisfactorio?	¿Cuáles son las razones para confiar en un proceso de modelización?

Las «preguntas» anteriores ofrecen un panorama para describir a qué parte del proceso de modelización se puede dirigir el apoyo pedagógico. Las intervenciones resultantes pueden provenir del propio entorno de aprendizaje o estar dirigidas por el profesor. Estos enfoques de andamiaje se alinean con estudios anteriores sobre andamiaje para el aprendizaje basado en la indagación, por ejemplo, las cualificaciones de andamiaje de Quintana y Lazonder (Lazonder y Harmsen, 2016; Quintana et al., 2004). Los aspectos destacados que se encuentran en la bibliografía revisada aquí son *la modelización bifocal* (Blikstein, 2014), es decir, vincular los modelos directamente con el experimento; las progresiones que incluyen el dibujo, la modelización cualitativa y cuantitativa; la importancia de una representación y una visualización de alta calidad; y el uso de interfaces físicas para construir y explorar modelos, como la retroalimentación háptica y los objetos físicos con etiquetas RFID para construir modelos. Por último, recopilamos información, si la había, sobre la eficacia de la intervención pedagógica.

En los artículos revisados desde 2020, solo observamos apoyo al proceso de modelización, es decir, a la creación de modelos. No observamos intervenciones pedagógicas explícitas sobre el apoyo al razonamiento de metamodelización ni en la literatura inglesa ni en la española. Esto no significa que los estudios no contribuyan al desarrollo del conocimiento de metamodelización; se puede argumentar que participar en una actividad de modelización es esencial para el desarrollo de dicho conocimiento, pero no se encontraron medidas explícitas.

Las medidas que abordan la creación de modelos se centran en diversos aspectos del proceso de modelización. *La exploración del problema* se ha fomentado haciendo que los estudiantes crearan dibujos (Lindgren et al., 2021; Liu, 2021; Samarapungavan et al., 2023) y otras visualizaciones generadas por los estudiantes, como animaciones (Lin y Wu, 2021). Para *la creación del modelo*, Arik y Topçu (2022) proporcionan explicaciones explícitas sobre el formalismo de modelización.

Para *evaluar el modelo*, Bhattacharya et al. (2021) han utilizado indicaciones en forma de preguntas de apoyo para interpretar los datos. Además, se ha implementado como estrategia de apoyo el uso de experimentos reales y simulados para respaldar las predicciones y las observaciones (Bozzo et al., 2022). Esto se relaciona con la idea de la

modelización bifocal introducida por Blikstein (2014). La revisión del modelo es ratificada explícitamente por dos estudios. Bielik et al. utilizaron vídeos y experimentos como desencadenantes para ampliar el modelo más allá de su estado actual (Bielik et al., 2022) y Lucas et al. descubrieron que los estudiantes que revisaban sus modelos tras recibir indicaciones obtenían mejores puntuaciones en una prueba posterior (Lucas et al., 2022). En general, el corpus en español muestra un claro desequilibrio: todos los estudios hacen hincapié en la exploración del problema y la creación del modelo, mientras que son muchos menos los que incluyen fases sistemáticas de prueba y revisión de los modelos. Por último, varios estudios no respaldan las fases específicas del proceso de modelización, sino que estudian el proceso en su conjunto. Dos estudios basados en el ciclo IPM (véase Figura 1) descubrieron que apoyar a los alumnos para que sigan este ciclo les ayuda a aumentar el interés, la concentración y la satisfacción (Jiménez-Liso et al., 2022; Pedrera et al., 2025). Otro enfoque consiste en basar el proceso de modelización en argumentos y en la narración de historias. Lindgren et al. hicieron que los alumnos construyeran un argumento a partir de una pregunta inicial (¿por qué un estanque es verde en verano?) y pasaran de esta pregunta a una explicación del fenómeno basada en la modelización (Lindgren et al., 2021).

En resumen, vemos que los estudios tratan de apoyar el proceso de modelización en su conjunto o abordan partes específicas. No hay mucha evidencia empírica sobre los efectos del apoyo individual, pero varios estudios informan de un resultado globalmente positivo al participar en la modelización. Los aspectos más destacados que podemos extraer de los diversos enfoques son:

- **El uso de representaciones visuales y/o físicas, como dibujos, objetos manipulables o animaciones creadas por los usuarios, se ha utilizado en múltiples ocasiones, especialmente en las fases exploratorias del proceso de modelización.**
- **En la modelización computacional, es crucial aprender y utilizar el formalismo de modelización. Se necesita apoyo específico en este aspecto. Un posible apoyo puede encontrarse en las técnicas de modelización cualitativa que permiten la creación de modelos sin escribir código ni ecuaciones.**
- **Lo que parece faltar es un apoyo explícito a la metamodelización, es decir, la reflexión sobre la naturaleza de los modelos y su papel en la ciencia y más allá.**

Al interpretar todo esto, debemos tener en cuenta que esta revisión se refiere a intervenciones pedagógicas integradas en el entorno de aprendizaje. Esto significa que no se han tenido en cuenta las intervenciones puntuales del profesor. Oh y Oh (2011) revisaron la literatura internacional para delimitar lo que los profesores de ciencias necesitan saber sobre los modelos científicos (es decir, el conocimiento de los contenidos sobre los modelos científicos y la modelización).

Propusieron que los profesores deben comprender el significado de un modelo científico, los propósitos y usos de la modelización científica, la multiplicidad de modelos científicos y cualquier cambio que se produzca en ellos. En cuanto a la pedagogía para la enseñanza de los modelos científicos y la modelización, hicieron hincapié en que los profesores de ciencias

no solo deben adoptar un enfoque orientado al contenido de los modelos que se centre en la transmisión de dicho contenido, sino también enfoques orientados al pensamiento mediante modelos y a la producción de modelos, que involucren a los alumnos en la creación y el uso de modelos para explicar fenómenos científicos. También propusieron que los docentes desarrollaran cinco tipos de pedagogías de modelización, a saber: modelización exploratoria, expresiva, experimental (o de investigación), evaluativa y cíclica, tal y como se confirmó posteriormente en una revisión de 81 estudios empíricos realizada por Campbell et al. (2015).

Ámbitos

Las revisiones de literatura de referencia seleccionadas describen el aprendizaje basado en la modelización en la enseñanza de las ciencias. La física y la biología aparecen con mayor frecuencia en la bibliografía, mientras que la química y las ciencias de la Tierra o ambientales se tratan de forma menos extensa. En **física**, los ejemplos incluyen el movimiento y la aceleración, la fuerza y el movimiento, la difusión y la regulación de la temperatura en el interior de una casa. **La astronomía** aparece en trabajos sobre el sistema solar y conceptos astronómicos relacionados con el espacio. En **biología**, los estudios han abordado el crecimiento de las plantas, las estructuras celulares, los ecosistemas marinos y los ecosistemas fluviales. Los ejemplos **de química** incluyen estructuras moleculares y cromatografía, reacciones químicas y equilibrio químico. Los estudios **de ciencias de la Tierra y medioambientales** abarcan la tectónica de placas, los volcanes, los ecosistemas fluviales, el calentamiento global, el ciclo del agua a través de actividades de filtración y el desarrollo de modelos de calidad del agua. La tabla 1 ofrece una visión general de los temas descritos en las revisiones seleccionadas, junto con el grupo de edad aproximado al que va dirigida cada actividad de modelización. En esta tabla se enumeran las referencias secundarias a los artículos que se revisaron.

