


Artículo

Global Sustainability Crossroads: Un juego de simulación participativa para educar en los desafíos de la energía y la sostenibilidad del siglo XXI

Íñigo Capellán-Pérez ^{1,2},  **David Álvarez-Antelo**¹ Y **Luis J. Miguel** ^{1,2}

¹Grupo de Investigación en Energía, Economía y Dinámica de Sistemas, Escuela de Ingenierías Industriales, Paseo del Cauce s/n, Universidad de Valladolid, 47011 Valladolid España.

² Ingeniería de Sistemas y Control Automático, Escuela de Ingenierías Industriales, Paseo del Cauce s/n, Universidad de Valladolid, 47011 Valladolid, España.

*Correspondencia: inigo.capellan@uva.es; ljmiguel@eii.uva.es

Recibido: 13 de Junio del 2019; Aceptado: 2 de Julio del 2019; Publicado: 4 de Julio del 2019

Artículo traducido al castellano* del original:

Capellán-Pérez, I., Álvarez-Antelo, D., Miguel, L.J., 2019. *Global Sustainability Crossroads: A Participatory Simulation Game to Educate in the Energy and Sustainability Challenges of the 21st Century*. Sustainability 11, 3672. <https://doi.org/10.3390/su11133672>

*Traducción: Judith de Caso Arés.



Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid

<http://www.geeds.es/>

Resumen: Existe la necesidad de facilitar a los ciudadanos una comprensión del problema de la sostenibilidad global, con el doble propósito de concienciarlos sobre la gravedad del problema y ayudarlos a comprender mejor la complejidad de las soluciones. En este artículo se describe el diseño y la aplicación del juego de simulación participativa *Global Sustainability Crossroads*, basado en un modelo global de energía-economía-medio ambiente, que crea un entorno virtual en el que los participantes se enfrentan al diseño de estrategias de mitigación del cambio climático, así como a las consecuencias sociales, económicas y ambientales de las decisiones tomadas. La novedad del juego reside en el alcance global y la representación de las causas de las emisiones antropogénicas dentro del modelo *MEDEAS-World*, combinado con una dinámica de grupo de simulación participativa flexible que permite adaptarse a una diversidad de contextos y perfiles de participantes. La realización de 13 talleres con 420 jugadores ha demostrado que el juego desarrollado tiene un potencial pedagógico significativo, siendo capaz de generar debates sobre temas cruciales que normalmente están fuera del ámbito público, como la relación entre el crecimiento económico y la sostenibilidad, el papel de la tecnología, cómo los deseos humanos están limitados por las dificultades biofísicas o la posibilidad de alcanzar puntos de inflexión climáticos en el futuro próximo.

Palabras clave: ludificación; modelización; cambio climático; educación ambiental; simulación participativa.

1. Introducción.

La actual crisis de sostenibilidad es un problema muy complejo que requiere medidas de control urgentes y radicales a nivel mundial [1-5]. Al acelerar la pérdida de biodiversidad, aumentar la alteración en ciclos naturales como el carbono (cambio climático), el nitrógeno o el fósforo, intensificar la degradación de los ecosistemas, etc., las sociedades humanas están degradando los sistemas y procesos naturales que sustentan la vida de los que dependemos para sostener nuestra propia existencia. Los puntos de inflexión climáticos, que se refieren a un umbral crítico en el que una pequeña perturbación puede alterar cualitativamente el estado o desarrollo de un componente del sistema del clima de la Tierra, pueden ser traspasados en las próximas décadas, lo que implica impactos a gran escala (peligrosos, incluso catastróficos) para los sistemas humanos y ecológicos [6]. En consecuencia, estamos arriesgando la continuidad de nuestras sociedades tal y como las conocemos [3, 7-9].

La transición hacia la sostenibilidad es, por lo tanto, un reto de naturaleza global y política. Además, hoy en día no existe ningún país que satisfaga las necesidades básicas de sus ciudadanos a un nivel globalmente sostenible de uso de los recursos naturales [10]. Por lo tanto, nosotros, como miembros de la mayoría de las sociedades humanas, y especialmente las del Norte Global, tenemos la responsabilidad y el deber de cambiar nuestro comportamiento y valores para así poder cubrir nuestras necesidades y deseos sin abusar de los recursos naturales ni degradar el medio ambiente y los procesos de la biosfera de manera irreversible (a una escala de tiempo de vida humana). De igual manera, para ser efectivas, las políticas de sostenibilidad requerirán de la cooperación activa de la población de contextos socio-económicos y regiones muy diferentes para modificar sus patrones individuales de consumo, así como para cumplir y colaborar con las medidas políticas promovidas por las instituciones políticas. Por consiguiente, es necesario facilitar a los ciudadanos la comprensión del dilema de la sostenibilidad, con el doble propósito de sensibilizarlos sobre la gravedad del problema y, al mismo tiempo, ayudarlos a comprender mejor la complejidad de las soluciones. La

educación de las generaciones futuras en estos conceptos es también clave para lograr futuros caminos sostenibles [11].

La comprensión del dilema de la sostenibilidad se ve desafiada por el hecho de que las sociedades humanas y la biosfera forman sistemas complejos que son “dinámicos, estrechamente acoplados, no lineales, dominados por retroalimentaciones, auto-organizados, adaptables, y en evolución”, mientras que “nuestros modelos mentales tienden a ser estáticos y restringidos” en el tiempo, espacio y las interconexiones afectadas [12]. De hecho, los modelos mentales de sistemas complejos pueden estar sesgados por información errónea, pero también por factores no explícitos como la ignorancia, los intereses creados, los errores de juicio y los prejuicios. Por lo tanto, es probable que los modelos mentales representen incorrectamente la dinámica de las interacciones entre humanidad y naturaleza [12-14]. Estos modelos simplistas pueden describirse como “ilusiones cognitivas” que dificultan la correcta comprensión de estas dinámicas. Las limitaciones para entender sistemas complejos dificultan a su vez nuestra capacidad para proponer medidas políticas efectivas para la crisis de sostenibilidad [13,15-18]. Así, la investigación anterior ha demostrado que no solo los alumnos de todas las edades, sino también los propios profesores tienen muchos conceptos erróneos y malentendidos sobre estos temas [19].

Después de cuatro décadas de política y gobernanza ambiental a nivel internacional, tras la primera Cumbre de la Tierra celebrada en Estocolmo en 1972 [20], intensificada durante los últimos 20 años (Cumbre de la Tierra en Río Janeiro en 1992, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el Convenio sobre la Diversidad Biológica, los Objetivos de Desarrollo Sostenible, etc.), las sociedades humanas estamos degradando cada vez más el medio ambiente [4,5, 25]. Por consiguiente, las tendencias de insostenibilidad no se han invertido (niveles crecientes de consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), pérdida de bosques y biodiversidad, etc.) lo que revela que los principales factores de insostenibilidad aún no se han abordado. La inefectividad de las políticas ambientales actuales se ha asociado con un enfoque centrado en los “síntomas”, revelando “un fallo generalizado del pensamiento sistémico” [12].

Por otra parte, los investigadores han señalado las desventajas de la enseñanza tradicional de las ciencias, a saber, que es probable que el interés y la voluntad de los estudiantes disminuyan cuando su aprendizaje se descontextualice y requiera principalmente memorización rutinaria. Como resultado, los estudiantes no están preparados con los conocimientos y habilidades necesarios para el siglo XXI, como el pensamiento crítico y la capacidad de resolver problemas complejos e interconectados. En este contexto, el aprendizaje mediante juegos digitales en el contexto de simulaciones participativas ha sido recomendado como un enfoque prometedor para la implementación de la educación científica [26,27]. En particular, los avances computacionales apoyan la modelización y el estudio de complejos fenómenos científicos, haciendo posible el estudio de eventos con causas y resultados complejos [18,28].

