



El pensamiento sistémico como competencia científica clave ante el cambio ambiental global

Systems Thinking as a Key Scientific Competence in the face of Global Environmental Change

Mercedes Varela-Losada, María A. Lorenzo-Rial, Nuria Castiñeira-Rodríguez, Uxío Pérez-Rodríguez

Departamento de Didácticas Especiales, Universidade de Vigo, Pontevedra, España

mercedesvarela@uvigo.es, marialorenzo@uvigo.es, nuria.castineira@uvigo.es, uxio.perez@uvigo.es

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2752-4723>, <https://orcid.org/0000-0003-0034-0737>, <https://orcid.org/0000-0001-9219-1067>,
<https://orcid.org/0000-0003-3815-4243>

RESUMEN • La crisis socioambiental requiere una educación que desarrolle competencias que mejoren la forma en que entendemos el mundo y actuamos con él. Así, a partir del análisis de conceptualizaciones de pensamiento sistémico de marcos educativos internacionales, se diseñó una propuesta didáctica para profesorado en formación sobre cambio climático, que permitió evaluar el uso de las habilidades básicas de esta competencia a través de mapas conceptuales. El análisis hizo posible identificar el pensamiento sistémico como una competencia científica clave para la toma de decisiones responsables. Los resultados también mostraron un incipiente conocimiento sobre la complejidad sistémica de este problema, que debe perfeccionarse. Su desarrollo requiere de actividades centradas en habilidades cada vez más complejas, como la comprensión de las características del sistema y sus implicaciones temporales.

PALABRAS CLAVE: Pensamiento sistémico; Competencias científicas; Complejidad; Cambio ambiental global; Cambio climático.

ABSTRACT • The socio-environmental crisis requires education to develop competencies that enhance our comprehension of the world and our capacity to act upon it. To this purpose, a didactic proposal on climate change was formulated for teacher trainees, analysing conceptualisations of systems thinking while considering international educational frameworks. This proposal enabled prospective teachers to evaluate the fundamental skills of this competence through concept maps. The analysis facilitated the identification of systems thinking as a key scientific competence for responsible decision-making. The results also showed an incipient understanding of the systemic complexities of the problem, which requires further refinement. Its development needs activities that focus on increasingly complex skills, such as understanding the system's characteristics and their time implications.

KEYWORDS: Systems thinking; Scientific competencies; Complexity; Global Environmental Change; Climate Change.

Recepción: septiembre 2024 • Aceptación: mayo 2025 • Publicación: noviembre 2025

Varela-Losada, M., Lorenzo-Rial, M. A., Castiñeira-Rodríguez, N. y Pérez-Rodríguez, U. (2025). El pensamiento sistémico como competencia científica clave ante el cambio ambiental global. *Enseñanza de las Ciencias*, 43(3), 157-177.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.6300>

INTRODUCCIÓN

La interacción del ser humano con el sistema Tierra y, sobre todo, el impacto de sus actividades en los subsistemas naturales están perturbando su estabilidad y colocando a la humanidad en una situación de caos e incertidumbre (Bevan, 2022). Los límites planetarios, propuestos por Rockström et al. (2023), muestran el estado ambiental actual del sistema Tierra y evalúan las líneas que la humanidad no debe cruzar para permanecer dentro de un espacio operativo seguro. Este marco identifica nueve procesos y sistemas biofísicos para los cuales establece umbrales de seguridad e incertidumbre. Como se puede ver en la figura 1, las últimas evaluaciones muestran que algunos procesos globales ya se encuentran en riesgo extremo, situándonos en zonas de alta incertidumbre (Rockström et al., 2023). Además, es necesario tener en cuenta la interrelación de los procesos que están siendo alterados. Así, la aceleración del cambio climático (CC de aquí en adelante) implica importantes consecuencias para los sistemas biológicos e hídricos, lo que provoca a su vez un aumento de la pérdida de la biodiversidad y de la acidificación oceánica, así como efectos en el sistema atmosférico. Estas importantes alteraciones en la estructura y el funcionamiento del sistema Tierra son los que llevan a hablar en la actualidad de un cambio ambiental global¹ (Vitousek, 1994).

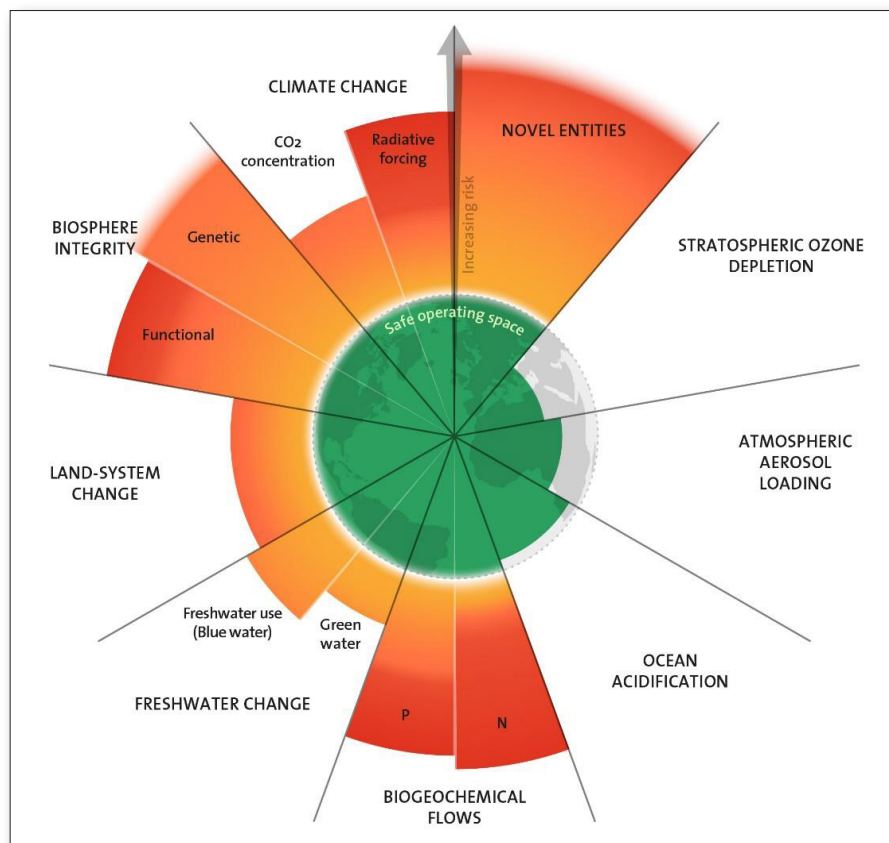


Fig. 1. Límites planetarios que muestran el estado del sistema Tierra. . Fuente: <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>.

1. El cambio ambiental global fue utilizado por Vitousek en 1994 para referirse a los cambios biogeoquímicos que están alterando la estructura y el funcionamiento del sistema Tierra. Estos cambios son causados por las actividades humanas, cuyos impactos adquieren una dimensión planetaria.

La principal preocupación es que, aunque conocemos los importantes impactos de esta situación, los datos no muestran signos de desaceleración. El Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el CC indica que el continuo aumento de los gases de efecto invernadero está provocando graves desastres, afectando a la salud y al bienestar de las personas y los ecosistemas naturales (IPCC, 2022). Los pronósticos indican que la pobreza y la desigualdad, especialmente en relación con las mujeres, crecerá más en aquellas áreas donde más aumenta el calentamiento global, lo que resultará en una mayor mortalidad y migraciones masivas (Wesselbaum y Aburn, 2019).

La causa fundamental de esta crisis socioambiental radica en nuestro modelo de desarrollo, que equivocadamente asocia su avance con el crecimiento económico, el consumismo y la quimera del control tecnológico (Klein, 2015; Morin y Petit, 2011). Así, gran parte de las razones detrás de la crisis actual están ligadas a un sistema económico capitalista, neoliberal e injusto (Chomsky et al., 2020).

Es necesaria una política planificada y coherente para reducir la actividad económica, de forma que disminuya el impacto ecológico y la desigualdad y se mejoren los medios de vida y el bienestar de la ciudadanía global (Hickel, 2021). Y en este marco, la educación es una pieza clave en la transformación de nuestra forma de tomar decisiones y actuar.