Tabla2 . Ámbitos cubiertos según los artículos de revisión de referencia (incluidas las referencias secundarias).

Disciplina	Tema	Grupo de edad	Referencia
<i>Física</i>	Movimiento y aceleración	11–12; 16–17	(Louca et al., 2011; Sins et al., 2009)
	Fuerza y movimiento	12–13	(Schwarz y White, 2005)
	Difusión	11–12	(Louca et al., 2011)
	Regulación de la temperatura en el interior de una vivienda	16–17	(Löhner et al., 2003)
	Sistema solar y astronomía espacial	18–22	(Barab et al., 2000; Hansen et al., 2004)
<i>Biología</i>	Crecimiento vegetal	14	(Ergazaki et al., 2007)
	Estructuras celulares	4–5	(Cruz-Guzmán et al., 2020)
	Ecosistemas marinos	10–11	(Papaevripidou et al., 2007)
	Ecosistemas fluviales	14–15; 21–23	(Crawford y Cullin, 2005; Stratford et al., 1998)
<i>Química</i>	Estructuras moleculares y	21–23	(Aalbergsjø y Sollid, 2021)

<i>Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente</i>	cromatografía		
	Reacciones químicas	17–18	(Dori y Kaberman, 2012)
	Equilibrio químico	14–15	(Maia y Justi, 2009)
	Tectónica de placas	12–17	(Gobert, 2000)
	Volcanes	12–13	(Pluta et al., 2011)
	Ecosistemas fluviales	14–15	(Stratford et al., 1998)
	Calentamiento global	16–17	(van Borkulo et al., 2012)
	Modelización de la calidad del agua	22–25	(Zhang et al., 2006)

Los artículos revisados de 2020-2025 abarcan la biología, la física, la química, las geociencias y las ciencias ambientales, entre otras. En biología, la modelización se centra en sistemas como el sistema digestivo, los ecosistemas y la biodiversidad. Las unidades de física se centran principalmente en fenómenos que no son directamente observables, como la energía, el sonido y la electrostática. La enseñanza de la química se centra en explicaciones a nivel de partículas, como el comportamiento de los gases, el calor y la presión. Las ciencias de la Tierra y las ciencias ambientales involucran a los estudiantes en la comprensión del cambio climático, la calidad del agua y los impactos humanos en los sistemas terrestres.

La tabla 2 anterior presenta una visión general de los ámbitos tratados en los artículos extraídos de los trabajos seleccionados. En comparación con la Tabla2 , pudimos incluir más información sobre el contexto en el que se abordaban los ámbitos, debido a que examinamos los artículos originales a los que se hacía referencia.

Tabla3 Resumen de disciplinas, temas, grupos de edad y contextos abordados en los artículos incluidos en la revisión.

Disciplina	Tema	Grupo de edad	Contexto	Referencia
<i>Biología</i>	Sistema digestivo	Educación secundaria	Modelización basada en el pensamiento computacional para comprender las interacciones complejas entre órganos. Se ajusta al enfoque del plan de estudios turco sobre los sistemas nutricionales.	(Arik y Topçu, 2022)
	Ecosistemas y biodiversidad	Grados 6-8	Unidad basada en el SSI centrada en un problema ecológico local («mariposa blanca»); uso del MBL dentro del plan de estudios de ciencias turco.	(Durak y Topçu, 2023)
	Ecología del agua, ecosistemas	5.º y 6.º	Unidad narrativa alineada con los NGSS sobre la proliferación de algas; investigaciones ecológicas a largo plazo realizadas en EE. UU.	(Lindgren et al., 2021)
	Sistema	Edades de 5 a	Diseñada siguiendo el	(De Alba



<i>Disciplina</i>	<i>Tema</i>	<i>Grupo de edad</i>	<i>Contexto</i>	<i>Referencia</i>
<i>Física</i>	cardiovascular (circulatorio)	6	Programa Preescolar Mexicano, la secuencia explora las venas, la función cardíaca, la circulación sanguínea y la termorregulación.	Villaseñor y Ramos de Robles, 2020)
	Células, tejidos y microorganismos	Edades de 10 a 13	Estudio en escuelas públicas chilenas centrado en la visualización de estructuras celulares, la microscopía y la representación de fenómenos biológicos microscópicos	(Rodríguez Mora y Blanco López, 2020)
	Ecología acuática y ecosistemas	7.º curso	Implementación en el aula real de una secuencia construida en torno a un problema medioambiental local (mortalidad masiva de peces y algas causada por el vertido de salmuera)	(Jiménez-Liso et al., 2021)
	Sistema inmunitario (antígenos, células de memoria, etc.)	Edades: 11-16	Implementado en una escuela municipal de Praia Grande (Brasil) durante la pandemia de COVID-19, explorando conceptos del sistema inmunitario y la vacunación	(Guimarães Siles y Peticarrari, 2025)
	Dinámica de los ecosistemas	10.º curso	Este estudio utiliza un entorno de hoja de cálculo (Calc/Excel) para construir y perfeccionar de forma iterativa modelos computacionales de la dinámica de los ecosistemas	(Domènech-Casal, 2020)
	Electrostática	Edades: 9-10	El papel de los experimentos prácticos y las simulaciones PhET en el desarrollo de un modelo y su relación con el mundo físico real. Una unidad de física de primaria alineada con el plan de estudios nacional de ciencias de Italia.	(Bozzo et al., 2022)
	Sonido	6.º curso	Comparación entre la indagación basada en modelos (MBI) y la MBI respaldada por la argumentación,	(Geçgil y Akçay, 2024)





Disciplina	Tema	Grupo de edad	Contexto	Referencia
Química			implementadas en escuelas públicas turcas.	
	Formas, transferencia y transformación de la energía	4.º y 5.º curso	Desarrollo y evaluación de la unidad «Focus on Energy», alineada con los NGSS, utilizando la MBI. Probada en escuelas de primaria superior de EE. UU.	(Geçgil y Akçay, 2024)
	Modelo de partículas de la materia	Infantil	Investigación sobre cómo el MbL mediado por la tecnología influye en el desarrollo de los modelos de la materia de los niños en EE. UU.	(Samarapungavan et al., 2023)
	Medición e incertidumbre	5.º curso	Una unidad que hace hincapié en la incertidumbre de la medición, la interpretación de los resultados y el razonamiento en su contexto de la vida real, en la asignatura de ciencias de primaria en China.	(Tang et al., 2024)
	Flotabilidad	1.º curso	Actividades basadas en la investigación que utilizan rutinas de predicción-observación-explicación y preguntas guiadas para explorar las causas de la flotabilidad.	(García-Rodeja et al., 2023)
	Disolución (gas en líquido)	Edades 13–14	Una secuencia de 14 actividades relacionadas con la teoría cinética molecular; implementadas en la enseñanza de ciencias de secundaria en España.	(Cañero-Arias et al., 2024)
	Flotabilidad, capacidad calorífica, presión de los líquidos	Grados 8-9	El efecto del MBI con apoyo de Virtual-lab. Las unidades didácticas se diseñaron conjuntamente con los profesores y se aplicaron en el plan de estudios de ciencias de la enseñanza secundaria de Taiwán.	(Chang et al., 2024)
	Ácidos y bases	Edades 13-14	Secuencia didáctica de MBI centrada en fomentar la participación de los alumnos. Implementada en escuelas rurales españolas	(Jiménez-Liso et al., 2022)