La ludificación es la aplicación de elementos de diseño de juegos y principios de juegos a contextos no relacionados con los juegos con el objetivo de mejorar los resultados en la comprensión y el comportamiento de los participantes. La participación activa en el proceso y motivación adicional son algunas de estas ventajas que facilitan el aprendizaje en comparación con los métodos más convencionales. Los participantes sienten que son dueños de su aprendizaje y lo controlan, son libres de fracasar e intentarlo de nuevo sin repercusiones negativas: los jugadores toman sus propias decisiones y ven el impacto de estas decisiones. Los juegos permiten visualizar y ver las consecuencias de esas acciones en momentos diferentes en el tiempo, provocando experiencias que se conectan con una variedad de emociones humanas, desde el miedo y la agresión hasta la alegría y la maravilla. Por lo tanto, la ludificación permite trabajar sobre las actitudes, conocimientos y valores que se promueven en la educación para el desarrollo, la sensibilización y la educación para una ciudadanía global. Sin embargo, la utilidad de este enfoque debe evaluarse caso por caso; la ludificación puede no ser efectiva para cada alumno o situación de aprendizaje [29-34].

En las últimas décadas, se han diseñado y aplicado con éxito diversos juegos centrados en la problemática de la sostenibilidad con el fin de facilitar la comprensión de cuestiones medioambientales como la conservación del agua, el cambio climático y la contaminación, a escalas diferentes (local, regional, global) que varían enormemente en formato, sofisticación técnica y precisión científica [34,35]. Este trabajo describe el juego de simulación participativa *Global Sustainability Crossroads*, que representa un avance en relación a los juegos ya existentes a través de su alcance global y la modelización dinámica de las causas de las emisiones antropogénicas, que están integrados en una simulación participativa dinámica lo suficientemente flexible como para adaptarse a una diversidad de contextos. El juego se basa en el modelo *MEDEAS-World* que es un modelo global de energía-economía-medio ambiente (o modelo de evaluación integrado) de una región, diseñado aplicando la Dinámica de Sistemas [36]. Esta metodología ha demostrado ser particularmente adecuada para comprender y abordar adecuadamente los múltiples factores interrelacionados que intervienen en la crisis de sostenibilidad y evitar la “resistencia a las políticas”, es decir, la tendencia a que una medida política sea contrarrestada por la respuesta del sistema a la propia intervención [12,14-37]. El modelo *MEDEAS-World* tiene en cuenta numerosas conexiones entre los sistemas económico, energético y ambiental, vinculando las restricciones biofísicas (disponibilidad de materiales, tierra y energía neta; impactos del cambio climático, etc.) con el sistema económico.

Aunque en el mundo real las políticas se aplican a nivel local/nacional, las limitaciones ambientales son globales. Así, cualquier política de sostenibilidad debe tener en cuenta para ser efectivo el axioma popular ecologista “pensar globalmente, actuar localmente”. De esta manera, el objetivo tanto del modelo como del juego presentado en este documento es proporcionar orientación hacia la planificación estratégica en lugar de proporcionar recomendaciones de política precisas y detalladas. ¿Cuáles son las estrategias factibles/inviabiles para lograr con éxito la transición hacia un sistema energético sostenible? ¿Cuáles son los dilemas éticos de esta transición? ¿Cuáles son las implicaciones de tomar las diferentes rutas alternativas que se proponen en los ámbitos político-científicos, tales como el Crecimiento Verde (p.ej., [38-39]) o el Decrecimiento (p.ej., [40])? El juego desarrollado permite que otros objetivos relevantes sean cubiertos, tales como contribuir a cerrar la brecha entre la investigación científica y la sociedad civil (es decir, la difusión científica) así como familiarizar al público con los métodos participativos deliberativos.

Los objetivos de este artículo son describir las dinámicas del juego *Global Sustainability Crossroads* y evaluar cualitativamente su potencial pedagógico en tres dimensiones: comunicar las causas y la gravedad de la crisis de sostenibilidad y enmarcar las posibles soluciones, contribuir a cerrar la brecha entre ciencia y sociedad, así como contribuir al debate público de las opciones sociales que se tomarán bajo incertidumbre en las próximas décadas.

El texto está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 describe el juego participativo desarrollado, incluyendo un breve resumen del modelo en el que se basa el juego, la Sección 3 reporta los principales conocimientos adquiridos después de la realización del juego en términos de capacidad pedagógica, y la Sección 4 concluye.

2. Metodología

Esta sección incluye los antecedentes y la novedad del juego de simulación participativa desarrollado *Global Sustainability Crossroads*, así como describe la dinámica del juego y la interfaz gráfica.

2.1. Los antecedentes metodológicos y la novedad

Los juegos sobre temáticas desarrollo sostenible vienen siendo desarrollados en el mundo académico durante aproximadamente los últimos quince años y la ludificación se ha ido extendiendo progresivamente [34,35]. En relación con los juegos de simulación basados en modelos que se centran en la sostenibilidad, la mitigación del clima y la transición a las energías renovables, el campo se inauguró en la década de 1980, y ha ido en aumento desde entonces. Algunos ejemplos relevantes son:

- **STRATEGEM:** juego asistido por ordenador basado en el modelo de simulación *World3* [41-43], con la diferencia de que STRATEGEM solo representa una región (es decir, incluye el comercio) y cubre un periodo de 60 años [44-46];
- **FISHBANKS:** La versión original fue creada en 1986. Juego de simulación multijugador en el que los participantes juegan el papel de los pescadores y buscan maximizar su valor neto mientras compiten contra otros jugadores y se enfrentan a las variaciones en las poblaciones de peces y sus capturas [47];
- **LA Water Game:** Juego educativo de simulación que enseña la gestión de infraestructuras hídricas envejecidas en la ciudad de Los Ángeles (EE.UU.) [48];
- **World Climate:** Este juego ofrece una experiencia de juego de roles interactiva a través de la cual los participantes asumen el papel de delegados en las negociaciones de la ONU sobre el clima y se enfrentan al reto de crear un acuerdo que cumpla con los objetivos climáticos internacionales. Sus decisiones se introducen en el modelo C-ROADS, que proporciona retroalimentación inmediata sobre los impactos climáticos globales esperados, permitiéndoles aprender sobre el cambio climático mientras experimentan la dinámica social de las negociaciones [49,50] (Lucas et al., [51] proponen un juego similar, aunque sin aplicar un modelo);
- **World Energy:** Un juego de roles de negociación sobre el clima y la energía que promueve la comprensión de las causas del cambio climático global y los factores que podrían mitigarlo utilizando el modelo EN-ROADS como base. El objetivo principal del juego es llegar a un acuerdo entre las diferentes partes para limitar el cambio climático y garantizar que el aumento de la temperatura media mundial en el año 2100 sea inferior a 2° C [52].

Global Sustainability Crossroads representa un avance en relación con los juegos ya existentes a través de su alcance global y la modelización dinámica de las causas de las emisiones antropogénicas, que están integrados en una simulación participativa dinámica. El juego se basa en el modelo *MEDEAS-World* (véase el apéndice A), que es un modelo de evaluación integrado de una región desarrollado originalmente para proporcionar orientación política dentro de la UE a través del proyecto homónimo (<https://www.medeas.eu/>).

El modelo ha sido diseñado aplicando la Dinámica de Sistemas [36] que ha demostrado ser una metodología particularmente bien adaptada para comprender y abordar los múltiples e interrelacionados factores implicados en la crisis de sostenibilidad y evitar “la resistencia a las políticas” [12-14, 37]. El modelo considera numerosas conexiones entre los sistemas económico, energético y medioambiental, lo que permite una representación simplificada de la complejidad de

las relaciones energía-economía-clima. Identificando el sistema humanidad-naturaleza como un sistema complejo, la estrategia de modelización se centra más bien en las interacciones (retroalimentación) entre los componentes del sistema que en el detalle de los propios componentes. El modelo global estándar [36] se complementó con algunas características para mejorar la gama de características del juego, como la posibilidad de superar 5 puntos de inflexión climática; así, cada simulación equivale a “tirar los dados” (probabilidades derivadas de [53]).

El juego ha sido diseñado para incluir las tres dimensiones de la sostenibilidad: económica, social y ambiental [35], así como para seguir los criterios de Chen y Martin [54] para mejorar la capacidad pedagógica de la educación ambiental: (1) está dirigido al cambio y no solo a la adquisición de conocimientos, (2) revela patrones de comportamiento en un contexto del mundo real, (3) destaca las influencias tanto internas como externas en el comportamiento ambiental actual y (4) incluye un enfoque interactivo de resolución de problemas que exige una solución.