MARCO TEÓRICO

El abordaje educativo competencial de los problemas socioambientales

Para afrontar los problemas socioambientales presentes y futuros hoy en día se defiende que la educación debe centrarse en objetivos vinculados al desarrollo competencial (UNESCO, 2017). Así, desde el ámbito educativo se empezaron a desarrollar un conjunto de competencias que contribuyesen a la búsqueda de la sostenibilidad. Se definieron entonces las *key competencies in sustainability* como combinaciones de conocimientos, habilidades y actitudes que permiten la ejecución exitosa de tareas y la resolución de problemas con respecto a cuestiones de sostenibilidad de la vida real, los retos y las oportunidades (Wiek et al., 2011). Pero su desarrollo ha venido acompañado de debates y dificultades propios de nuevas conceptualizaciones, como definir cuáles son estas competencias o cómo debe ser su formación en el aula (Wiek et al., 2011; Brundiers et al., 2021). Así, algunos estudios señalan la prevalencia de algunas de ellas como base para la acción informada y responsable, destacando el pensamiento sistémico (PS de aquí en adelante) como un elemento inicial básico para comprender la naturaleza de los problemas socioambientales (Demssie et al., 2019).

En este contexto, la formación inicial del profesorado puede contribuir a promover esta competencia con éxito (Streiling et al., 2021), lo que es esencial para su futura transposición didáctica. Pero estudios recientes (Bielik et al., 2023; Yoon et al., 2018; Lorente, et al., 2023; Lorenzo-Rial et al., 2024) señalan que existen necesidades de formación en PS entre el profesorado y que, además, son escasas las experiencias didácticas que abordan problemas complejos como el CC desde una perspectiva sistémica.

El pensamiento sistémico como competencia científica clave para la comprensión de la complejidad

Encarar un futuro incierto y de riesgo requiere que las personas modifiquen su manera de pensar y actuar hacia enfoques más sostenibles, y, en este sentido, la comprensión de la complejidad es una pieza fundamental (Bonil et al., 2010; Watanabe et al., 2022). Ya que deben comprender los procesos que ocurren en el sistema Tierra y sus interacciones, para que puedan evaluar las consecuencias a diferentes

escalas y realizar una toma de decisiones informada y consciente. Y el desarrollo del PS puede favorecer ir más allá de los patrones lineales de comprender la realidad, de forma que se considere el impacto de las elecciones personales, locales y globales, y se gestionen adecuadamente los riesgos que acompañan a los problemas socioambientales.

Así, el abordaje de este tipo de crisis requiere que la juventud desarrolle habilidades de pensamiento para gestionar esta complejidad y, dado que se verá afectada por lo que ocurra a escala global en su vida cotidiana, sentir que puede influir en ella (Levrini et al., 2021). Como señalan estas autoras, cada vez es más importante que las personas jóvenes sientan que pueden enfrentarse a los retos globales como una ciudadanía activa, y que piensen, con esperanza, en su futuro y en el del mundo interconectado. Pero, para ello, es necesaria una educación científica que favorezca una cosmovisión ecocéntrica, que incluya a los seres humanos como parte del medio ambiente y no separados de él (OECD, 2023).

Por ello, es fundamental capacitar a la ciudadanía para construir modelos explicativos sobre los fenómenos del mundo (Izquierdo et al., 1999), donde confluyen simultáneamente multitud de causas y efectos, y considerar la dimensión temporal que da relevancia a la perspectiva evolutiva e histórica de los fenómenos (Bonil et al., 2010). De forma que se promueva un saber que toma como significativas las dimensiones cognitivas de construcción de modelos explicativos y la dimensión ciudadana de acción sobre el medio (Calafell y Banqué, 2017).

La literatura señala que la dinámica de sistemas tiene una gran utilidad para comprender sistemas socioecológicos y medioambientales (Kogetsidis, 2023), considerándola una pieza clave del aprendizaje actual de las ciencias experimentales y la sostenibilidad. Desde esta perspectiva, el valor de aprender sobre sistemas complejos se relaciona tanto con la importancia de estas ideas en la ciencia moderna como con su potencial para facilitar las interconexiones conceptuales entre diferentes materias científicas, como una nueva perspectiva sobre la alfabetización científica (Jacobson, 2001). Así, los estándares de la ciencia *Next Generation* (*National Research Council*, 2012) señalan a los sistemas como un concepto transversal, y convierten el PS en una habilidad fundamental que es necesario cultivar desde la educación científica básica.

Los sistemas son conjuntos de elementos interrelacionados que interactúan dando lugar a pautas de comportamiento determinadas, organizados de forma coherente para alcanzar un fin y donde los elementos y sus funciones se mantienen como un todo por la interacción de sus partes (Meadows, 2008). Los sistemas se distinguen por contar con componentes interrelacionados, cuyo comportamiento está determinado por su estructura global. Suelen ser sistemas abiertos y constan de subsistemas jerárquicos, donde sus elementos interactúan de manera no lineal, lo que complica la identificación de relaciones causa-efecto (Assaraf y Orion, 2005; Roychoudhury et al., 2017).

Desde esta perspectiva, afrontar adecuadamente el cambio ambiental global requiere que las personas consideren al planeta y sus procesos como un sistema. Así, debe fomentarse la identificación de su origen y los elementos y procesos involucrados, su comprensión como un todo, el entendimiento de sus interconexiones dinámicas con otros sistemas terrestres y humanos, el conocimiento de sus dimensiones ocultas y la capacidad de pensar temporalmente (Lorenzo-Rial et al., 2025).

Pensar en el abordaje del CC nos puede ayudar a comprender esta idea. El clima es un ejemplo de cómo en un sistema se transfieren materiales y energía dentro y fuera de él, así como entre sus componentes, y de cómo un pequeño cambio en una variable puede alterar la estabilidad del sistema, lo que lleva a alteraciones en los procesos interrelacionados (Lorenzo-Rial et al., 2024). Sin olvidar la importancia de los procesos de retroalimentación que lleva asociados. Su origen y consecuencias solo se pueden entender desde una perspectiva compleja, que fomente la comprensión de las interrelaciones entre la generación de gases invernadero (vinculados a la forma de desarrollo humano) y sus consecuencias (en sistemas naturales y humanos). Además, el CC no es un problema aislado, está estrechamente relacionado con otros problemas vinculados al cambio ambiental global como la pérdida de biodiversidad.

sidad o la acidificación de los océanos (Steffen et al., 2015). Afrontarlo requiere, por tanto, habilidades específicas que permitan verlo como un proceso interconectado y dinámico.

A pesar de ello, aún hay dificultades para articular un marco competencial de referencia para su abordaje (Brundiers et al., 2021). Es preciso desarrollar descripciones detalladas y aceptables de las competencias necesarias, que proporcionen orientación para el desarrollo de programas y currículos (Glasser y Hirsh, 2016). Asimismo, la literatura muestra como la formación en PS suele mostrar importantes carencias: *i*) ya que no es una forma natural de pensar para los seres humanos, *ii*) donde los estudiantes tienden a pensar en términos de componentes aislados y estáticos, *iii*) y donde no se suelen tener en cuenta las escalas espaciales y temporales (York et al., 2019).

En los últimos años han surgido, desde importantes organismos internacionales, una serie de marcos que impulsan el abordaje competencial de los problemas socioambientales, que incluyen esta competencia (European Union, 2022; IUCN, 2004; OECD, 2023; UNESCO, 2017). Desde este contexto, el primer objetivo de este estudio fue analizar y comparar las distintas conceptualizaciones de PS dentro de las competencias clave que se están promoviendo desde estas entidades internacionales. A partir de este análisis se diseñó una propuesta didáctica para profesorado en formación inicial que permitió llevar a cabo un segundo objetivo, evaluar cómo este colectivo hace uso de las habilidades básicas de PS. De este modo, el estudio de estas conceptualizaciones sirvió para orientar la acción formativa y se usó como marco para analizar sus resultados al abordar problemas socioambientales complejos como el CC.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

La investigación fue llevada a cabo en dos fases:

- Análisis y comparación de las conceptualizaciones de PS de cuatro marcos competenciales, que sirvieron como referencia para el diseño y la evaluación de una propuesta de formación docente.
- Evaluación de las habilidades del PS de profesorado en formación inicial.

Análisis de los marcos competenciales

Procedimiento de análisis de los marcos competenciales

Para la elaboración de este estudio se realizó, en primer lugar, una revisión de la literatura para contrastar la literatura existente sobre PS. Desde esta fundamentación se analizaron cuatro marcos competenciales que se han impulsado desde cuatro organizaciones ligadas a la educación:

- Guía para educadores de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, 2004).
- Marco para la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (UNESCO, 2017).
- Marco europeo de competencias sobre sostenibilidad (UE, 2022).
- Marco PISA 2025 (OECD, 2023).