<i>Disciplina</i>	<i>Tema</i>	<i>Grupo de edad</i>	<i>Contexto</i>	<i>Referencia</i>
<i>Ciencias de la Tierra</i>			donde la química de ácidos y bases rara vez se imparte en este nivel.	
	Teoría cinética molecular, difusión, densidad, leyes de los gases	Grados 7-11	Comparación de MBL con modelos sonificados para alumnos ciegos y modelos visuales para alumnos videntes; implementado en Israel.	(Peleg et al., 2024)
	Fermentación	10.º curso	Utilizando un contexto de la vida real sobre alimentación y salud para explorar la fermentación y las reacciones químicas en España.	Muñoz-Campos et al., 2020
	Soluciones y métodos de separación	9.º y 10.º curso	Unidad de secundaria en España que examina el consumo de agua potable (del grifo frente a embotellada), la caracterización química del agua, la pureza, los métodos de separación, los impactos en la salud y las cuestiones medioambientales relacionadas con el uso masivo de agua embotellada.	(Rodríguez Mora y Blanco López, 2020)
	Cambio climático global, temperatura de la Tierra	9.º curso	Comparación de investigaciones sobre el clima de la Tierra basadas en modelos y no basadas en modelos. Se utilizaron simulaciones climáticas EzGCM para la modelización. Énfasis en la evidencia, el razonamiento sistémico y el impacto humano.	(Bhattacharya et al., 2021)
	Variación de la masa de la Tierra y transformaciones químicas	8.º y 9.º	Actividad de experimento mental realizada en colegios bilingües y de español que integra la Química y la Biología en un contexto de Ciencias de la Tierra para explorar la variación de la masa de la Tierra y las	(Oliva et al., 2021)



<i>Disciplina</i>	<i>Tema</i>	<i>Grupo de edad</i>	<i>Contexto</i>	<i>Referencia</i>
<i>Ciencias ambientales (interdisciplinar)</i>	Geología, espacio, contaminación atmosférica, salud humana	Cursos 1.º a 6.º	transformaciones químicas Análisis curricular del sistema de Educación Primaria español que pone de relieve la marginación de los contenidos de Ciencias de la Tierra al incluirlos dentro de las Ciencias Sociales en lugar de las Ciencias Naturales	(Achurra et al., 2022)
	Geodinámica externa y patrimonio geológico	9.º curso	Secuencia didáctica sobre prácticas científicas y cuestiones sociocientíficas relacionadas con el patrimonio geológico de España, centrada en la geodinámica externa y la formación del paisaje	(Paz Otero y Puig, 2020)
	Efecto invernadero, huella ecológica, energía, combustibles fósiles, deforestación	8.º curso	Una unidad que combina SSI, modelización científica y pensamiento sistémico, basada en el marco SIMBL. Implementada en Turquía.	(Durak y Topcu, 2023)
	Calidad y depuración del agua	8.º curso	Enseñanza basada en SIMBL centrada en el razonamiento basado en la evidencia en las clases de ciencias de secundaria en China.	(Jia y Ren, 2025)

A partir de la Tabla2 y la Tabla3 , podemos observar que el aprendizaje basado en la modelización se utiliza principalmente con contenidos que implican fenómenos dinámicos y, a menudo, invisibles, en los que la comprensión depende de la representación de interacciones, mecanismos y cambios a lo largo del tiempo. Las cuestiones sociocientíficas ocupan un lugar destacado, situando el aprendizaje en contextos del mundo real que exigen a los estudiantes evaluar pruebas, considerar múltiples perspectivas y razonar sobre las interacciones entre el ser humano y el medio ambiente. En conjunto, estos estudios muestran que el aprendizaje basado en la modelización se aplica a contenidos en los que el razonamiento a nivel de sistema, la comprensión causal y el compromiso con cuestiones sociales son fundamentales para los fenómenos objeto de investigación.

Herramientas

La investigación sobre el aprendizaje basado en la modelización muestra una diversidad de herramientas y enfoques utilizados para desarrollar la competencia de los estudiantes en

materia de modelización. Una distinción importante es la que existe entre las herramientas no informáticas y las herramientas informáticas. Para ambos casos por separado, creamos una tipología basada en las revisiones de referencia e investigamos el uso y la aplicación de las herramientas en los artículos recuperados de nuestra búsqueda.

Herramientas de modelización no informáticas

Chan *et al.* (2025) y Margolin *et al.* (2022) describen varias herramientas de modelización no informáticas utilizadas en la formación del profesorado de ciencias. Se utilizaron **modelos físicos**, como maquetas, pasta y montajes con ventiladores, para representar estructuras moleculares y procesos de cromatografía (Aalbergsjø & Sollid, 2021; Cruz-Guzmán *et al.*, 2020). Se utilizaron **dibujos, diagramas y mapas conceptuales** para externalizar y revisar modelos mentales (Cruz-Guzmán *et al.*, 2023; Nelson & Davis, 2012; Torres & Vasconcelos, 2016, 2021; Valanides & Angeli, 2008). Se utilizaron **materiales manipulativos**, como M&M's y ositos de goma, como análogos de las células y los tipos de modelos, lo que facilitó la crítica y la exploración lúdica (Everett *et al.*, 2009). Se utilizaron **actividades prácticas, experimentos sencillos y montajes de caja negra** con cuerdas y tubos para evaluar los modelos (Aalbergsjø y Sollid, 2021; Crawford y Cullin, 2005; Jiménez-Liso *et al.*, 2022). Se mencionaron **actividades corporales y juegos de rol** (Enyedy *et al.*, 2012; Schwarz *et al.*, 2022), así como el uso de **la realidad aumentada y la retroalimentación háptica**. En los artículos recientes revisados, también observamos el uso de dibujos, así como de actividades prácticas, por ejemplo, en forma de cubos de energía.

En la revisión en español, encontramos un conjunto similar de herramientas de modelización no informáticas. Los dibujos y diagramas se utilizan habitualmente para exteriorizar y perfeccionar las explicaciones de los estudiantes (Jiménez-Liso *et al.*, 2021; Muñoz Campos *et al.*, 2020; Paz Otero y Puig, 2020). Las actividades prácticas de laboratorio también aparecen con frecuencia, apoyando la exploración de la flotabilidad, los procesos celulares, los cambios químicos o la química del agua (García-Rodeja *et al.*, 2023; Grimalt-Álvaro *et al.*, 2021; Muñoz Campos *et al.*, 2020; Rodríguez Mora y Blanco López, 2020). Sin embargo, muchos estudios se basan además únicamente en «trabajo con lápiz y papel» para redactar y perfeccionar modelos y explicaciones (García-Rodeja *et al.*, 2023; Guimarães Siles y Perticarrari, 2025; Muñoz Campos *et al.*, 2020; Oliva *et al.*, 2021; Rodríguez Mora y Blanco López, 2020). Por el contrario, no encontramos ejemplos de actividades de caja negra, juegos de rol o modelado encarnado, realidad aumentada o herramientas de retroalimentación háptica en el corpus español.