La dinámica desarrollada flexible, que puede ser adaptada caso por caso por los facilitadores de las sesiones permite llegar a un público objetivo amplio, desde los no expertos hasta los expertos y los responsables de la formulación de políticas, a partir de la escuela secundaria.

2.2. Descripción del juego de “Global Sustainability Crossroads”

El juego tiene dos fases principales: (1) simulación, y (2) asamblea, sesión informativa y conclusiones (véase la Figura 1).

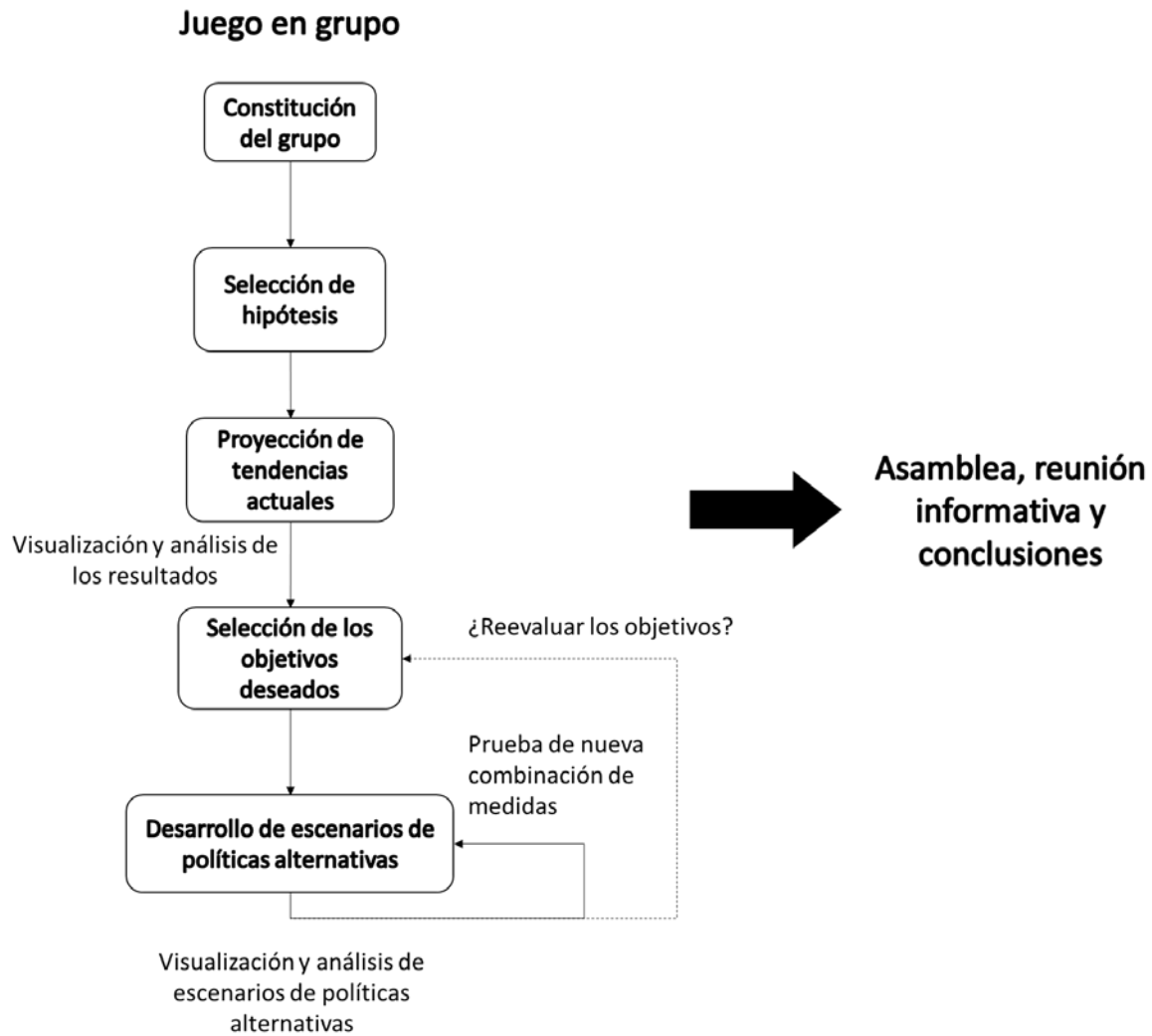


Figura 1. Pasos del juego *Global Sustainability Crossroads*. Vea el Material Complementario para los formularios usados en el juego.

El juego se desarrolla de la siguiente manera:

Constitución del grupo: Se elige un secretario y un portavoz por grupo, con el papel de tomar nota de los acuerdos y las decisiones tomadas, y de informar a la Asamblea, respectivamente. Un facilitador por grupo es asignado para guiar la dinámica del juego, ejecutar la interfaz del juego y resolver las eventuales cuestiones técnicas y conceptuales que puedan surgir durante el juego.

Selección de hipótesis: Las hipótesis se refieren a supuestos que están sujetos a incertidumbre y enmarcan el contexto en el que deberán tomarse las decisiones humanas en el futuro. A diferencia de las medidas políticas objetivo de las políticas, estos son factores que no se ven afectados por las decisiones humanas. Por lo tanto, una vez establecidas por cada grupo, las hipótesis no pueden ser modificadas durante el juego. Los participantes pueden decidir sobre dos hipótesis: la disponibilidad de recursos energéticos no renovables (petróleo, gas, carbón y uranio) y los daños causados por el cambio climático. Para ayudar a los participantes a seleccionar las opciones, se presenta un breve resumen del estado de la técnica científica para ambos temas [36,55]. En aras de la simplicidad y teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo, otras hipótesis suelen mantenerse fijas, aunque en las versiones modificadas del juego también podrían incorporarse (por ejemplo, el potencial tecnosostenible de las energías renovables, la sensibilidad climática, etc). El Material Complementario incluye el formulario cumplimentado en este paso (FORM1-HIP).

Proyección de las tendencias actuales: El juego invita a los participantes, por equipos, a proyectar las tendencias actuales hacia el futuro (es decir, en lenguaje técnico, para desarrollar su escenario inercial, BAU, del inglés *business-as-usual*). Con la ayuda de un facilitador por grupo pueden seleccionar las tendencias futuras de las variables sociales, políticas, tecnológicas y económicas en 12 dimensiones pertenecientes a diferentes áreas (economía, población, tecnologías energéticas, mejora tecnológica, transporte, reciclaje de minerales, etc.). Las elecciones tomadas para cada opción por el grupo son marcadas por el secretario en formularios impresos en papel. Para seleccionar un conjunto coherente de opciones es importante que los participantes imaginen qué narrativa (en el lenguaje de las Evaluaciones Ambientales Mundiales [56]) corresponde en términos generales al futuro que vislumbran. El Material Complementario incluye el formulario cumplimentado en este paso (FORM2-BAU).

Visualización y análisis de los resultados del BAU: Las opciones seleccionadas por el equipo se introducen en la interfaz del juego para ejecutar la simulación correspondiente. Los principales resultados son presentados a los jugadores por el facilitador que clarifica los eventuales puntos planteados. Esta fase permite a los participantes comprender los principales impulsores y dinámicas de las tendencias insostenibles en las que se basan para comenzar a desarrollar vías alternativas.

Selección de los objetivos deseados: A la luz de los resultados sociales y ambientales obtenidos a mediados del siglo XXI en el escenario de continuación de tendencias actuales BAU, cada equipo tiene que proponer al menos dos objetivos en términos de bienestar y sostenibilidad ambiental, aunque los participantes son libres de ampliar la lista de objetivos a medida que se desarrolla el juego. Esta visión se corresponde con el concepto de “economía del donut” [10,57]: así como hay límites planetarios más allá de los cuales se encuentra la degradación ambiental peligrosa para la humanidad, también hay límites sociales por debajo de los cuales se encuentran las privaciones de recursos que ponen en peligro el bienestar humano. La combinación de los límites internos de las fronteras sociales y los límites externos de las fronteras planetarias crea un espacio sostenible dentro del cual toda la humanidad podría prosperar siguiendo una serie de posibles caminos sostenibles [57]. Por lo tanto, se pide implícitamente a los participantes que encuentren una combinación de opciones alternativas que lleven a toda la humanidad por el camino seguro y justo de la sostenibilidad. El Material Complementario incluye el formulario cumplimentado en este paso (FORM3-OBJ).