La motivación de escoger estas entidades en concreto reside en su interés por desenvolver un marco competencial en torno a la educación para la sostenibilidad, que contemplan el PS como una habilidad fundamental. Además, se ha tenido en cuenta su carácter internacional y oficial, que les confiere fiabilidad e influencia en el desarrollo de políticas educativas. Pero sin olvidar que estas organizaciones y sus recomendaciones educativas suelen estar rodeadas de importantes críticas y controversias (Álvarez et al., 2018; Gómez, 2018; López-Rupérez, 2022).

El análisis se realizó en tres etapas: *i*) identificación de las habilidades de PS conceptualizadas desde la didáctica de las ciencias experimentales (Assaraf y Orion, 2005; Yoon et al., 2018); *ii*) adaptación al ámbito de la búsqueda de la sostenibilidad (Wiek et al., 2011); e *iii*) identificación de elementos novedosos emergentes de los marcos analizados. Con el fin de facilitar la obtención de conclusiones se construyó una tabla de análisis donde se identifican las habilidades del PS básicas obtenidas.

Resultados del análisis de los marcos competenciales

En el análisis hay que destacar que, en líneas generales, desde la publicación del marco de la IUCN (2004), estos han ido evolucionando y se han vuelto más amplios y específicos, al considerar la complejidad de la sostenibilidad desde diferentes perspectivas, lo que a su vez permite abordar los problemas de sostenibilidad desde distintas vertientes y escalas. Además, debemos destacar que el marco más actual de la OECD (2023) establece sinergias de especial interés entre las competencias específicas para la educación científica y las ciencias medioambientales.

La tabla de análisis (tabla 1) muestra las habilidades del PS comunes entre estos marcos, de forma que permite señalar los principales elementos que deben desarrollarse y orientar su enseñanza: *i*) comprender y analizar las relaciones entre las partes y los procesos del sistema y su carácter dinámico; *ii*) considerar las diferentes dimensiones implicadas (naturales y sociales) y las escalas geográficas (local, nacional, global); *iii*) asumir la complejidad y entender el sistema como un «todo», teniendo en cuenta sus características como sistema; *iv*) pensar temporalmente; y *v*) evaluar los impactos en diferentes dimensiones y escalas y tomar decisiones. En esta tabla las habilidades aparecen ordenadas según el nivel de dificultad, de forma que puede guiar el orden en que deberían ser desarrolladas en el aula, hasta ser una vía para fundamentar la toma de decisiones consciente y responsable. En dicha tabla se puede apreciar, además, que las habilidades son coincidentes en todas las descripciones, con una excepción, la habilidad de pensar temporalmente que tan solo es mencionada en los dos más recientes: la Unión Europea (2022) y la OECD (2023).

Tabla 1.
Habilidades de PS comunes que se obtienen al analizar los marcos educativos

<i>Habilidades del PS</i>	<i>IUCN (2004)</i>	<i>UNESCO (2017)</i>	<i>GREENCOMP (2022)</i>	<i>PISA 2025 (OECD, 2023)</i>
Comprender y analizar las relaciones entre las partes y los procesos del sistema y su carácter dinámico	«es un pensamiento relacional», «hacer hincapié en la naturaleza dinámica de los problemas»	«reconocer y comprender las relaciones»	«comprender cómo interactúan los elementos dentro de los sistemas y entre ellos»	«reconocer interacciones complejas entre variables relevantes y comprender las consecuencias de los cambios en esas variables»
Considerar las diferentes dimensiones implicadas (naturales y sociales) y las escalas geográficas (local, nacional, global)	«hacer hincapié en las múltiples dimensiones»	«pensar cómo están integrados los sistemas dentro de los distintos dominios y escalas»	«abordar un problema de sostenibilidad desde todas las vertientes; considerar el tiempo, el espacio y el contexto» «comprender la realidad en relación con diferentes contextos (locales, nacionales, mundiales) y ámbitos (medioambiental, social, económico, cultural)»	«considerar que los sistemas pueden ser ecológicos o sociales, o una combinación de ambos»

<i>Habilidades del PS</i>	<i>IUCN (2004)</i>	<i>UNESCO (2017)</i>	<i>GREENCOMP (2022)</i>	<i>PISA 2025 (OECD, 2023)</i>
Asumir la complejidad y entender el sistema como un «todo», teniendo en cuenta sus características como sistema	«los enfoques sistémicos nos ayudan a desplazar nuestra atención de las “cosas” a los procesos, de los estados estáticos a la dinámica y de las “partes” al “todo”»	«analizar los sistemas complejos»	«las partes de un sistema actúan de manera diferente cuando son separadas de ese sistema» «identificar mecanismos de retorno de información, puntos de intervención y trayectorias interactivas»	«comprender un sistema y sus complejas relaciones permite reconocer cómo y cuándo los cambios en una variable de un sistema pueden afectar a otras y su posible mitigación»
Pensar temporalmente			«considerar el tiempo»	«investigar y aplicar los conocimientos sobre las interacciones humanas con estos sistemas a lo largo del tiempo»
Evaluar los impactos en diferentes dimensiones y escalas y tomar decisiones	«es una forma de percibir y un conjunto de principios, herramientas y técnicas que ayudan a encontrar soluciones más genuinas»	«lidar con la incertidumbre»	«herramienta para evaluar opciones, para tomar decisiones y para intervenir»	«evaluar y diseñar posibles soluciones a los problemas socioecológicos, teniendo en cuenta las implicaciones para las generaciones actuales y futuras»

Fuente: elaboración propia.

Evaluación de las habilidades del PS para profesorado en formación inicial a través de una propuesta de investigación sobre cambio climático

Características de la propuesta

En la investigación sobre innovación educativa en torno a la sostenibilidad, se señala la importancia de cultivar entre el profesorado competencias que le preparen para enfrentar los retos actuales, destacando entre ellos el PS (Fischer et al., 2022; Pegalajar et al., 2021). Por tanto, el objetivo de la propuesta diseñada para este colectivo fue explorar la presencia de habilidades implicadas en PS en torno al CC y fomentar su potencial entre este colectivo.

La experiencia se desarrolló durante un cuatrimestre del curso 2023/2024 con alumnado del grado en Educación Primaria en la asignatura optativa «Educación ambiental para el desarrollo», con una duración de cinco semanas. Participaron un total de 36 estudiantes (33 % hombres y 67 % mujeres) con escasa formación científico-experimental, que incluía ausencia de formación específica en competencia sistémica y poca experiencia realizando mapas conceptuales, tal y como declararon en la fase de exploración de las ideas iniciales.

El enfoque didáctico de la propuesta estuvo vinculado al paradigma socioconstructivista y a la teoría de la actividad (Daniels et al., 2009). Así, esta experiencia empleó una metodología basada en la investigación sobre un problema relevante y real impulsando la participación, la reflexión y la perspectiva global (Varela-Losada et al., 2019), cuyas fases se pueden ver en la figura 2.

COMPLEJIDAD

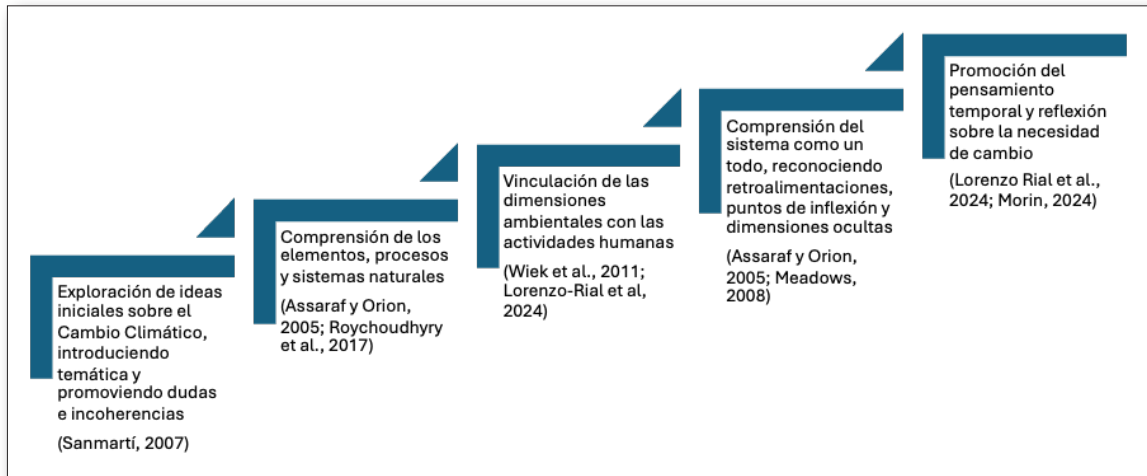


Fig. 2. Fases de la propuesta, diseñadas en base a la revisión de la literatura, con complejidad creciente. *Fuente:* elaboración propia.