Herramientas de modelización por ordenador

Nicolaou y Constantinou (2014b) clasificaron los ejemplos de la bibliografía según las categorías propuestas por Löhner (Löhner *et al.*, 2005). Löhner distingue entre **herramientas de modelización de sistemas** —incluidas las herramientas orientadas a ecuaciones y las orientadas a diagramas o estructuras— y **herramientas basadas en fenómenos emergentes**, que se centran en las interacciones entre unidades discretas.

- Las herramientas orientadas a ecuaciones incluyen entornos de programación que requieren codificación (LOGO, Boxer) y herramientas basadas en ecuaciones que no requieren programación (DMS, Modellus, Dynamo).
- Las herramientas orientadas a diagramas/estructuras pueden ser cuantitativas (Stella, Powersim, Dynasim, Vensim, Functional Blocks) o semicuantitativas (IQON, VISQ, LinkIt, ModellIt).
- Las herramientas basadas en la emergencia incluyen herramientas basadas en objetos (StarLogo, OOTL) y autómatas celulares (AgentSheets, Stagecast Creator).

Algunas herramientas de los estudios revisados no encajan perfectamente en la taxonomía de Löhner. Las herramientas basadas en Colab combinan elementos diagramáticos (simulación) y orientados a ecuaciones (texto), mientras que Microworlds LOGO funciona tanto como un entorno de programación orientado a ecuaciones como, en algunos casos, una plataforma basada en agentes.

Langbeheim y Bielik (2025) distinguen entre **modelos basados en restricciones** (“constraint-based models” en inglés) y **modelos basados en agentes** (“agent-based models” en inglés). Los modelos basados en restricciones se centran en el sistema en su conjunto, mientras que los modelos basados en agentes se centran en las representaciones de los componentes o entidades de un sistema. **Los modelos de dinámica de sistemas** (“system dynamics models”, en inglés), la forma principal de los modelos basados en restricciones, utilizan ecuaciones diferenciales para describir cómo cambian las variables del sistema a lo largo del tiempo y permiten ajustar estas variables para ver los efectos en todo el sistema.

Algunos ejemplos de herramientas de modelización computacional para modelos basados en restricciones son, por ejemplo, Model-it, Stella y SageModeler. Los modelos basados en agentes pueden construirse en entornos de programación genéricos como Boxer (DiSessa et al., 1991), Scratch (Resnick et al., 2009) y Logo (Papert, 1980). Se pueden crear modelos más complejos con muchos agentes en NetLogo (Wilensky y Reisman, 2006) y StarLogo (Han y Uhm, 2024; Pierson y Brady, 2020).

Aparte de las herramientas diseñadas para permitir la modelización general, existen herramientas dedicadas a la modelización de dominios específicos, como los sistemas de partículas o los modelos de respiración celular¹. Dichas herramientas están limitadas a su dominio específico, pero pueden ser más avanzadas en el sentido de que el comportamiento común para un dominio específico puede integrarse en la herramienta. En los artículos recientes recopilados para la revisión, observamos que 13 utilizan una herramienta de modelización computacional, de los cuales ocho utilizan herramientas de modelización genéricas y cinco se basan en herramientas específicas de un dominio. La siguiente tabla ofrece una visión general de estas herramientas.

Tabla4 Resumen de las herramientas de modelización encontradas en los artículos revisados

¹ <https://cellcollective.org/>

Tipo de herramienta	Nivel educativo	Ámbito de estudio	Tema de estudio	Referencia
<i>Dinámica de sistemas</i>	Educación secundaria inferior	Ciencias de la Tierra	Cambio climático global, temperatura de la Tierra	(Bhattacharya et al., 2021)
	Universidad	Medio ambiente, Biología	Fomento del pensamiento sistémico y la adopción de perspectivas a través del aprendizaje basado en la modelización.	(Jordan et al., 2023)
	Universidad	Química	Razonamiento basado en modelos en química	(Khan, 2025)
<i>Modelos basados en ecuaciones</i>	Universidad	Otros	Proyectos de modelización computacional y simulación con andamiaje en la ingeniería de grado.	(Magana et al., 2024)
	Universidad	Biología	Dinámica del sistema de respiración celular	(Lucas et al., 2022)
<i>Modelos basados en agentes</i>	Ciclo de ESO	Física	Teoría cinética molecular y leyes de los gases	(Peleg et al., 2024)
	Universidad	Otros	Evaluación del diseño de software mediante diagramas UML	(Prasad e Iyer, 2022)
	Universidad	Otros	Formación del profesorado de ciencias. Creación de simulaciones científicas mediante programación y comprensión epistemológica de los modelos.	(L. Vasconcelos y Kim, 2022)
<i>Herramientas de modelización específicas</i>	Educación preescolar	Física	Estados de la materia y cambios de fase (naturaleza	(Samarapungavan et al., 2023)

<i>Tipo de herramienta de cada ámbito</i>	Nivel educativo	Ámbito de estudio	Tema de estudio	Referencia
			corpuscular de la materia)	
	Primaria superior	Física	Interacciones electrostáticas	(Bozzo et al., 2022)
	Secundaria superior	Física	Flotabilidad, capacidad calorífica y presión en un líquido	(Chang et al., 2024)
	Bachillerato	Química	Electroquímica (células electroquímicas, electrólisis, galvanoplastia).	(Lin y Wu, 2021)
	Universidad	Transversal	Pensamiento sistémico y modelización conceptual (OPM/OPCloud) en contextos interdisciplinarios	(Peretz et al., 2023)

De la tabla se desprende que las herramientas genéricas se utilizan principalmente en la educación secundaria superior y universitaria, mientras que las herramientas empleadas en la educación primaria y secundaria inferior suelen ser específicas de cada ámbito en los estudios que forman parte de la presente revisión. Esto podría indicar que las herramientas genéricas pueden requerir habilidades que están fuera del alcance de los niños más pequeños. La bibliografía actual muestra algunos ejemplos que pueden servir de guía para hacer que las herramientas de modelización genéricas sean accesibles a los niños más pequeños. Un ejemplo es el uso de técnicas basadas en IA para convertir mapas conceptuales cualitativos en modelos computacionales, tal y como hace el sistema MentalModeler (Jordan et al., 2023). Otros ejemplos incluyen la inclusión de elementos específicos de cada ámbito y técnicas de modelización cualitativas y semicuantitativas en herramientas de modelización dinámica de sistemas, como hace SageModeler (Damelin et al., 2017).

En contraste con lo anterior, en la revisión en lengua española el uso de herramientas de modelización informáticas es mucho más limitado que en el corpus internacional. Solo un estudio incorpora entornos de modelización digital: una simulación basada en hojas de cálculo para la dinámica de ecosistemas (Domènech-Casal, 2020). Las herramientas de modelización de uso general (por ejemplo, entornos de dinámica de sistemas o basados en agentes) están prácticamente ausentes del conjunto de datos español, lo que sugiere que la modelización computacional en esta bibliografía sigue estando estrechamente vinculada a contextos disciplinarios concretos, más que a formalismos de modelización genéricos.