Desarrollo de escenarios políticos alternativos: Para lograr los objetivos deseados, los jugadores tienen que desarrollar una narrativa alternativa consistente tomando elecciones para las mismas 12 dimensiones sociales, políticas, tecnológicas y económicas que en la fase de BAU. Después de un diálogo orientado a llegar a un consenso dentro del grupo, el programa de simulación muestra los resultados de sus decisiones. Si, en un primer intento, no se alcanzan los objetivos iniciales, los participantes pueden probar una nueva combinación de medidas (este proceso se prolonga hasta que finalice el tiempo o se alcancen los objetivos). Los objetivos auto-definidos pueden ser reconsiderados durante el juego. Un ejemplo de escenario reconfigurado que cubre las “necesidades básicas” (>30 GJ/persona/año) sin alcanzar un cambio climático peligroso (<1.5 °C) durante el período de tiempo que el análisis fue preparado por el equipo de desarrolladores con el fin de mostrarlo a aquellos grupos incapaces de alcanzar sus objetivos auto-establecidos. El Material Complementario incluye el formulario cumplimentado en este paso (FORM4-ALT).

Asamblea, sesión informativa y conclusiones: Al trabajo en grupo le sigue una asamblea donde todos los grupos se reúnen en la misma sala, y el portavoz de cada grupo comunica sucintamente al resto de los participantes cómo se ha desarrollado el juego para su equipo, qué resultados se han obtenido, su reacción y opinión, comentarios, etc. Después de la visión general de cada portavoz de grupo, se establece un debate general (20-30 min.) asistido por los facilitadores, para llevar a las conclusiones generales que se obtienen del juego.

Con relación a los objetivos deseados, se seleccionó el aumento de la temperatura media global como indicador medioambiental de referencia en el juego debido a la importancia del cambio climático como límite planetario “central” y a la ausencia de otros límites planetarios como la pérdida de biodiversidad o las interrupciones de los ciclos del nitrógeno y el fósforo en el modelo aplicado [4]. La evaluación del bienestar en los escenarios simulados se complica por el hecho de que el bienestar es un concepto muy complejo compuesto de muchas dimensiones que no están explícitamente representadas en el modelo *MEDEAS-World* (por ejemplo, salud, educación, sistema de gobierno, e igualdad). En consecuencia, hubo que adoptar un enfoque alternativo, centrado en la relación entre la energía y el desarrollo. De hecho, un suministro adecuado de energía ha sido identificado como un prerrequisito clave para un desarrollo económico, cultural y social en sociedades complejas [58-60]. La revisión de la literatura muestra que existe una fuerte correlación entre el uso de la energía y la calidad de vida en niveles bajos de uso de energía en las sociedades industriales. Sin embargo, después de superar un umbral, un mayor consumo de energía no se traduce claramente en un mejor nivel de vida [61]. Por estas razones, el uso final de energía per cápita se considera en el juego como un indicador de bienestar (vea Tabla 1). Sin embargo, también hay que tener en cuenta el hecho de que el bienestar tiene un fuerte componente cultural. Mencionar el uso actual final de la energía per cápita a nivel de promedio global (55 GJ/año/persona, es decir, 15.250 kWh) permite que el tema de la desigualdad global sea introducido en el juego.

Tabla 1. Uso final de la energía asociado a los diferentes puntos de referencia. IDH significa “Índice de Desarrollo Humano” un indicador compuesto de ingresos, esperanza de vida y educación [62,63]. Fuente: elaboración propia.

Uso de energía final (GJ/año/persona)	Valores de referencia
270	Media anual 1995-2008, huella energética final EE.UU. [36,61]
135	Media anual 1995-2008, huella energética final UE [36,61]
75	IDH > 0.8 para una regresión de 40 países para el período 1995-2009 [36,61]
30-40	Energía final para cubrir las “necesidades básicas” (alimentación adecuada, electricidad, abastecimiento de agua, saneamiento, y vivienda no marginal en zonas urbanas) [64]. Corresponde con un $0.7 < \text{IDH} < 0.8$
~25-30	Eco-aldea <i>Sieben Linden</i> (Alemania) [65]

El horizonte del análisis se establece a mediados de siglo (2050-80) por dos razones principales. En primer lugar, las evaluaciones científicas apuntan al hecho de que, para entonces, la descarbonización de la socioeconomía mundial debería haber progresado sustancialmente (<80% de emisiones de GEI con relación a 1990, siguiendo la Hoja de Ruta de la energía de la UE [66] o las recomendaciones del IPCC [2]), por lo que las medidas para evitar un cambio climático peligroso deberían comenzar rápidamente. En segundo lugar, desde el punto de vista del desarrollo tecnológico, las nuevas tecnologías requieren algunas décadas para pasar de los proyectos de I+D a la implantación comercial a gran escala. Esto hace que sea razonable considerar las tecnologías demostradas actuales.

El juego no es competitivo, es decir, los diferentes grupos no compiten entre sí para obtener los “mejores” resultados. Esto se debe a 3 razones principales: (1) cada grupo construye su propio BAU, por lo que los escenarios alternativos no son directamente comparables, ya que pretenden corregir un “futuro” diferente; (2) dada la inconmensurabilidad de las diferentes dimensiones de la transición hacia la sostenibilidad (ambiental, económica, social), no se puede obtener un óptimo con la herramienta de simulación; y (3) finalmente, los autores del juego creen que un cambio del paradigma

actual basado en la competencia hacia la cooperación será un ingrediente indispensable para lograr sociedades sostenibles y equitativas en el futuro. Por consiguiente, creemos que el juego debe ser coherente con esta visión, dado que la mayoría de los juegos comerciales ya son competitivos (como un reflejo de los valores sociales actuales).

Dependiendo del número de participantes, el tiempo disponible y el número de facilitadores, hasta la fecha se han implementado tres versiones del juego: (1) por grupos-1 sesión (máximo 6-8 participantes por grupo y facilitador), (2) sesión de asamblea- 1 sesión cuando la proporción de participantes por facilitador es significativamente mayor, y (3) por grupos- varias sesiones, esta última incluyendo los informes que deben entregarse entre las sesiones para justificar las decisiones tomadas. La principal diferencia operativa entre las 2 primeras versiones consiste en la forma en que se toman las decisiones en cada caso: cada grupo por consenso (aunque el facilitador puede forzar una votación para desbloquear la situación), o por votación con la ayuda de tarjetas impresas en la versión de asamblea. La tercera versión es mucho más intensiva en tiempo para los participantes y, hasta la fecha, se ha aplicado experimentalmente en una asignatura de una Facultad de Ingeniería (véase la Tabla A1). Una opción adicional sería el juego individual, que ha sido realizado internamente por los miembros del grupo de investigación que desarrolla el juego (véase la Sección 3 de Debate).

2.3. Descripción de la interfaz gráfica de "Global Sustainability Crossroads"

La interfaz del juego *Global Sustainability Crossroads* ha sido desarrollada utilizando el software propietario Sable Versión 5.1.507 (DEV) (UNICODE) (www.ventanasystems.co.uk), que permite el uso directo de los modelos dinámicos de sistemas desarrollados con el Software Vensim.

A través de un sistema de navegación entre pantallas, es posible acceder a las diferentes opciones para la selección de hipótesis y variables de escenario, así como a los gráficos de resultados de la simulación.

Las dos primeras pantallas permiten a los jugadores seleccionar las diferentes opciones implementadas para cada una de las hipótesis y los objetivos específicos de la política sectorial (vea Figura 2). Las opciones pueden ser cerradas o abiertas, algunas políticas permiten personalizar tanto el valor de la variable involucrada como el año de inicio de la política, como el logro del objetivo seleccionado. Para algunas opciones, como el crecimiento de las plantas de energía renovable o la futura tasa de reciclaje de materiales, es posible indicar la tasa individualmente para cada tecnología renovable o mineral, respectivamente.