La propuesta se inició con la exploración de ideas iniciales sobre el CC que introdujo la temática y promovió el desarrollo de todo el proceso. Estas cuestiones, que fueron incitadas para favorecer la comprensión del problema desde un enfoque complejo, se trabajaron desde una categorización que puede usarse para la investigación de otros problemas socioambientales (procesos implicados, causas, consecuencias y posibilidades de acción). Además, a lo largo de la experiencia didáctica se usaron elementos de evaluación formadora que buscaban la autorregulación de los aprendizajes, desde la evaluación inicial hasta la inclusión de procesos de autoevaluación y coevaluación.

En cuanto al diseño de las actividades y tareas, estas se desarrollaron vinculadas a las habilidades de PS, como se puede observar en la tabla 2, y fueron llevadas a cabo tanto de forma grupal como de forma individual.

Tabla 2.
Habilidades del PS implicadas en la propuesta didáctica

<i>Habilidades del PS</i>	<i>Habilidades implicadas en el contexto del aprendizaje del CC</i>	<i>Actividades y tareas realizadas</i>
Comprender y analizar las relaciones entre las partes y los procesos del sistema y su carácter dinámico	Identificar componentes naturales (sol, atmósfera, gases invernadero, agua, tierra, ecosistemas) Identificar relaciones dinámicas con procesos naturales y procesos humanos	– Realización de esquemas-dibujos de procesos: ciclo del agua, efecto invernadero y CC, identificando componentes e interacciones – Lectura de noticias de prensa con análisis de relaciones
Considerar las diferentes dimensiones implicadas (naturales y sociales) y las escalas geográficas (local, nacional, global)	Identificar relaciones entre distintas dimensiones y escalas, prestando especial atención a propiedades ocultas (modelo socioeconómico y desigualdades).	– Análisis sobre la huella de carbono de distintos países, con análisis de desigualdades políticas, sociales y de género – Realización de una infografía sobre los impactos ambientales y sociales de la <i>fast fashion</i> en relación con el CC.
Asumir la complejidad y entender el sistema como un «todo», teniendo en cuenta sus características como sistema	Integrar el CC dentro del cambio ambiental global, presentando el sistema como un todo y reconociendo propiedades del sistema	– Estudio de una retroalimentación positiva del CC, relacionándola con otro problema ambiental en riesgo: la pérdida de biodiversidad

<i>Habilidades del PS</i>	<i>Habilidades implicadas en el contexto del aprendizaje del CC</i>	<i>Actividades y tareas realizadas</i>
	Identificar la relación entre el aumento exponencial de las actividades humanas y las graves alteraciones del sistema biofísico y social.	– Análisis de forma interrelacionada de gráficos sobre los indicadores de la gran aceleración y el cambio ambiental global (Steffen et al., 2015).
Pensar temporalmente	Pensar temporalmente teniendo en cuenta proyecciones de futuro y retraso en los efectos (consecuencias futuras de acciones actuales)	– Realización de un informe sobre las condiciones climáticas de puntos cercanos en relación con tres escenarios climáticos previstos, con ayuda del Visor de escenarios climáticos (https://escenarios.adaptecca.es)
Evaluar los impactos y tomar decisiones	Comprender la gravedad de las consecuencias y la necesidad de cambios estructurales	– Realización de un mapa conceptual mostrando los elementos y relaciones estudiadas – Reflexión sobre las distintas soluciones

En la figura 3, se muestran algunos recursos usados en la propuesta. La figura 3a muestra una ejemplificación de retroalimentación positiva del CC analizada por el alumnado, con el fin de facilitar la comprensión de cómo un bucle reforzador puede amplificar sus consecuencias y marcar puntos de inflexión (cambio de receptor a emisor de CO₂). En la figura 3b se muestra la aplicación usada para facilitar el pensamiento temporal a través de los distintos escenarios posibles de CC.

RETROALIMENTACIONES POSITIVAS Y PUNTOS DE INFLEXIÓN

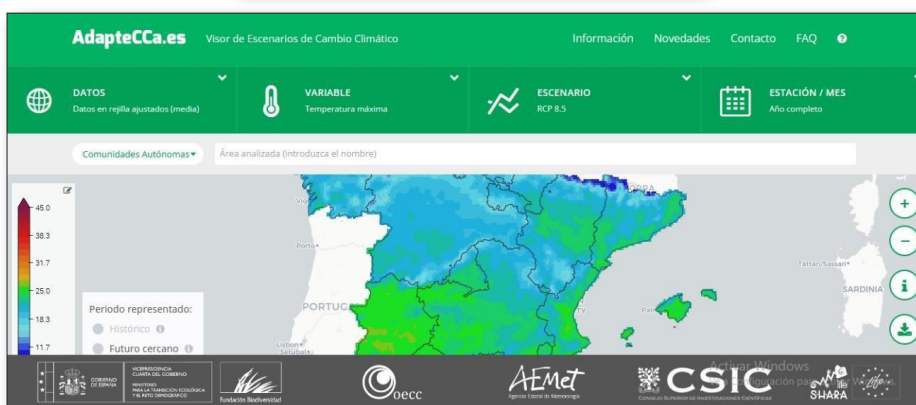
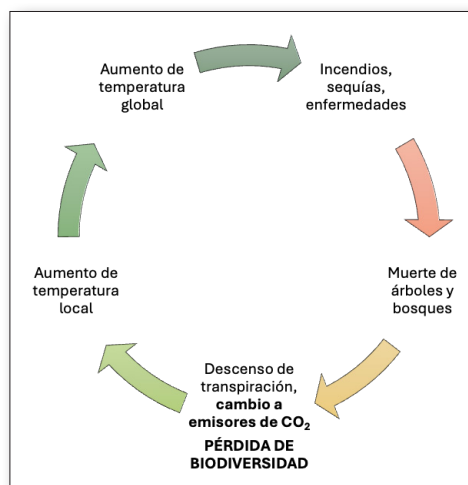


Fig. 3a. Ejemplificación de la retroalimentación positiva analizada por el alumnado. Fuente: elaboración propia. Figura 3b. Visor de escenarios de CC. Disponible en: <https://escenarios.adaptecca.es>

Una fase importante final fue la realización de forma individual de mapas conceptuales mostrando las relaciones aprendidas durante el proceso sobre el CC (ver figura 4).

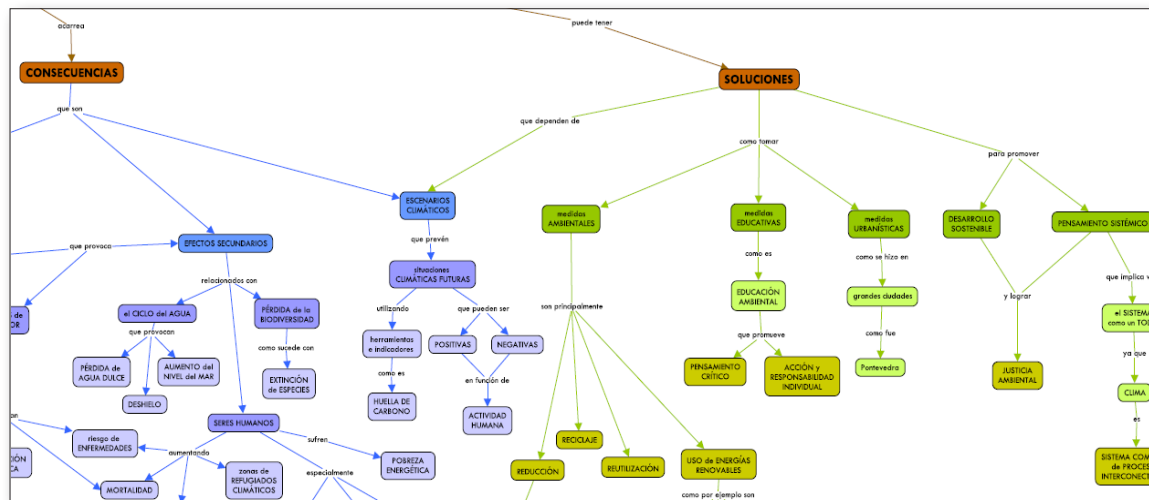


Fig. 4. Fragmento representativo de un mapa conceptual realizado por una alumna del aula. Fuente: elaboración propia.