Conclusión general y discusión

En cuanto a la primera pregunta de investigación, observamos que predominan tres marcos: el marco de la práctica de la modelización (NGSS, 2012), el marco de la indagación basada en modelos (Windschitl et al., 2008) y el marco de la competencia en modelización (Upmeier Zu Belzen et al., 2019). Las cuestiones más destacadas son los componentes de la competencia en modelización, tales como el conocimiento de la metamodelización, la práctica de la modelización, los elementos específicos del dominio de la competencia en modelización y los aspectos relacionados con la actitud y la motivación. La bibliografía ofrece información sobre estos aspectos como aportación para un marco que se utilizará en el proyecto EMPOWER.

En cuanto a la segunda pregunta de investigación, en primer lugar vemos la necesidad de una elaboración de los procesos de modelización (para ser más explícitos sobre cómo podemos configurar el apoyo pedagógico para los estudiantes que participan en el aprendizaje basado en la modelización). En la bibliografía existen diversas versiones de un ciclo de modelización, con el ciclo IPM como una incorporación reciente. Si bien los ciclos son medios atractivos para representar procesos, debemos ser conscientes de que, en la práctica, los procesos pueden ser menos ordenados y menos estructurados. Por lo tanto, podría ser mejor centrarse en los procesos de modelización individuales (pasos del ciclo de modelización) y en el tipo de apoyo necesario para cada uno de estos pasos. En Tabla 1 presentamos este enfoque en forma de una serie de preguntas para proporcionar apoyo en cada una de las fases. Una característica principal de esta tabla es la atención prestada tanto al proceso de modelización como a los aspectos de metamodelización. Los artículos revisados proporcionan varios ejemplos de medios para apoyar diversos aspectos del proceso de modelización. Las principales conclusiones son:

- El uso de representaciones visuales y/o físicas, como dibujos, objetos manipulables o animaciones creadas por el usuario, se ha empleado en múltiples ocasiones, especialmente en las fases exploratorias del proceso de modelización.
- En la modelización computacional, es fundamental aprender y utilizar el formalismo de la modelización. Se necesita apoyo específico en este aspecto. Un posible apoyo puede encontrarse en las técnicas de modelización cualitativas que permiten la creación de modelos sin escribir código ni ecuaciones.
- Lo que parece faltar es un apoyo explícito a la metamodelización, es decir, a la reflexión sobre la naturaleza de los modelos y su papel en la ciencia y más allá.

Como se observa en el corpus completo de artículos, incluidos los artículos en español y alemán, diversos estudios proporcionan andamiajes para la creación de modelos, con tareas prácticas contextualizadas (por ejemplo, ósmosis, flotabilidad, química del agua potable), mientras que solo unos pocos estudios proponen explícitamente andamiajes para la comprobación y revisión de modelos. En todos los estudios se hace hincapié en «Explorar» y «Crear», pero hay muchos menos casos de «Probar», «Revisar» y «Utilizar» modelos.

En relación con los ámbitos, objeto de la tercera pregunta de investigación, observamos una variedad de temas repartidos por las ciencias naturales. Una tendencia visible es la creciente atención prestada a cuestiones sociocientíficas, como la modelización climática, lo que traslada la modelización de algo «interno» de la ciencia a una competencia relevante para todos. También se observa que la modelización se aplica a todas las edades, incluyendo la franja de 5 a 15 años, que es el grupo de edad objetivo del presente proyecto. Los estudios en español se anclan igualmente en contextos socioambientales auténticos (p. ej., gestión costera, consumo de agua embotellada, vacunación contra la COVID-19), que desencadenan de manera fiable la construcción de modelos, pero a menudo mantienen la modelización ligada a contenidos disciplinarios en lugar de a formalismos de modelización transferibles. Por último, en cuanto a la cuarta pregunta de investigación, observamos que el MBL puede apoyarse en herramientas no informáticas, como objetos físicos, dibujos y actividades corporizadas, así como en herramientas informáticas. En estas últimas categorías vemos una abundancia de enfoques tradicionales, dinámica de sistemas, ecuaciones y modelos basados en agentes, así como herramientas de modelización específicas de cada dominio. Considerando las conclusiones en conjunto, observamos una tendencia creciente a intentar comprender la competencia en modelización en términos de marcos teóricos en desarrollo, pero al mismo tiempo se observa una falta de apoyo pedagógico para los aspectos de orden superior de dichas competencias en modelización. Sin embargo, para el grupo de edad más joven al que se dirige el proyecto EMPOWER, aún no hemos visto cómo se desarrolla la competencia en modelización con la edad. Al mismo tiempo, al analizar los ámbitos en los que se utilizan con frecuencia actividades docentes basadas en la modelización, la metamodelización es importante, ya que dichos ámbitos suelen incluir sistemas que no son directamente visibles, lo que significa que es fundamental comprender el modelo como un sistema representacional. Por último, observamos que las herramientas de modelización genéricas se asocian más con edades superiores a los 15 años, edad superior a la de nuestro grupo destinatario. Esto plantea la cuestión de si estas herramientas son realmente útiles para la población destinataria del proyecto y de qué manera lo son.

Referencias

- Aalbergstjø, S. G., & Sollid, P. Ø. (2021). Learning through modelling in science: Reflections by pre-service teachers.
- Achurra, A., Berreteaga, A., & Zamalloa, T. (2022). La desnaturalización de las Ciencias de la Tierra en el currículo LOMCE de Educación Primaria: Un análisis curricular desde la perspectiva de la práctica científica. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 20(1), 1303. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i1.1303
- Arik, M., & Topçu, M. (2022). Computational Thinking Integration into Science Classrooms: Example of Digestive System. *Journal of science education and technology*, 31(1), 99–115. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09934-z>
- Barab, S. A., Hay, K. E., Barnett, M., & Keating, T. (2000). Virtual solar system project: Building understanding through model building. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(7), 719–756.