The screenshot shows a complex web-based simulation interface. It features several panels for configuring different aspects of a model:

- T8: Desired installation level of capacity of renewable technologies for heat generation:** Offers four options (a-d) ranging from lower growth to higher growth than historical trends, with a 'Provide information per technology' option. Includes input fields for 'Start year growth RES heat' (2020) and 'Target year growth RES heat' (2025).
- T10: Technological change (dynamic trends of final energy efficiency per sector and for households):** Offers four options (a-d) from constant current values to lower efficiency than current trends. Includes a 'From the year' input field (0).
- T11: Recycling rates of minerals:** Offers three options (a-c) from constant current rates to broken-down responses by mineral. Includes input fields for 'Alternative technologies' (0) and 'Rest technologies' (0), both with 'from the year' fields (2020).
- T9: Inland transportation:** Offers two options (a-b) from continuation of oil reliance to significant shifts to gas and electric vehicles. Includes input fields for 'Time household vehicles policies start' (2020) and 'Time inland transport policies start' (2020).
- Simulated runs:** A central control area with buttons for 'Load runs', 'Clear runs', 'Select runs', 'View selected options', 'Load BAU options', and 'Ex sust pathway'.
- T12: Other GHG emissions than fossil fuel combustion (methane, land-use change, etc.):** Offers four options (a-d) from continuation of current trends to worsening of current trends.
- Inputs:** A section for setting simulation parameters: 'Set simulation Final time' (2060), 'Set temp objective' (1.5 °C), 'Set final energy per capita objective' (50 GJpc), and 'Time Step' (0.03125). Includes an 'Activate/deactivate switches' button.
- Outputs:** A section showing 'Simulation time' (2060) and buttons for 'Graphs', 'Table', and 'Figuras'.

Figura 2. Segunda pantalla para seleccionar hipótesis y entradas para realizar una simulación.

Después de seleccionar todas las opciones, los facilitadores proceden a la simulación del escenario (también es posible elegir el año final de la simulación), tras lo cual se genera un archivo con el nombre elegido y se puede pasar a las pantallas de resultados. En este punto, también es posible cargar simulaciones previamente guardadas.

En las pantallas de resultados, la primera pantalla muestra el nivel de consecución de los objetivos autodefinidos a lo largo del tiempo.

El resto de las ventanas (a las que se puede acceder a través de los botones de navegación en cualquier momento), presentan diferentes variables del modelo que son relevantes para entender la dinámica del escenario simulado y las razones por las que se han alcanzado (o no) los objetivos:

- Transición a las energías renovables: generación de energía renovable, extracción de energías no renovables, participación de las energías renovables en el mix energético, potencial restante de las fuentes de energía renovables.
- Dinámica del clima: emisiones de GEI, concentraciones de CO₂ equivalente (CO₂e), incremento de temperatura, posibles puntos de inflexión climática.
- Implicaciones: Necesidades de suelo para energías renovables, proporción del uso de agua azul frente a agua de escorrentía accesible, producto interior bruto per cápita (PIB per cápita), disponibilidad de minerales, tasa de retorno energética (TRE) del sistema, intensidad energética final total, intensidad energética física.
- Retroalimentación y límites al crecimiento: Pérdidas anuales de energía debidas a los impactos del cambio climático, variación de las necesidades energéticas para compensar la variación de la TRE, disponibilidad final de energía, PIB per cápita (Figura 3).

En cualquier momento, es posible volver a la pantalla de selección de opciones para ver las opciones seleccionadas, realizar una nueva simulación o cargar simulaciones previamente realizadas.

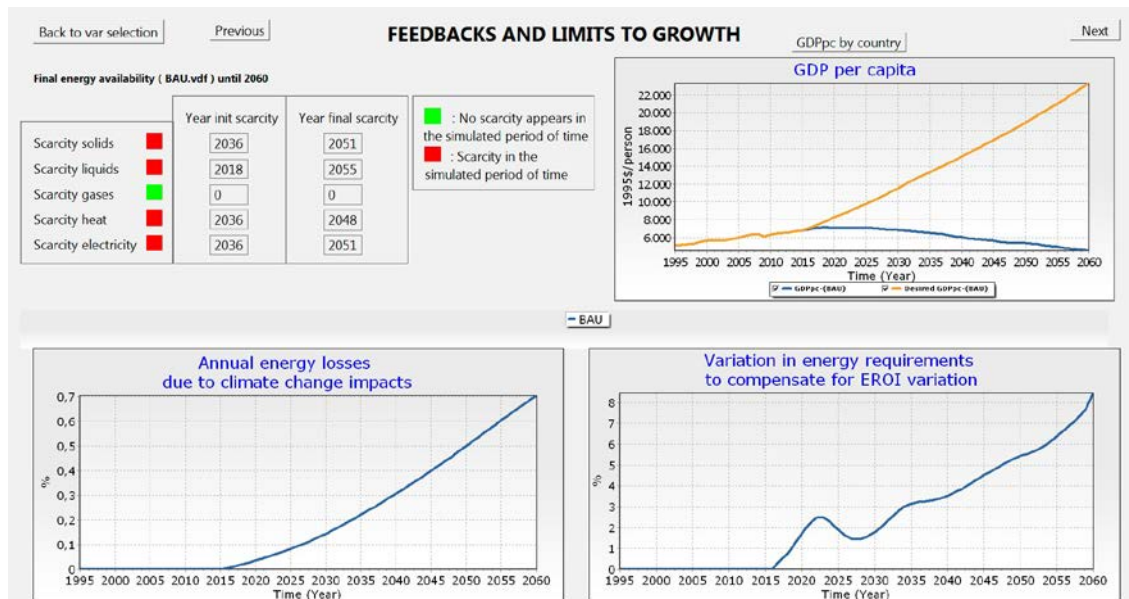


Figura 3. Ejemplo de ventana de salidas: “Retroalimentación y límites al crecimiento”.

3. Discusión de las perspectivas del desempeño del juego.

El juego *Global Sustainability Crossroads* se jugó por primera vez en septiembre del 2017 y hasta diciembre del 2018 se han realizado un total de 13 sesiones con 420 participantes en una diversidad de contextos con tipos heterogéneos de participantes en términos de nacionalidades, edad, experiencia, etc. Entre los jugadores había expertos, activistas informados, estudiantes y público en general de todas las edades (vea Tabla A1 y Figura 4). Los sucesivos talleres y la retroalimentación recibida de los participantes han permitido lograr un juego robusto, completo y atractivo para una diversidad de jugadores. Además, se desarrollaron diferentes variantes de la versión principal estándar para tener en cuenta la diversidad de contextos y limitaciones, como la disponibilidad de tiempo. Esta sección evalúa cualitativamente el rendimiento del juego a la luz de la experiencia de las sesiones de taller realizadas hasta la fecha.