Procedimiento de análisis de las habilidades de pensamiento sistémico

Para evaluar las habilidades de PS se usaron los mapas conceptuales creados por el alumnado. Este tipo de mapas permite explorar las estructuras cognitivas de los estudiantes teniendo en cuenta su conocimiento conceptual sobre un tema y las relaciones entre contenidos, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para evaluar las habilidades de PS en cuestiones de sostenibilidad (Brandstädter et al., 2012). Así, se creó una rúbrica *ad hoc* para analizar los mapas conceptuales, teniendo en cuenta la literatura (Dugan et al., 2022) basada los siguientes parámetros:

- **Número de conceptos utilizados.** Los conceptos incluidos estaban basados en las preguntas obtenidas en la evaluación inicial. Así, se partió, de forma dirigida por el profesorado (Brandstädter et al., 2012), de un listado inicial de conceptos que fueron organizados en cuatro dimensiones (procesos implicados, origen, consecuencias y solución): efecto invernadero, radiación, gases de efecto invernadero, retroalimentación positiva, industrias (fabricación *fast fashion*, producción de fibras de celulosa), huella de carbono, bosques boreales y permafrost, pérdida de biodiversidad, refugiados climáticos, efectos en la salud, justicia ambiental, escenarios climáticos y desarrollo sostenible/decrecimiento.
- **Jerarquía,** según los niveles ordenados por importancia
 - Nivel bajo: sin organización jerárquica, los elementos no están ordenados por importancia; es típica la formación mediante simplemente frases.
 - Nivel medio: ordenado y ramificado.
 - Nivel alto: muy ordenado y ramificado, representando correctamente el tema.
- **Complejidad relacional,** según la presencia de relaciones cruzadas entre conceptos estructurantes
 - Nivel bajo: no hay relaciones cruzadas o no son relevantes.
 - Nivel medio: tiene alguna relación cruzada relevante.
 - Nivel alto: con varias relaciones cruzadas relevantes, que representan correctamente la complejidad del tema.

- **Tipos de relaciones**, que se muestran en la tabla 3, donde también se consideran tres niveles:
 - Nivel bajo: sin presencia de relaciones.
 - Nivel medio: con presencia de los términos de la relación.
 - Nivel alto: con relaciones correctamente explicadas.

Como marco de análisis de estas relaciones se usaron ejemplificaciones tratadas específicamente en el transcurso de la propuesta, tal como muestra la tabla 3.

Tabla 3.
Tipo de relaciones analizadas
en los mapas conceptuales partiendo de las habilidades implicadas

<i>Habilidades implicadas</i>	<i>Tipos de relaciones</i>	<i>Ejemplificaciones de relaciones</i>
Comprender y analizar las relaciones entre las partes y los procesos del sistema y su carácter dinámico.	Relaciones dinámicas entre sistemas naturales y humanos.	Efecto invernadero natural y beneficioso que se vuelve perjudicial afectado por el aumento de la emisión de GEI. Cambio de permafrost/bosques de sumidero a emisor de CO ₂ .
Considerar las diferentes dimensiones implicadas (naturales y sociales) y las escalas geográficas (local, nacional, global).	Relación con consecuencias ambientales.	Sequías, incendios, inundaciones, subida del nivel del mar... provocados por el CC.
	Relación con consecuencias sociales.	Efectos en la salud/aumento de la mortalidad, injusticia ambiental, aparición de refugiados... provocados por el CC.
Asumir la complejidad y entender el sistema como un «todo», teniendo en cuenta sus características como sistema.	Relación con otros procesos globales del sistema Tierra.	Pérdida de biodiversidad relacionada explícitamente con el CC.
Pensar temporalmente	Relación con soluciones.	Diferentes escenarios de futuro en función de la cantidad de GEI emitidos.
Evaluar los impactos y tomar decisiones	Relación con necesidad de cambios estructurales.	Necesidad de cambios estructurales: desarrollo sostenible o decrecimiento.

Fuente: elaboración propia.

- **Errores / ideas alternativas.** Se identificaron además una serie de ideas alternativas relativamente frecuentes en la revisión de los mapas conceptuales.

Una vez se determinó qué aspectos se iban a valorar en los mapas conceptuales y la unificación de criterios, dos personas del equipo de investigación procedieron a aplicarla. Ambas personas evaluaron de 1 a 3 los elementos considerados (jerarquía, complejidad relacional y relaciones) para cada uno de los 36 mapas conceptuales. Los datos fueron tratados a través de Excel office 365 para obtener las medias entre observadores, los datos porcentuales de cada nivel y la representación de figuras.

Después se estudió la fiabilidad interobservador. Atendiendo a las críticas que han recibido los coeficientes Kappa (Vanbelle, 2016), se optó por utilizar coeficientes de correlación intraclase (en adelante, ICC). Se empleó para ello un modelo de efectos mixtos de dos factores, con los efectos de las personas aleatorios y los efectos de las medidas fijos, en el análisis de la consistencia (McGraw y Wong, 1996). Empleando el *software* SPSS versión 20 para Windows, se obtuvieron por tanto 9 valores de medidas promedio de ICC (asumiendo que no existe efecto de interacción), uno por cada ítem de la rúbrica, que permitiesen valorar el grado de acuerdo entre personas evaluadoras.

En relación con la representación del CC, como se puede observar en la figura 5, una parte importante del alumnado (44 %) incluyó todos o casi todos los conceptos propuestos. Otro 36 % incluyó 9-10 conceptos y un 19 % menos de 9. Los términos que más faltan en los mapas conceptuales son: los escenarios climáticos, que están ausentes en casi la mitad de los mapas (48 %). Además, un tercio del profesorado en formación obvia conceptos como los procesos de radiación (36 %), la pérdida de la biodiversidad (34 %), la huella de carbono (31 %) y los efectos en la salud (31 %). En la figura 6 se puede ver además una nube de palabras que muestra la frecuencia de uso en los mapas creados.



Fig. 5. Número de conceptos relevantes utilizados. *Fuente:* elaboración propia.



Fig. 6. Nube de palabras que muestra la frecuencia de uso en los mapas creados. *Fuente:* elaboración propia.

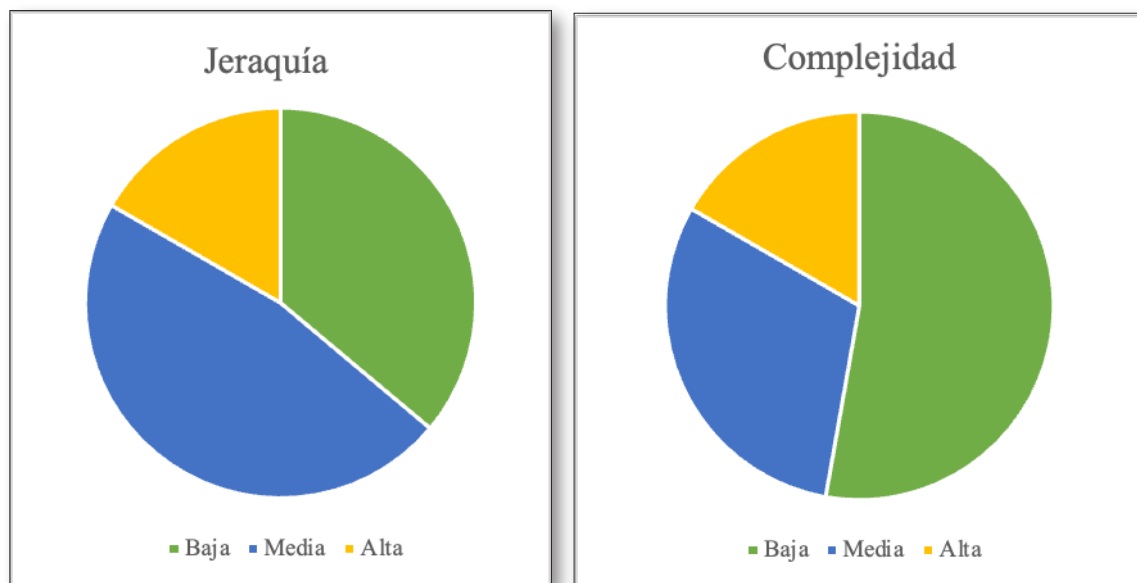


Fig. 7. Jerarquía y complejidad de los mapas conceptuales analizados. *Alta (2-1.5), Media (1-0.5), Baja (0). Fuente: elaboración propia.