- Bhattacharya, D., Steward, K., & Forbes, C. (2021). Climate education in secondary science: Comparison of model-based and non-model-based investigations of Earth's climate. *International journal of science education*, 43(13), 2226–2249. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1958022>
- Bielik, T., Stephens, L., McIntyre, C., Damelin, D., & Krajcik, J. S. (2022). Supporting Student System Modelling Practice Through Curriculum and Technology Design. *Journal of Science Education and Technology*, 31(2), 217–231. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09943-y>
- Blikstein, P. (2014). Bifocal Modeling: Promoting Authentic Scientific Inquiry Through Exploring and Comparing Real and Ideal Systems Linked in Real-Time. *Gaming Media and Social Effects*, (Chapter 15), 317–352.
- Bozzo, G., Lopez, V., Couso, D., & Monti, F. (2022). Combining real and virtual activities about electrostatic interactions in primary school. *International journal of science education*, 44(18), 2704–2723. <https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2149284>
- Campbell, T., Gray, R., Bai, Y., & Chase, S. (2025). The Iterative Design of a Model-Based Inquiry Unit Planning Tool for Preservice Science Teachers. *Journal of science teacher education*, 36(6), 732–757. <https://doi.org/10.1080/1046560X.2024.2449289>
- Campbell, T., Oh, P. S., Maughn, M., Kiriazis, N., & Zuwallack, R. (2015). A Review of Modeling Pedagogies: Pedagogical Functions, Discursive Acts, and Technology in Modeling Instruction. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 11(1), 159–176. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2015.1314a>
- Cañero-Arias, J., Blanco-López, A., & Oliva, J. (2024). Model-based analysis of the impact of a teaching-learning sequence about carbonated drinks on students' understanding of the dissolution of gases in liquids. *International journal of science education*, 46(17), 1848–1878. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2300772>
- Chan, K. K. H., Lau, D. S. P., & Van Driel, J. (2025). Different Designs, Different Outcomes? A Critical Systematic Review of Interventions for Preparing Preservice Science Teachers to Teach Scientific Models and Modeling. *Science Education*, 109(2), 386–428. <https://doi.org/10.1002/sce.21911>
- Chang, H., Liu, C., Wen, C., Chang, M., Chiang, S., & Hwang, F. (2024). The effect of the cyclic curricular design of modelling-based instruction with virtual labs. *International journal of science education*, 46(1), 46–72. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2219365>
- Chiu, M.-H., & Lin, J.-W. (2019). Modeling competence in science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1(1), 12–12. <https://doi.org/10.1186/s43031-019-0012-y>
- Constantinou, C. P., Nicolaou, C. Th., & Papaevripidou, M. (2019). A Framework for Modeling-Based Learning, Teaching, and Assessment. In A. Upmeyer zu Belzen, D. Krüger, & J. van Driel (Eds.), *Towards a Competence-Based View on Models and Modeling in Science Education* (pp. 39–58). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30255-9_3
- Crawford, B., & Cullin, M. (2005). Dynamic assessments of preservice teachers' knowledge of models and modelling. In *Research and the Quality of Science Education*. https://doi.org/10.1007/1-4020-3673-6_25
- Cruz-Guzmán, M., García-Carmona, A., & Criado, A. M. (2020). Analysis of the models proposed by prospective pre-primary teachers when studying water. *International Journal of Science Education*, 42(17), 2876–2897. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1841327>
- Cruz-Guzmán, M., García-Carmona, A., & Criado, A. M. (2023). “Teach Your Classmates About the Behavior of Water with School-Level Science Models”: An Experience in Initial Preschool Teacher Education. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 23(2), 262–281. <https://doi.org/10.1007/s42330-023-00283-0>
- Damelin, D., S. Krajcik, J., McIntyre, C., & Bielik, T. (2017). Integrating Technology: Students Making System Models. *Science Scope*, 40(5), 78–83. https://doi.org/10.2505/4/ss17_040_05_78

- De Alba Villaseñor, V., & Ramos de Robles, S. L. (2020). Modelización científica escolar para explorar el sistema circulatorio en Educación Infantil. *Enseñanza de Las Ciencias*, 38(1), 105–125.
- DiSessa, A. A., Abelson, H., & Ploger, D. (1991). An Overview of Boxer. *Journal of Mathematical Behavior*, 10, 3–15.
- Domènech-Casal, J. (2020). Diseñando un simulador de ecosistemas. Una experiencia STEM de enseñanza de dinámica de los ecosistemas, funciones matemáticas y programación. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 17(3), 3202. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3202
- Dori, Y. J., & Kaberman, Z. (2012). Assessing high school chemistry students' modeling sub-skills in a computerized molecular modeling learning environment. *Instructional Science*, 40(1), 69–91.
- Durak, B., & Topcu, M. (2023). Integrating socioscientific issues and model-based learning to decide on a local issue: The white butterfly unit. *Science activities-projects and curriculum ideas in stem classrooms*, 60(2), 90–105. <https://doi.org/10.1080/00368121.2023.2179967>
- Durak, B., & Topçu, M. (2025). Exploring Teachers' Professional Development on Socioscientific Issues and Model-Based Learning: A Multiple Case Study. *Science & education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-025-00628-1>
- Engelschalt, P., Bielik, T., Krell, M., Krüger, D., & zu Belzen, A. U. (2024). Investigating pre-service science teachers' metaknowledge about the modelling process and its relation to metaknowledge about models. *International Journal of Science Education*, 46(7), 691–714. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2253368>
- Enyedy, N., Danish, J. A., Delacruz, G., & Kumar, M. (2012). Learning physics through play in an augmented reality environment. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 7(3), 347–378. <https://doi.org/10.1007/s11412-012-9150-3>
- Ergazaki, M., Zogza, V., & Komis, V. (2007). Analysing students' shared activity while modeling a biological process in a computer-supported educational environment. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(2), 158–168.
- Erumit, B., & Yuksel, T. (2023). Developing and Using Physical Dynamic Models On Socioscientific Issues to Present Nature Of Science Ideas. *International journal of science and mathematics education*, 21(4), 1031–1056. <https://doi.org/10.1007/s10763-022-10296-0>
- Everett, S. A., Otto, C. A., & Luera, G. R. (2009). Preservice elementary teachers' growth in knowledge of models in a science capstone course. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 7(6), 1201–1225. <https://doi.org/10.1007/s10763-009-9158-y>
- García-Rodeja, I., Rodríguez Rouco, E. V., Lorenzo Flores, M., & Sesto Varela, V. (2023). Construyendo modelos precursores sobre la flotabilidad de objetos macizos a los seis años. *Enseñanza de Las Ciencias*, 41(2), 137–154.
- Garrido, A., & Couso, D. (2025). The IPM cycle: An instructional tool for promoting students' engagement in modeling practices and construction of models. *Journal of Research in Science Teaching*, 62(2), 391–425. <https://doi.org/10.1002/tea.21979>
- Geçgil, T., & Akçay, H. (2024). Investigating the Effects of Different Model Based Inquiries on Students' Science Achievement, Scientific Process Skills and Motivation. *International journal of education in mathematics science and technology*, 12(3). <https://doi.org/10.46328/ijemst.3997>
- Gilbert, J. K., & Justi, R. (2016). The Contribution of Visualisation to Modelling-Based Teaching. In *Models and Modeling in Science Education Modelling-based Teaching in Science Education* (9th ed., pp. 121–148). Springer International Publishing Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29039-3_7
- Gobert, J. D. (2000). A typology of causal models for plate tectonics: Inferential power and barriers to understanding. *International Journal of Science Education*, 22, 937–977.
- Göhner, M. F., Bielik, T., & Krell, M. (2022). Investigating the dimensions of modeling competence among preservice science teachers: Meta-modeling knowledge, modeling practice, and