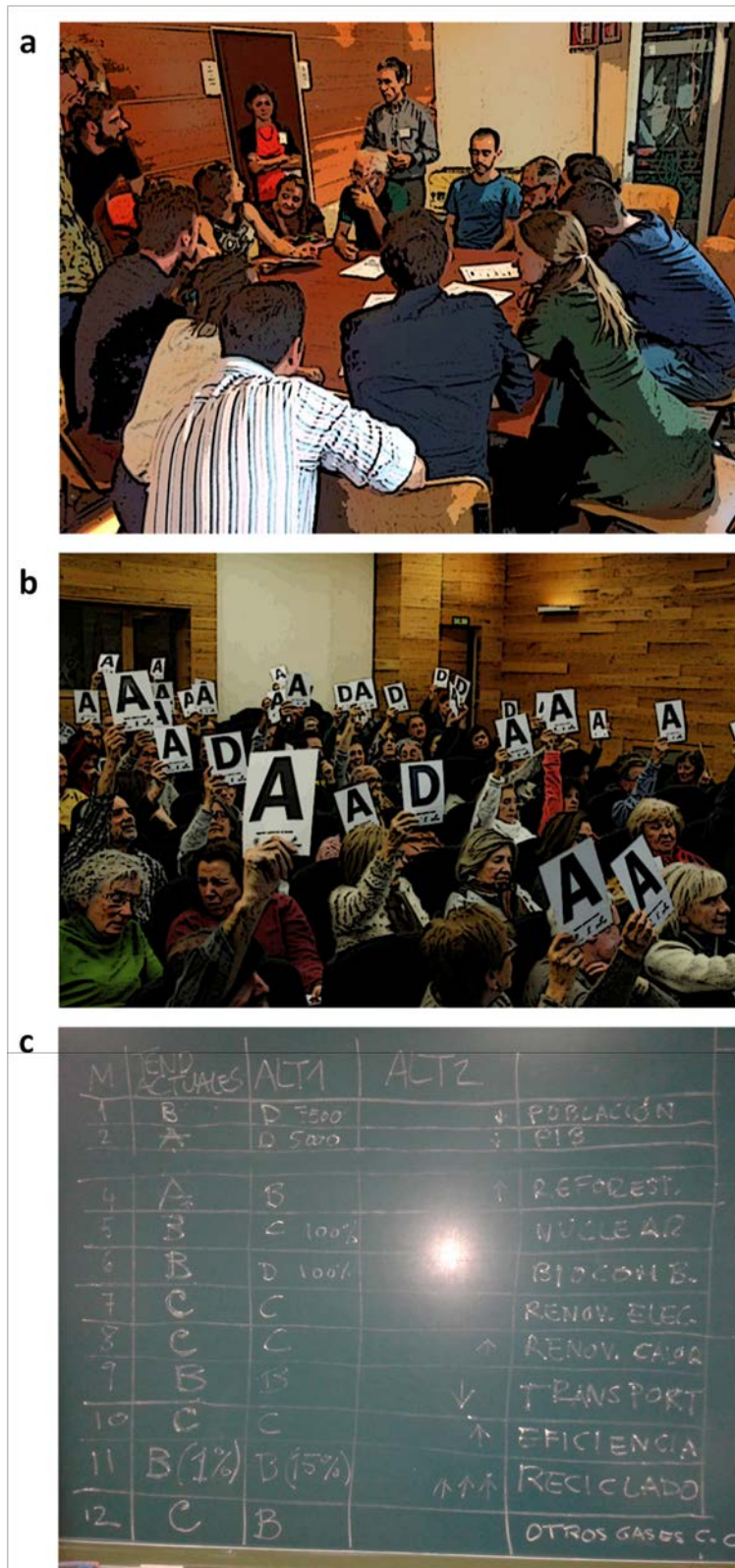


Figura 4. Fotos de 3 de los talleres de juegos realizados de *Global Sustainability Crossroads*: a) debate en grupo facilitado por moderadores de la Academia de Verano del Club de Roma (Florencia, Italia) (decisiones adoptadas por consenso en el seno del grupo); b) votación durante el taller del juego en la asamblea en el evento “Jugar a gobernar el Mundo” (Valladolid, España); c) medidas seleccionadas para el escenario de tendencias actuales y dos escenarios alternativos consecutivos por los participantes en el juego en la asamblea durante la 15ª Jornadas Técnicas y Feria de Bioconstrucción (Aínsa, España).

3.1. Capacidad pedagógica.

Como es bien sabido, el conocimiento por sí solo no es suficiente para lograr la protección del medio ambiente [67]. *Global Sustainability Crossroads* logra crear una trama virtual en la que los participantes se enfrentan a la responsabilidad de encontrar soluciones y diseñar estrategias, así como a las consecuencias sociales, económicas y ambientales de sus decisiones. Por lo tanto, los jugadores que entran en el juego experimentan una profunda motivación para resolver los problemas, estimulando una necesidad genuina para entender las raíces de los problemas en juego. Las simulaciones permiten a los participantes alterar parámetros para observar cómo cambia el sistema a nivel macro (interacciones, compensaciones, efectos no lineales). Las visualizaciones integradas en la interfaz del juego promueven el aprendizaje a través de la investigación.

Esta sección se centra en la capacidad pedagógica del juego, evaluada cualitativamente a través de la realización de las sesiones del juego, en tres dimensiones: la comprensión de los factores impulsores y las consecuencias de la crisis de sostenibilidad global, la capacidad de salvar la brecha entre ciencia y sociedad, y la capacidad de promover debates públicos sobre las opciones sociales que se tomarán en un contexto de incertidumbre en las próximas décadas.

3.1.1. Comprensión de la Crisis de Sostenibilidad Global y Elaboración de Posibles Soluciones.

El juego permite a los jugadores aprender cuáles son las principales causas y consecuencias de la crisis de Sostenibilidad Global, así como obtener información relacionada con la transición necesaria, como, por ejemplo:

- La importancia del desafío que el cambio climático representa para las sociedades humanas en las próximas décadas y siglos.
- La identificación del crecimiento económico como principal impulsor actual de la degradación del medio ambiente.
- El hecho de que el cambio climático y el agotamiento de los combustibles fósiles son cuestiones interrelacionadas: la transición energética debe realizarse en un contexto de menor disponibilidad y calidad de los recursos de combustibles fósiles.
- La necesidad de una rápida transición global hacia sistemas de energía renovable.
- Las implicaciones (negativas) de la transición a las energías renovables: (1) drenar la TRE del sistema, es decir, reducir la energía neta entregada a la sociedad, y (2) intensificar de la competencia por otros recursos naturales (tierra, materiales, etc.).
- La valoración de que los cambios tecnológicos son necesarios, pero no suficientes, por lo que deben complementarse con cambios significativos de comportamiento, culturales y sociales.
- La existencia de contradicciones en la transición hacia la sostenibilidad debido a la inconmensurabilidad de las diferentes dimensiones que lo componen: ambiental (por ejemplo, mitigación del clima, uso de la tierra y agua), económica (inversiones monetarias, bienestar, etc.) y social (por ejemplo, desigualdad). Por lo tanto, la transición hacia la sostenibilidad requerirá tomar decisiones teniendo en cuenta la dimensión ética e incluso filosófica.

- La dificultad de la formulación de políticas en un contexto de incertidumbre (por ejemplo, hipótesis del juego y puntos de inflexión climáticos).
- El hecho de que las actividades económicas y la demanda están limitadas por restricciones biofísicas.

La aplicación del enfoque de sistemas complejos en el juego permite a los participantes comprender las principales dinámicas del sistema global energía-economía-clima mediante la identificación de procesos de retroalimentación, mecanismos de acumulación e inercia, retardos de tiempo y no linealidades. Algunos de los resultados contraintuitivos que atrajeron la atención de los jugadores sobre los que el juego arroja luz fueron:

- ¿Por qué no se han alcanzado los objetivos deseados? (interacción de la mencionada escasez de tiempo con las limitaciones biofísicas como los impactos del cambio climático y la disponibilidad de recursos energéticos);
- ¿Cómo es posible que mientras las emisiones disminuyen, la temperatura siga aumentando? (dinámica de acumulación de carbono en la atmósfera, inercias);
- Un nuevo conjunto de tecnologías surgirá en pocos años y resolverá todos los problemas (dinámica de retrasos e inercias para las nuevas tecnologías ya mencionadas);
- ¿Por qué un crecimiento más rápido de las energías renovables implica una menor eficacia del sistema? (retroalimentación de la TRE del sistema, menor energía neta disponible para la sociedad);
- ¿Por qué si el aumento de temperatura alcanzado en esta simulación es menor que el anterior, ahora hemos superado un punto de inflexión climático y antes no? (evaluación probabilística, fenómenos catastróficos de baja probabilidad);
- ¡Es imposible encontrar un escenario sin colapso en este juego! (erróneamente, los participantes no pudieron identificar los puntos de influencia críticos del sistema).

3.1.2 Capacidad para salvar la brecha entre Ciencia y Sociedad.

Los temas arriba mencionados son centrales en la investigación científica actual, pero la mayoría permanecen fuera del ámbito público. Por lo tanto, el juego tiene una capacidad significativa para salvar la brecha entre ciencia y sociedad. El juego permite a los jugadores discutir conceptos paradigmáticos que sustentan el funcionamiento de nuestra sociedad, pero que rara vez se discuten públicamente, como el cambio tecnológico o el crecimiento económico. Por ejemplo, aunque el término “crecimiento económico” era conocido por la mayoría de los participantes, el juego reveló que un número amplio no era consciente de su significado (paradójicamente incluso entre quienes estaban a favor de seleccionar una política de crecimiento económico en escenarios alternativos). El juego también trajo a escena debates científicos tales como la relación entre el crecimiento económico y los impactos ambientales [68-70].