En relación con la jerarquía de los mapas estudiados (ver figura 7), solo un 14 % están muy ordenados y ramificados, alrededor de la mitad de ellos presentan una jerarquía media y un 31 % no presenta una organización por importancia apreciable.

Los resultados en torno a la complejidad son aún más bajos, el 44 % del alumnado no presenta relaciones cruzadas relevantes, incluyendo en la mayoría de los casos repeticiones de términos. Tan solo un 22 % del profesorado en formación conectó en sus mapas varias relaciones cruzadas relevantes, representando correctamente la complejidad del tema. En la figura 8 se pueden observar dos ejemplos de mapa, con nivel bajo (a) y alto (b) de jerarquía y complejidad.

Con respecto a los tipos de relaciones relevantes en torno al CC que se muestran en los mapas (ver figura 9), debemos destacar que casi la totalidad del alumnado parece ser conscientes de las relaciones dinámicas que se producen en este sistema y un 64 % lo hace explicándolo adecuadamente. También que en una gran parte de los mapas se aprecian las relaciones de este problema con las consecuencias ambientales, aunque los que lo hacen bien baja al 11 %. Las relaciones con las consecuencias sociales parecen ser, asimismo, importantes para esta muestra: después de la experiencia didáctica, la refleja en sus mapas un 92 %, y un 28 % lo hace adecuadamente.

Las relaciones más complejas obtienen resultados peores. Un 22 % no incluye la necesidad de cambios estructurales. También falta representación de la relación con otros procesos globales del cambio ambiental global (falta en un 33 %) y se detecta la ausencia de proyecciones de futuro, que no hizo el 42 % del profesorado en formación.

La detección de ideas alternativas en los mapas conceptuales mostró problemas en la comprensión de los procesos, destacando que: seis personas relacionaron el CC con la pérdida de la capa de ozono; dos defendieron que el CC provoca el efecto invernadero; y otras dos incluyeron los sumideros de carbono como una causa. Además, cuatro personas incluyeron la huella de carbono como una consecuencia de este problema socioambiental en vez de asumirla como una causa.

DISCUSIÓN

Tal y como reflejan los marcos competenciales analizados (EU, 2022; IUCN, 2004; OECD, 2023; UNESCO, 2017), el PS es una competencia científica clave que debe ser desarrollada a lo largo de la formación básica. En estos marcos podemos observar las distintas habilidades que es necesario desarrollar: comprender y analizar las relaciones entre las partes y los procesos del sistema y su carácter dinámico; considerar las diferentes dimensiones implicadas (naturales y sociales) y las escalas geográficas (local, nacional, global); asumir la complejidad y entender el sistema como un «todo» (teniendo en cuenta sus características como sistema); pensar temporalmente para evaluar los impactos en diferentes dimensiones y escalas; y tomar decisiones.

Si bien es necesario señalar que pensar temporalmente tan solo es incluida en los dos marcos más recientes (EU, 2022; OECD, 2023), desde nuestra perspectiva se trata de una habilidad importante, ya que puede ayudar a realizar proyecciones de futuro considerando los riesgos inherentes a las características y dinámica de un sistema, de forma que puede contribuir a considerar principios de precaución en la toma de decisiones. Porque, tal y como reflejan los marcos analizados, el PS está íntimamente relacionado con la capacidad de analizar alternativas y tomar decisiones responsables.

La revisión de estos marcos nos ayuda a identificar las habilidades del PS que es necesario potenciar desde etapas iniciales (Lee et al., 2019). En este proceso, el profesorado tiene un papel fundamental, ya que, como señalan estos autores, debe tener un buen conocimiento sobre los sistemas complejos en contextos científicos y ambientales, para poder acercar a su alumnado formas, patrones y procedimientos. Los resultados recogidos en esta investigación muestran un incipiente conocimiento sobre la complejidad sistémica del CC. Pero también permiten apreciar que no todas las personas fueron capaces de alcanzar los niveles superiores de esta competencia, coincidiendo así con estudios similares (York et al., 2019; Lorenzo Rial et al., 2024), que muestran que las habilidades más complejas del PS son difíciles de abordar para el profesorado en formación.

El análisis de los datos sugiere que, tras la experiencia, el profesorado en formación es consciente de las dimensiones ambientales y sociales implicadas en el CC, que Wiek et al. (2011) relacionan con personas capaces de comprender los sistemas complejos implicados en la sostenibilidad. Sus mapas conceptuales también parecen mostrar que han comprendido el carácter dinámico de sus relaciones, que también es una habilidad fundamental del PS (Assaraf y Orion, 2005; Roychoudhury et al., 2017). Aunque también se observan ciertas lagunas en relación con la comprensión de procesos implicados en el CC (procesos de radiación, efecto invernadero, sumideros de carbono), origen (huella de carbono) y consecuencias (efectos en la salud), a pesar de haber realizado actividades específicas para mejorar su comprensión. Estas lagunas e ideas alternativas son relativamente frecuentes en la literatura y reflejan la necesidad de invertir tiempo y actividades específicas para mejorar los modelos mentales del profesorado (Boon, 2016).

Un rasgo importante de los sistemas, que sí está plasmado en la mayoría de los mapas realizados, son los mecanismos de retroalimentación positiva (Zulauf, 2007), que puede indicar que la mayoría ha comprendido la sinergia dinámica entre la pérdida de bosques y permafrost y el CC. A pesar de ello, se detecta falta de comprensión del sistema como un todo, que se plasma en que un 34 % sigue sin vincular la relación de este problema socioambiental con otro proceso global estudiado como es la pérdida de la biodiversidad.

Otra habilidad compleja del PS es el pensamiento temporal. El análisis de los datos sugiere que una parte importante del alumnado no lo está teniendo en cuenta en su abordaje del CC. Así, el 48 % del profesorado en formación no incluye los posibles escenarios climáticos en sus mapas ni su relación con las soluciones. Aunque en sus esquemas sí apareció en un 83 % de las veces la solución en forma de necesidad de transformaciones estructurales, a través bien de desarrollo sostenible, bien de decrecimiento.

Estos resultados están en consonancia con otros hallados en la literatura, que muestran cómo esta competencia requiere un desarrollo gradual, que no se está llevando a cabo adecuadamente en los planes de estudio, especialmente en relación con el CC (Roychoudhury et al., 2017; Lorenzo Rial et al., 2024). Sería necesario, por tanto, mejorar su formación integrando de forma transversal el desarrollo de esta competencia, donde la adquisición de conocimiento científico es un elemento importante para comprender los procesos naturales implicados y la influencia de las actividades humanas en ellos, para tomar decisiones y actuar en un mundo antropocéntrico (OCDE, 2023).

Por último, hay que destacar la cautela con la que deben tomarse estos resultados. Por su naturaleza, presenta limitaciones que es necesario considerar. Se trata de una experiencia piloto de corta duración, con una muestra reducida de características muy definidas que sería necesario ampliar y extender a otros colectivos. Además, el análisis de los mapas conceptuales, a pesar de estar basado en criterios objetivos, puede presentar sesgos de las personas implicadas en su investigación.

CONCLUSIONES E IMPLICACIONES EDUCATIVAS

El análisis del marco educativo internacional muestra que el PS es considerado una competencia científica fundamental para tomar decisiones y encontrar soluciones para la crisis socioecológica actual. Su desarrollo puede favorecer la necesaria aplicación de principios de precaución en un escenario de gran incertidumbre como es el cambio ambiental global. Por ello, es necesario poner en valor el desarrollo de propuestas que aborden esta problemática en la formación superior. La formación científica del profesorado, en este caso, se plantea como el contexto propicio para promover el conocimiento científico como base para comprender y generar acciones educativas que favorezcan la toma de decisiones responsable.