- modeling product. *Journal of Research in Science Teaching*, 59(8), 1354–1387.
<https://doi.org/10.1002/tea.21759>
- Gouvea, J., & Passmore, C. (2017). ‘Models of’ versus ‘Models for.’ *Science & Education*, 26(1), 49–63. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9884-4>
- Grimalt-Álvaro, C., Ortega Torres, E., Couso Lagarón, D., & Paloma Romeu, L. (2021). Influencia en la autoeficacia del grado de autenticidad de la indagación de dos proyectos de ciencia de secundaria: Estudio de caso. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 18(2), 2101. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i2.2101
- Guimarães Siles, C., & Peticarrari, A. (2025). El uso de modelos en la enseñanza investigativa para promover la participación activa de los alumnos de la educación primaria. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 23(1), 1102.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2026.v23.i1.1102
- Han, M., & Uhm, J. (2024). Enhancing Students’ Emotional, Epistemic, and Conceptual Aspects in Scientific Practice through Computational Modeling on a Food Web. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 22(S1), 145–165. <https://doi.org/10.1007/s10763-024-10509-8>
- Hansen, J. A., Barnett, M., MaKinster, J. G., & Keating, T. (2004). The impact of three-dimensional computational modeling on student understanding of astronomical concepts: A quantitative analysis. *International Journal of Science Education*, 26(11), 1365–1378.
<https://doi.org/10.1080/09500690420001673757>
- Jia, S., & Ren, S. (2025). The Significance of Science Content Knowledge for Socioscientific Reasoning Competency: Evidence from SSI Instruction on Environmental Topics Based on the SIMBL Model. *Science & education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-025-00645-0>
- Jimenez-Liso, M., Bellocchi, A., Martinez-Chico, M., & Lopez-Gay, R. (2022). A Model-Based Inquiry Sequence as a Heuristic to Evaluate Students’ Emotional, Behavioural, and Cognitive Engagement. *Research in science education*, 52(4), 1313–1334.
<https://doi.org/10.1007/s11165-021-10010-0>
- Jiménez-Liso, M. R., Delgado, L., Castillo-Hernández, F. J., & Baños-González, I. (2021). Contexto, indagación y modelización para movilizar explicaciones del alumnado de secundaria. *Enseñanza de Las Ciencias*, 39(1), 5–25.
- Jin, D., & Jian, M. (2024). Research hotspots and development trends of model and modelling education research: Bibliometric analysis based on CiteSpace. *Heliyon*, 10(11), e32590.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32590>
- Jordan, R., Gray, S., Boyse-Peacor, A., Sorensen, A., Frantz, C., Jauernig, J., Brehm, P., Shammin, M., & Petersen, J. (2023). Promoting systems thinking through perspective taking when using an online modeling tool. *Frontiers in education*, 8. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1215436>
- Khan, S. (2025). Reasoning in chemistry teacher education. *Chemistry teacher international*, 7(2), 345–357. <https://doi.org/10.1515/cti-2024-0099>
- Lacy, S., Tobin, R., Crissman, S., DeWater, L., Gray, K., Haddad, N., Hammerman, J., & Seeley, L. (2022). Telling the energy story: Design and results of a new curriculum for energy in upper elementary school. *SCIENCE EDUCATION*, 106(1), 27–56. <https://doi.org/10.1002/sce.21684>
- Langbeheim, E., & Bielik, T. (2025). Student engagement in constructing computer models in K-12 science education: A systematic review. *Studies in Science Education*, 1–28.
<https://doi.org/10.1080/03057267.2025.2576997>
- Lin, C., & Wu, H. (2021). Effects of different ways of using visualizations on high school students’ electrochemistry conceptual understanding and motivation towards chemistry learning. *Chemistry education research and practice*, 22(3), 786–801.
<https://doi.org/10.1039/d0rp00308e>
- Lindgren, S., Morris, K., & Price, A. (2021). Designing environmental storylines to achieve the complementary aims of environmental and science education through science and

- engineering practices. *Journal of environmental education*, 52(4), 239–255.
<https://doi.org/10.1080/00958964.2021.1949569>
- Liu, S. (2021). Using drawings to examine undergraduate students' mental models of the greenhouse effect: A factor analysis approach. *International journal of science education*, 43(18), 2996–3017. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.2004466>
- Lobner, K., Voitle, F., Ziernwald, L., Bielik, T., & Krell, M. (submitted). Definitions and Frameworks of Modeling Competence in Science Education Research – A Scoping Review.
- Löhner, S., van Hout-Wolters, B., van Joolingen, W., & Savelsbergh, E. R. (2005). Computer based modeling tasks: The role of external representation [Graphic]. In *Society and behavioral sciences* (Issue Chapter 13, pp. 243–263). University of Amsterdam.
http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4366-3_13/fulltext.html
- Löhner, S., van Joolingen, W., & Savelsbergh, E. R. (2003). The Effect of External Representation on Constructing Computer Models of Complex Phenomena. *Instructional Science*, 31, 395–418.
- Louca, L. T., & Zacharia, Z. C. (2012). Modeling-based Learning in Science Education: Cognitive, Metacognitive, Social, Material and Epistemological Contributions. *Educational Review*, 64(4), 471–492. <https://doi.org/10.1080/00131911.2011.628748>
- Louca, L. T., Zacharia, Z. C., & Constantinou, C. P. (2011). In Quest of productive modeling-based learning discourse in elementary school science. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(8), 919–951.
- Lucas, L., Helikar, T., & Dauer, J. (2022). Revision as an essential step in modeling to support predicting, observing, and explaining cellular respiration system dynamics. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE EDUCATION*, 44(13), 2152–2179.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2114815>
- Magana, A., Arigye, J., Udosen, A., Lyon, J., Joshi, P., & Pienaar, E. (2024). Scaffolded team-based computational modeling and simulation projects for promoting representational competence and regulatory skills. *International journal of stem education*, 11(1).
<https://doi.org/10.1186/s40594-024-00494-3>
- Maia, P. F., & Justi, R. (2009). Learning of Chemical Equilibrium through Modelling-based Teaching. *International Journal of Science Education*, 31, 603–630.
<https://doi.org/10.1080/09500690802538045>
- Margolin, J., Pinerua, I., & Gerdeman, D. (2022). Modeling in Science Education: A Synthesis of Recent Discovery Research PreK-12 Projects. *American Institutes for Research*.
<https://par.nsf.gov/biblio/10358422-modeling-science-education-synthesis-recent-discovery-research-prek-projects>
- Muñoz Campos, V., Franco-Mariscal, A. J., & Blanco-López, Á. (2020). Integración de prácticas científicas de argumentación, indagación y modelización en un contexto de la vida diaria. Valoraciones de estudiantes de secundaria. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 17(3), 3201.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3201
- Nelson, M. M., & Davis, E. A. (2012). Preservice Elementary Teachers' Evaluations of Elementary Students' Scientific Models: An aspect of pedagogical content knowledge for scientific modeling. *International Journal of Science Education*, 34(12), 1931–1959.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2011.594103>
- Nicolaou, C. T., & Constantinou, C. P. (2014a). Assessment of the modeling competence: A systematic review and synthesis of empirical research. *Educational Research Review*, 13, 52–73.
- Nicolaou, Chr. Th., & Constantinou, C. P. (2014b). Assessment of the modeling competence: A systematic review and synthesis of empirical research. *Educational Research Review*, 13, 52–73. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2014.10.001>
- Ogborn, J., & Wong, D. (1984). A microcomputer dynamical modelling system. *Physics Education*, 19, 138–142.