El juego también fomentó las conversaciones sobre el papel de la tecnología en la búsqueda de soluciones. Algunos participantes se mostraron inicialmente escépticos sobre los resultados obtenidos en las simulaciones, argumentando que las nuevas tecnologías futuras permitirían un alto suministro de energía con bajos costes medioambientales. Sin embargo, con el marco de tiempo de análisis (establecido para mediados del siglo 2050-80), la descarbonización es necesaria lo antes posible y, por lo tanto, debe basarse en las tecnologías existentes, ya que los nuevos desarrollos

tecnológicos requieren cantidades sustanciales de tiempo para alcanzar una cuota de mercado. Por ejemplo, la tecnología solar fotovoltaica ha crecido a tasas anuales globales superiores al 50% desde 1995 y, en la actualidad, apenas supera el 1% de la generación eléctrica mundial [71]. Se ha demostrado que las transiciones energéticas pasadas han tendido a ser bastante lentas [72,73]. Por consiguiente, en el horizonte de mediados de siglo, el efecto de posibles tecnologías novedosas se reduce considerablemente. El sentido de escasez de tiempo también fue un elemento clave en los debates que condujeron a la propuesta de escenarios alternativos consistentes. El juego también permitió la reproducción de debates públicos más comunes, como la controversia entre la energía nuclear y las energías renovables. Cuando surgieron estas conversaciones, los facilitadores recordaron a los participantes que la electricidad representa solo una parte del total de la energía consumida en los países industrializados, que representa entre el 20% y el 25% [74].

El juego crea una introducción gradual a fenómenos complejos como la creciente probabilidad de superar un punto de inflexión climático en las próximas décadas. Estos puntos, sujetos a grandes incertidumbres y lagunas de conocimiento científico son fenómenos catastróficos de “baja” probabilidad (tipo “sorpresa”) [6]. De ahí que se introdujera en los debates la profunda incertidumbre, la aversión al riesgo, el clima y las ciencias de la Tierra.

Además, el juego permite acercar objetivos políticos como la reducción de emisiones domésticas en la UE en un 80% para 2050 en comparación con 1990 [66], o la más reciente estrategia de clima neutral a largo plazo de Europa 2050 [75]. En general, la exitosa aplicación del juego está alineada con investigaciones anteriores que demostraron que las tecnologías de educación más simples tienden a tener una puntuación más baja debido a los menores niveles de compromiso con los procesos de investigación y no se asemejan realmente al trabajo de los científicos [76].

3.1.3 Promover el debate sobre las opciones sociales.

La discusión en torno a la selección del objetivo de bienestar (estimado según el uso final de energía per cápita) permitió debatir la gran base energética y material del bienestar en las actuales sociedades industrializadas, mostrando así los grandes niveles actuales de desigualdad a nivel mundial [77-79]. Su comparación con sociedades pasadas con diferentes regímenes socio-metabólicos, así como con grupos humanos actuales con valores culturales radicalmente diferentes (por ejemplo, aquellos que no están alineados con el consumismo como la eco-aldea de Sieben Linden), permitió destacar los factores culturales, sociales y éticos asociados con el bienestar humano [80,81]. La selección del cambio máximo de la temperatura media global, en combinación con la información de los posibles puntos de inflexión climática, reveló los diferentes niveles de aversión al riesgo de los diferentes participantes, y el consenso dentro de cada grupo no siempre fue fácil de alcanzar. Estas discusiones fueron nuevas para muchos participantes.

La simulación de escenarios alternativos sucesivos permitió a los participantes a través de un proceso de ensayo y error identificar los principales factores de insostenibilidad y, especialmente, detectar la alta sensibilidad de las variables de salida a los niveles deseados de PIB per cápita futuro (crecimiento económico). Durante el juego, el tamaño de la población era a menudo identificado como una variable importante en relación a los impactos ambientales y cuya regulación traía importantes cuestiones éticas, tales como las percepciones de la libertad. El papel de los facilitadores en este punto fue clave para explicar que los aumentos en la riqueza (medidos típicamente en términos de PIB per cápita o consumo (monetario) per cápita) son actualmente el principal impulsor de los impactos ambientales a nivel mundial [82-86], mientras que otros factores como el crecimiento de la población y las mejoras tecnológicas han tenido hasta la fecha menos importancia. Por lo tanto, durante el juego, a menudo las decisiones éticas relacionadas con el compartir vs. la cooptación de recursos tenían que ser tomadas explícitamente. Esto también está relacionado con el debate sobre qué estrategia política es más apropiada para reducir las desigualdades: distribución vs. crecimiento económico. Esto contrasta con la vida cotidiana, en la que las decisiones que tienen implicaciones en materia de

(des)igualdad se toman a menudo de forma bastante inconsciente. Esto llevó a algunos equipos a desarrollar escenarios donde el fin de la desigualdad a nivel global implica una reducción en el uso material de los países más ricos para permitir que los más pobres alcancen los niveles de vida básicos (Degrowth [40]). Sin embargo, otros equipos adoptaron enfoques alternativos y probaron escenarios extremos como las políticas eco-fascistas (por ejemplo, reducción drástica de la población <2000 millones de personas para 2050) [87].

Como cualquier modelo, *MEDEAS-World* es una representación simplificada de la realidad. Por lo tanto, se hacen suposiciones, no se consideran algunas características y existen incertidumbres sobre los valores de los parámetros. En particular, las opciones de gestión de la demanda/cambio de estilo de vida están prácticamente ausentes, lo que constituye, por cierto, una limitación generalizada en el campo de modelización de evaluación integrada (véase, por ejemplo, van Sluisveld et al., [88]), dada las complejidades de modelar estas opciones. Esto también está relacionado con los límites del “modelado determinista” para proyectar la evolución de las variables en contextos que son muy diferentes del punto de partida [89]. En este sentido, las fases de asamblea, reunión informativa y conclusiones permiten discutir “más allá del modelo”, es decir, una vez extraídas las principales conclusiones de la simulación participativa, tuvo lugar un debate activo para identificar los principales cambios de comportamiento, culturales y sociales que serían necesarios para lograr la sostenibilidad además de los tecnológicos. Además, fueron identificados los siguientes: cambios de dieta, desarrollo personal, fuerte promoción de la educación, reducción del tiempo de trabajo, des-automatización de los procesos, redistribución de la riqueza para vivir en sociedades más equitativas, reducción de la movilidad y cambio al transporte público, etc.

Por último, cabe destacar que la capacidad pedagógica del juego se ve reforzada por la flexibilidad del juego que puede adaptarse a los diferentes contextos y tipos de participantes (vea la siguiente Sección 3.2.). Por ejemplo, dependiendo del nivel de experiencia en los temas en juego, el juego puede ser utilizado como una herramienta para explicar conceptos básicos y resaltar las principales dinámicas humano-Tierra, pero en aquellos grupos con un mayor nivel de experiencia el juego permite alcanzar una mayor profundidad en las causas y caminos alternativos hacia la sostenibilidad.

3.2. Reflexiones sobre el juego y otras mejoras

En relación con el diseño del juego, el método participativo permite a los jugadores mejorar sus conocimientos obteniendo información de sus compañeros en lugar de la tradicional enseñanza experta de “arriba hacia abajo”. El aprendizaje entre iguales permite un aprendizaje más individualizado, los profesores entre iguales refuerzan su propio aprendizaje al instruir a otros, y los estudiantes se sienten más cómodos y abiertos al interactuar con un compañero [90].