En la propuesta presentada se promueve la introducción de la complejidad en la comprensión de los problemas socioambientales. El desarrollo del PS requiere acciones formativas secuenciales que introduzcan las relaciones entre procesos naturales y humanos y las dinámicas del sistema de forma gradual. De forma que se invite a ver el mundo como una entidad compleja con múltiples relaciones implicadas (Calafell y Banqué, 2017). Así, se puso especial hincapié en mejorar la comprensión de procesos naturales complejos vinculados con el CC e introducir dinámicas interrelacionadas entre este problema y las actividades humanas. También se abordaron retroalimentaciones positivas y puntos de inflexión, que pueden ayudar a comprender la complejidad de sus procesos y la dificultad que entraña conocer las consecuencias futuras de los cambios que está provocando el ser humano en la actualidad.

Como puede extraerse de los resultados, comprender el CC desde la perspectiva de la complejidad no es sencillo. Por ello, es fundamental seguir creando propuestas con un nivel de complejidad creciente, teniendo en cuenta las habilidades más avanzadas, como son el pensamiento temporal sobre el

CC o su entendimiento como un proceso incluido en el cambio ambiental global en interacción con otros procesos globales.

Además, es necesario tener en cuenta que tratar cuestiones sociocientíficas y socioambientales requiere de la preparación del futuro profesorado en el desarrollo de otras competencias (IUCN, 2004; UNESCO, 2017, GREENCOMP, 2022; OECD, 2023). En los marcos competenciales analizados, junto al PS, también aparecen el pensamiento crítico y la participación/acción colectiva. Ambas competencias están íntimamente relacionadas con las habilidades sistémicas de considerar las diferentes dimensiones implicadas (naturales y sociales), evaluar los impactos y tomar decisiones (figura 10). El desarrollo de pensamiento crítico conlleva la reflexión y análisis de la situación actual para entender cuál es el origen del problema y plantar la semilla de la inconformidad que impulse el cambio. La competencia de participación debe fomentar los movimientos colectivos, la escucha de otras perspectivas y el fomento de la solidaridad y los valores democráticos. Porque todo esto debe ir acompañado de la reflexión sobre los valores que están detrás de nuestras decisiones individuales y colectivas, de forma que nos alineemos con los derechos de las personas y del resto de seres vivos con justicia interespecies, intergeneracional e intrageneracional (Rockström et al, 2023). Por ello, una línea de investigación futura debería estar vinculada con el desarrollo de estas tres competencias de manera interrelacionada.



Fig. 10. Tres competencias básicas para la sostenibilidad. Fuente: elaboración propia.

Para finalizar, debemos destacar que el PS es la base para reconstruir la red de relaciones entre los sistemas ecológicos y sociales. Este proceso debe partir de un enfoque amplio, porque abordar el cambio ambiental global, de profundas raíces sociales, requiere basarse en el pensamiento científico, pero también incluir las dimensiones económicas, políticas, éticas y emocionales, de forma que se establezca la idea de urgencia ambiental en el imaginario colectivo y se impulse la acción hacia las transformaciones necesarias.

AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada dentro del Proyecto PID2023-147800OB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

REFERENCIAS

- Álvarez, S., Carleos, C. E., Corral, N., & Prieto, E. (2018). Metodología docente y rendimiento en PISA 2015: Análisis crítico. *Revista de Educación*, 379(4), 85-113.
<https://doi.org/10.4438/1988-592X-RE-2017-379-370>
- Assaraf, O. B.-Z. & Orion, N. (2005). Development of system thinking skills in the context of earth system education. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(5), 518-560.
<https://doi.org/10.1002/tea.20061>
- Bevan, J. (2022). Drought risk in the Anthropocene: From the jaws of death to the waters of life. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 380(2238), 20220003. <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0003>
- Bielik, T., Delen, I., Krell, M., & Assaraf, O. B. Z. (2023). Characterising the literature on the teaching and learning of system thinking and complexity in stem education: A bibliometric analysis and research synthesis. *Journal for STEM Education Research*, 6(2), 199-231.
<https://doi.org/10.1007/s41979-023-00087-9>
- Bonil, J., Junyet, M., & Pujol, R. M. (2010). Educación para la sostenibilidad desde la perspectiva de la complejidad. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 7(1), 198-215.
<https://revistas.uca.es/index.php/eureka/article/view/2644/2293>
- Boon, H. J. (2016). Pre-Service Teachers and Climate Change: A Stalemate? *Australian Journal of Teacher Education*, 41(4), 39-63. <https://doi.org/10.14221/ajte.2016v41n4.3>
- Brandstädter, K., Harms, U., & Großschedl, J. (2012). Assessing System Thinking Through Different Concept-Mapping Practices. *International Journal of Science Education*, 34(14), 2147-2170.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2012.716549>
- Brundiers, K. et al. (2021). Key competencies in sustainability in higher education—Toward an agreed-upon reference framework. *Sustainability Science*, 16(1), 13-29.
<https://doi.org/10.1007/s11625-020-00838-2>
- Calafell, G. & Banqué, N. (2017). Caracterización de las concepciones de complejidad de un grupo de investigadores de la educación ambiental. *Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas*, 35(1), Article 1. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.1909>
- Chomsky, N., Pollin, R., & Polychroniou, C. J. (2020). *Climate Crisis and the Global Green New Deal: The Political Economy of Saving the Planet*. Verso Books.
- Daniels H., Edwards, Y. E., Gallagher, T., & Ludvigsen, S. R. (Eds.) (2009). *Activity theory in practice. Promoting learning across boundaries and agencies*. Routledge
- Demssie, Y. N., Wesselink, R., Biemans, H. J. A., & Mulder, M. (2019). Think outside the European box: Identifying sustainability competencies for a base of the pyramid context. *Journal of Cleaner Production*, 221, 828-838. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.255>
- Dugan, K. E., Mosyjowski, E. A., Daly, S. R., & Lattuca, L. R. (2022). Systems thinking assessments in engineering: A systematic literature review. *Systems Research and Behavioral Science*, 39(4), 840-866. <https://doi.org/10.1002/sres.2808>
- European Union (2022). *GreenComp. The European sustainability competence framework*. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bc83061d-74ec-11ec-9136-01aa75ed71a1/language-es>
- Fischer, D., King, J., Rieckmann, M., Barth, M., Büssing, A., Hemmer, I., & Lindau-Bank, D. (2022). Teacher Education for Sustainable Development: A Review of an Emerging Research Field. *Journal of Teacher Education*, 73(5), 509-524. <https://doi.org/10.1177/00224871221105784>
- Glasser, H. & Hirsh, J. (2016). Toward the Development of Robust Learning for Sustainability Core Competencies. *Sustainability*, 9(3), 121-134. <https://doi.org/10.1089/SUS.2016.29054.hg>

- Gómez, C. (2018). Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Una revisión crítica. *Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*, 140, 107-118.
https://www.fuhem.es/wp-content/uploads/2018/12/ODS-revision-critica-C.Gomez_.pdf
- Hickel, J. (2021). What does degrowth mean? A few points of clarification. *Globalizations*, 18(7), 1105-1111. <https://doi.org/10.1080/14747731.2020.1812222>
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- IUCN (2004). *Engaging people in sustainability*. The World Conservation Union.
<https://ue4sd.glos.ac.uk/downloads/EngagingPeople.pdf>
- Izquierdo, M., Espinet, M., García, M. P., & Pujol, R. M. (1999). Caracterización y fundamentación de la ciencia escolar. *Enseñanza de las Ciencias, Extra*, 79-92.
- Jacobson, M. J., Markauskaite, L., Portolese, A., Kapur, M., Lai, P. K., & Roberts, G. (2017). Designs for learning about climate change as a complex system, *Learning and Instruction*, 52, 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.03.007>
- Klein, N. (2015). *This changes everything: Capitalism vs. The climate*. Simon and Schuster.
- Kogetsidis, H. (2023). Systems methodologies for handling problem complexity. *International Journal of Organizational Analysis*, 31(5), 1814-1825. <https://doi.org/10.1108/IJOA-08-2021-2931>
- Lee, T. D., Gail Jones, M., & Chesnutt, K. (2019). Teaching Systems Thinking in the Context of the Water Cycle. *Research in Science Education*, 49(1), 137-172.
<https://doi.org/10.1007/s11165-017-9613-7>
- Lavrini, O., Tasquier, G., Barelli, E., Laherto, A., Palmgren, E., Branchetti, L., & Wilson, C. (2021). Recognition and operationalization of Future-Scaffolding Skills: Results from an empirical study of a teaching-learning module on climate change and futures thinking. *Science Education*, 105(2), 281-308. <https://doi.org/10.1002/sce.21612>
- López, F. (2022). El enfoque del currículo por competencias. Un análisis de la LOMLOE. *Revista Española de Pedagogía*, 80(281), 55-68. <https://doi.org/10.22550/REP80-1-2022-05>
- Lorente, S., Canales, I., & Murillo, B. (2023). Whole Systems Thinking and Context of the University Teacher on Curricular Sustainability in Primary Education Teaching Degrees at the University of Zaragoza. *Education Sciences*, 13(4), 341. <https://doi.org/10.3390/educsci13040341>
- Lorenzo-Rial, M., Varela-Losada, M., Pérez-Rodríguez, U., & Vega-Marcote, P. (2025). Developing Systems Thinking to Comprehensively Address Climate Change and Ocean Acidification: An Educational Proposal for Trainee Teachers. En W. Leal Filho, M. Sima, A. Lange Salvia, M. Kovaleva, & E. Manolas (eds), *University Initiatives on Climate Change Education and Research*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25960-9_105-1
- Lorenzo-Rial, M.-A., Varela-Losada, M., Pérez-Rodríguez, U., & Vega-Marcote, P. (2024). Developing systems thinking to address climate change. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 26(1), 83-100. <https://doi.org/10.1108/IJSHE-12-2022-0404>
- McGraw, K. O. & Wong, S. P. (1996). Forming inferences about some intraclass correlation coefficients. *Psychological Methods*, 1(1), 30-46. <https://doi.org/10.1037/1082-989X.1.1.30>
- Meadows, D. (2008). *Pensar en sistemas*. Capitán Swing.
- Morin, E. & Petit, N. (2011). *La vía: Para el futuro de la humanidad*. Paidós.
- National Research Council (2012). *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13165>
- OECD (2023). *PISA 2025 Science framework*. OECD. <https://pisa-framework.oecd.org/science-2025/>