- Oh, P. S., & 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., Aragón Méndez, M. M., Soto Mancera, F., Vicente Martorell, J. J., Matos Delgado, J., Marín Barrios, R., & Franco-Mariscal, R. (2021). ¿Varía la masa de la Tierra? Modelizando a partir de un experimento mental. *Enseñanza de Las Ciencias*, 39(2), 25–43.
- Papaevripidou, M., Constantinou, C. P., & Zacharia, Z. C. (2007). Modeling complex marine ecosystems: An investigation of two teaching approaches with fifth graders. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(2), 145–157.
- Papert, S. (1980). “Mindstorms” Children. *Computers and Powerful Ideas*.
<https://ci.nii.ac.jp/naid/10003835700/en/>
- Paz Otero, A., & Puig, B. (2020). Una secuencia para promover la alfabetización geocientífica y educación patrimonial en secundaria. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 17(2), 2202.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i2.2202
- Pedrerá, O., Barrutia, O., & Díez, J. (2025). Effectiveness of a model-based inquiry instructional sequence in overcoming students’ teaching-learning difficulties on plant nutrition. *International journal of science education*, 47(6), 794–816.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2024.2350705>
- Peleg, R., Lahav, O., Hagab, N., Talis, V., & Levy, S. (2024). Listening to or looking at models: Learning about dynamic complex systems in science among learners who are blind and learners who are sighted. *Journal of computer assisted learning*, 40(2), 452–464.
<https://doi.org/10.1111/jcal.12886>
- Peretz, R., Tal, M., Akiri, E., Dori, D., & Dori, Y. (2023). Fostering engineering and science students’ and teachers’ systems thinking and conceptual modeling skills. *Instructional science*, 51(3), 509–543. <https://doi.org/10.1007/s11251-023-09625-9>
- Pierson, A. E., & Brady, C. E. (2020). Expanding Opportunities for Systems Thinking, Conceptual Learning, and Participation through Embodied and Computational Modeling. *Systems*, 8(4), 48. <https://doi.org/10.3390/systems8040048>
- Pluta, W. J., Chinn, C. A., & Duncan, R. G. (2011). Learners’ epistemic criteria for good scientific models. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(5), 486–511.
<https://doi.org/10.1002/tea.20415>
- Prasad, P., & Iyer, S. (2022). VeriSIM: A model-based learning pedagogy for fostering software design evaluation skills in computer science undergraduates. *Research and practice in technology enhanced learning*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s41039-022-00192-0>
- Resnick, M., Maloney, J., Monroy-Hernández, A., Rusk, N., Eastmond, E., Brennan, K., Millner, A., Rosenbaum, E., Silver, J., Silverman, B., & Kafai, Y. (2009). Scratch: Programming for all. *Commun. ACM*, 52(11), 60–67. <https://doi.org/10.1145/1592761.1592779>
- Rodríguez Mora, F., & Blanco López, Á. (2020). Diseño de una secuencia de enseñanza-aprendizaje para el desarrollo de competencias científicas en el contexto del consumo de agua envasada. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 18(1), 1803.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i1.1803
- Samarapungavan, A., Bryan, L., Staudt, C., Sapkota, B., Pinto, H., Broadhead, J., & Kimball, N. (2023). Using technology-mediated inquiry to help young learners reimagine the visible world through simple particle models. *Journal of research in science teaching*, 60(2), 390–422.
<https://doi.org/10.1002/tea.21802>
- Schwarz, C. V., Ke, L., Salgado, M., & Manz, E. (2022). Beyond assessing knowledge about models and modeling: Moving toward expansive, meaningful, and equitable modeling practice. *Journal of Research in Science Teaching*. <https://doi.org/10.1002/tea.21770>
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific

- modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632–654.
- Schwarz, C. V., & White, B. Y. (2005). Metamodeling Knowledge: Developing Students' Understanding of Scientific Modeling. *Cognition and Instruction*, 23(2), 165–205.
- Sins, Patrick. H. M., Savelsbergh, E. R. E. R., van Joolingen, W. W. R., & van Hout-Wolters, B. H. A. M. (2009). The Relation between Students' Epistemological Understanding of Computer Models and Their Cognitive Processing on a Modelling Task. *International Journal of Science Education*, 31(9), 1205–1229. <https://doi.org/10.1080/09500690802192181>
- Stratford, S. J., Krajcik, J., & Soloway, E. (1998). Secondary Students' Dynamic Modeling Processes: Analyzing, Reasoning About, Synthesizing, and Testing Models of Stream Ecosystems. *Journal of Science Education and Technology*, 7(3), 215–234.
- Tang, X., Shu, G., Wei, B., & Levin, D. (2024). Emergent learning about measurement and uncertainty in an inquiry context: A case from an elementary classroom. *Science education*, 108(1), 308–331. <https://doi.org/10.1002/sce.21837>
- Torres, J., & Vasconcelos, C. (2016). Models in Geoscience Classes: How Can Teachers Use Them? In C. Vasconcelos (Ed.), *Geoscience Education: Indoor and Outdoor* (pp. 25–41). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43319-6_2
- Torres, J., & Vasconcelos, C. (2021). Models and the Nature of Science: What Mediates Their Implementation in Portuguese Biology and Geology Classes? *Education Sciences*, 11(11), 688. <https://doi.org/10.3390/educsci11110688>
- Upmeier Zu Belzen, A., Van Driel, J., & Krüger, D. (2019). Introducing a Framework for Modeling Competence. In A. Upmeier Zu Belzen, D. Krüger, & J. Van Driel (Eds.), *Towards a Competence-Based View on Models and Modeling in Science Education* (Vol. 12, pp. 3–19). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30255-9_1
- Valanides, N., & Angeli, C. (2008). Professional development for computer-enhanced learning: A case study with science teachers. *Research in Science & Technological Education*, 26(1), 3–12. <https://doi.org/10.1080/02635140701847397>
- van Borkulo, S. P., van Joolingen, W. R., Savelsbergh, E. R., & de Jong, T. (2012). What can be learned from computer modeling? Comparing expository and modeling approaches to teaching dynamic systems behavior. *Journal of Science Education and Technology*, 21, 267–275.
- Vasconcelos, L., & Kim, C. (2022). Preservice science teachers coding science simulations: Epistemological understanding, coding skills, and lesson design. *Educational technology research and development*, 70(4), 1517–1549. <https://doi.org/10.1007/s11423-022-10119-7>
- Wilensky, U., & Reisman, K. (2006). Thinking Like a Wolf, a Sheep, or a Firefly: Learning Biology Through Constructing and Testing Computational Theories—An Embodied Modeling Approach. *Cognition and Instruction*, 24(2), 171–209.
- Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92(5), 941–967. <https://doi.org/10.1002/sce.20259>
- Zhai, X., & Yin, Y. (2024). Using educative learning progression to support novice science teachers' lesson plan critiques. *International journal of science education*, 46(13), 1281–1310. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2285259>
- Zhang, B., Liu, X., & Krajcik, J. S. (2006). Expert Models and Modeling Processes Associated with a Computer-Modeling Tool. *Science Education*, 90(4), 579–604.