- Pegalajar, M. del C., Burgos, A., & Martínez, E. (2021). What Does Education for Sustainable Development Offer in Initial Teacher Training? A Systematic Review. *Journal of Teacher Education for Sustainability*, 23(1), 99-114. <https://doi.org/10.2478/jtes-2021-0008>
- Portney, L. G. & Watkins, M.P. (2000). *Foundations of clinical research: application to practice*. Upper Saddle River.
- Rockström, J. et al. (2023). Safe and just Earth system boundaries. *Nature*, 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>
- Roychoudhury, A., Shepardson, D. P., Hirsch, A., Niyogi, D., Mehta, J., & Top, S. (2017). The Need to Introduce System Thinking in Teaching Climate Change. *Science Educator*, 25(2), 73-81.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., De Vries, W., & De Wit, C. A. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Streiling, S., Hörsch, C., & Rieß, W. (2021). Effects of teacher training in systems thinking on biology students—An intervention study. *Sustainability*, 13(14), 7631. <https://doi.org/10.3390/su13147631>
- UNESCO (2017). *Educación para los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Objetivos de aprendizaje*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (UNESCO).
- Vanbelle, S. (2016). A New Interpretation of the Weighted Kappa Coefficients. *Psychometrika*, 81(2), 399-410. <https://doi.org/10.1007/s11336-014-9439-4>
- Varela-Losada, M., Arias-Correa, A., & Vega-Marcote, P. (2019). Educar para el cambio y la sostenibilidad: evaluación de una propuesta de aprendizaje experiencial para formar al profesorado en formación inicial. *Revista Portuguesa de Educação*, 32(2), 57-73. <https://doi.org/10.21814/rpe.15303>
- Vitousek, P. M. (1994). Beyond global warming: Ecology and global change. *Ecology*, 75(7), 1861-1876.
- Watanabe, G., Subirà, G. C., & Marín, F. R. (2022). ¿Cómo incorporamos la complejidad en actividades de educación científica y ambiental? *Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas*, 40(2), Article 2. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3504>
- Wesselbaum, D. & Aburn, A. (2019). Gone with the wind: International migration. *Global and Planetary Change*, 178, 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.04.008>
- Wiek, A., Withycombe, L., & Redman, C. L. (2011). Key competencies in sustainability: A reference framework for academic program development. *Sustainability Science*, 6(2), 203-218. <https://doi.org/10.1007/s11625-011-0132-6>
- Yoon, S. A., Goh, S. E., & Park, M. (2018). Teaching and learning about complex systems in K-12 science education: A review of empirical studies 1995-2015. *Review of Educational Research*, 88(2), 285-325. <https://doi.org/10.3102/0034654317746090>
- York, S., Lavi, R., Dori, Y. J., & Orgill, M. (2019). Applications of Systems Thinking in STEM Education. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2742-2751. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00261>
- Zulauf, C. A. (2007). Learning to think systemically: What does it take? *The Learning Organization*, 14(6), 489-498. <https://doi.org/10.1108/09696470710825105>

Systems Thinking as a Key Scientific Competence in the face of Global Environmental Change

Mercedes Varela-Losada, María A. Lorenzo-Rial, Nuria Castiñeira-Rodríguez y Uxío Pérez-Rodríguez
Departamento de Didácticas Especiales, Universidade de Vigo, Pontevedra, España
mercedesvarela@uvigo.es, marialorenzo@uvigo.es, nuria.castineira@uvigo.es, uxio.perez@uvigo.es
ORCID:

Human interaction with the Earth and the resulting impact of human activities have destabilised its natural subsystems, generating a situation of chaos and uncertainty (Bevan, 2022). Climate change is a key aspect of this situation, for it accelerates the loss of biodiversity and the ocean acidification process. These significant changes to the structure and operation of the Earth system are the reason for the term *global environmental change* (Vitousek, 1994). The situation originates from a development model centred on economic growth, consumerism, and the illusion of technological control (Klein, 2015; Morin & Petit, 2011) in an unjust, neoliberal capitalist system (Chomsky et al., 2020). Against this backdrop, we need to transform our society to reduce economic activity, its ecological impact and its resulting inequality (Hickel, 2021).

Education plays a pivotal role here, with goals linked to competence development (UNESCO, 2017). Addressing global environmental change requires considering the planet as an interconnected, dynamic, time system (Lorenzo-Rial et al., 2025) and integrating an understanding of its multiple causes, consequences, interrelationships, and time dimensions (Bonil et al., 2010). Several international frameworks recognise systemic thinking (ST) as a key competence in this scenario (European Union, 2022; OECD, 2023; UNESCO, 2017). Systems are sets of interrelated elements that interact to give rise to particular behavioural patterns. They are organised in a coherent way to achieve an end, and the elements and their functions are maintained as a whole by the interaction of their parts (Meadows, 2008).

In this context, the research was conducted in two phases.

1. The analysis of ST as defined in four competency frameworks (European Union, 2022; IUCN, 2004; OECD, 2023; UNESCO, 2017), starting from the conceptualisations of science didactics (Assaraf & Orion, 2005) and sustainability (Wiek et al., 2011). This approach allowed us to identify ST as a key scientific competence for responsible decision-making, as well as some ST sub-skills:
 - (i) understanding dynamic system relationships and processes;
 - (ii) considering natural and social dimensions and geographic scales;
 - (iii) embracing complexity and understanding the system as a «whole»;
 - (iv) temporal thinking; and
 - (v) impact assessment and decision-making.
2. The assessment of these sub-skills in future primary school teachers (36 students) through a didactic proposal on climate change. The activities included creating diagrams, analysing news articles, conducting feedback studies and producing climate projections. ST skills were assessed using concept maps created by the students, based on the following parameters: number of concepts used, hierarchy, relational complexity, and types of relationships.

The results showed that trainee teachers had only a basic understanding of the systemic complexity of climate change, which needs to be improved. Understanding this problem from a complex perspective is not simple. Therefore, it is essential to continue creating increasingly complex proposals that consider more advanced skills, such as temporal thinking, and its role in global environmental change.

Furthermore, it is important to remember that dealing with socio-scientific issues requires future teachers to develop other competencies. Alongside ST, critical thinking and participation also play a role. Critical thinking involves reflecting on and analysing the current situation in order to understand the origin of the problem and encourage non-conformity, which drives change. Participation competence should encourage collective movements by listening to other perspectives and fostering solidarity and democratic values. All of this must be accompanied by respect for people's rights and those of other living beings, with interspecies, intergenerational and intragenerational justice (Rockström et al., 2023). Therefore, future research should focus on developing these three competencies in an interconnected way.