Los facilitadores en *Global Sustainability Crossroads* requieren una comprensión básica del modelo *MEDEAS-World* subyacente, así como habilidades de moderación y enseñanza. Dependiendo del nivel de la “cultura participativa” de los jugadores, el papel del facilitador varía de forma discreta (por ejemplo, solo se consulta para la clarificación sobre las reglas del juego o los aspectos técnicos del modelo), hasta muy activo para equilibrar la participación. Su papel también es clave para que comunique de forma eficaz los peligros del cambio climático a los participantes, dependiendo de sus sensibilidades específicas (por ejemplo, [91,92]) así como para redirigir la frustración y/o irritación eventual cuando un equipo no es capaz de alcanzar los objetivos que se ha propuesto, con el fin de evitar la desesperación y/o la resignación, que son exactamente lo contrario de los objetivos perseguidos del juego.

Entre las diferentes opciones ofrecidas a los participantes durante el juego, las hipótesis son las más complejas de seleccionar, dadas las incertidumbres parcialmente irreductibles en relación con la

disponibilidad de combustibles fósiles en el futuro (por ejemplo, [93]) o los futuros impactos del cambio climático (por ejemplo, [94]).

Aunque aumentar la diversidad de opciones disponibles en el juego aumenta su flexibilidad, requeriría de más tiempo de juego. La versión actual del juego que se realiza en 1 sesión de 4 horas ha demostrado ser un buen equilibrio entre ambos. Sin embargo, cuando surge la posibilidad de ejecutar el juego en diferentes sesiones, una mayor diversidad de opciones podría mejorar la comprensión de los jugadores (por ejemplo, el juego de 5 sesiones antes mencionado aplicado en el aula).

En relación con la comparación de las diferentes versiones del juego, la dinámica de grupo se ha encontrado ampliamente más efectiva que la de la asamblea. Los grupos compuestos por un número menor de participantes (máx. 6-8 personas) generalmente conducen a una participación más rica y diversa, lo que mejora el aprendizaje y permite llegar a un consenso sobre las aportaciones de los escenarios. La versión de asamblea conduce a una menor tasa de participación (sin la interacción de los jugadores “tímidos”), sin consenso para cada opción, dadas las complejidades en juego y las limitaciones en tiempo. Así, la combinación de las medidas votadas puede dar lugar a un escenario de “Frankenstein” que puede no ser percibido por cada participante individual como “su” escenario. En cualquier caso, esta es la única opción para grupos grandes cuando la disponibilidad de tiempo es limitada, o cuando el número de facilitadores disponibles es demasiado reducido para realizar la versión en grupos pequeños. Otra opción sería una versión individual del juego, que solo se ha realizado internamente dentro del grupo de investigación de desarrolladores. Esta versión permitiría a los participantes probar directamente sus escenarios personales, aunque faltaría el aprendizaje y el debate entre pares, con el riesgo de que faltara reflexión antes de realizar cada simulación.

El equipo de desarrolladores recibió importantes y valiosos comentarios de los participantes, que les permitieron mejorar la dinámica del juego (por ejemplo, la idea de ejecutar un escenario BAU primero sobre el cual construir un escenario alternativo (diferentes percepciones de lo que son las tendencias BAU entre diferentes participantes); ampliar las opciones disponibles, etc.). La retroalimentación también ha demostrado ser importante para ayudar a seleccionar las prioridades en el desarrollo del modelo (desigualdades, educación, ética, principios morales, etc.), recordando a los modeladores, que normalmente proceden de una formación técnica, que la energía nunca es solo tecnológica en un sentido estricto o estrecho de la palabra, y que está integrada en un sistema más amplio de ciencia y tecnología dependiente de los valores, la ética y las opciones sociales [80, 81].

Las siguientes características pueden ser incorporadas en desarrollos posteriores del juego para mejorar la capacidad pedagógica del juego:

- Introducir flexibilidad en el juego para permitir a los jugadores comprobar/modificar las decisiones durante cada simulación.
- La regionalización de los impactos ambientales, las implicaciones socio-económicas y las posibles soluciones a nivel de país contribuirían a acercar las cuestiones en juego a los jugadores. Esto podría facilitarse desarrollando versiones de juego basadas en modelos MEDEAS regionales (UE) o nacionales [95,96].
- Mejorar la dimensión socio-afectiva de la dinámica. Las simulaciones a menudo muestran resultados que desafían las nociones anteriores de los participantes sobre cómo puede evolucionar el futuro. Por consiguiente, el juego puede generar conflictos (cognitivo, valores, etc.) tanto a nivel personal como interpersonal. Las estrategias para la correcta gestión de estas diferencias por parte de los facilitadores deben ser refinadas con el fin de canalizarlos hacia nuevas síntesis cognitivas que conduzcan a procesos de cambio y transformación [97].

- *MEDEAS-World* es un modelo en desarrollo: actualizar regularmente el juego. Todavía no se incluyen dimensiones importantes en el juego, como la social (por ejemplo la desigualdad).
- Aplicar el análisis participativo multicriterio para ayudar a los participantes a seleccionar el conjunto más favorable de políticas/objetivos a alcanzar, en relación con los intercambios en la transición hacia la sostenibilidad debido a la inconmensurabilidad de las diferentes dimensiones de las que está compuesto: ambiental (por ejemplo, mitigación del cambio climático, uso de la tierra y agua), económica (inversiones monetarias, bienestar, etc.), social (por ejemplo, desigualdad y género) (por ejemplo, [98]).

El equipo de desarrolladores está abierto a realizar el juego previa invitación (tal y como se anuncia en la página web del grupo <http://geeds.eu/>). En el futuro, está previsto poner a disposición los materiales (interfaz, formularios, etc.) junto con documentación adicional como tutoriales para los facilitadores y descripción básica del modelo subyacente, desarrollando materiales educativos adecuados para que cualquier persona interesada pueda realizar y adaptar el juego a sus propósitos de forma independiente. La formación de facilitadores es crítica, ya que las investigaciones han demostrado que las ideas erróneas y los malentendidos sobre muchas cuestiones ambientales incluido el cambio climático no solo los tienen los alumnos sino también los profesores [19,99]. Esto también permitiría la inclusión del juego en los programas de enseñanza.

4. Conclusiones

El origen de este trabajo proviene del modelo de evaluación ambiental integrada MEDEAS [36], que fue en primer lugar desarrollado para proporcionar orientación a las políticas energéticas dentro de la UE. Sin embargo, el equipo de desarrolladores de modelos pronto percibió el potencial de aplicar el modelo también como una herramienta pedagógica. Este trabajo describe y evalúa cualitativamente el potencial pedagógico del juego de simulación participativa desarrollado *Global Sustainability Crossroads*, cuyo objetivo principal es mejorar la comprensión del dilema de la sostenibilidad global para los ciudadanos centrándose especialmente en el cambio climático y las alternativas potenciales disponibles en las próximas décadas para revertir las tendencias actuales. La novedad del juego reside en el alcance global y la representación de las causas de las emisiones antropogénicas dentro del modelo *MEDEAS-World* combinado con una dinámica de grupo de simulación participativa suficientemente flexible para adaptarse a una diversidad de contextos y participantes. Se ha desarrollado una interfaz específica de juego para facilitar el uso del modelo por parte de los no expertos. El modelo subyacente se ha desarrollado utilizando Dinámica de Sistemas, una metodología que ha demostrado ser especialmente adecuada para comprender y abordar los múltiples factores interrelacionados que intervienen en la crisis de sostenibilidad.

El juego crea un escenario virtual en el que los participantes se enfrentan al diseño de estrategias de mitigación del cambio climático, así como a las consecuencias sociales, económicas y ambientales de las decisiones a nivel mundial. A través del juego, los participantes pronto descubren la complejidad del problema y las dificultades para alcanzar soluciones ideales. A su vez, estas barreras los motivan en la búsqueda de soluciones alternativas. Los debates plenarios que siguen a las simulaciones permiten conectar los resultados globales con los cambios de comportamiento locales y personales requeridos en relación con las opciones de consumo y la participación política. En este sentido, el juego sigue el lema ecologista “pensar globalmente, actuar localmente” para abordar los problemas ambientales. La realización de 13 talleres de juegos con 420 jugadores en una diversidad de contextos y tipos heterogéneos de participantes ha demostrado que tiene un potencial pedagógico significativo: el juego es capaz de generar debates sobre temas cruciales que normalmente están fuera del ámbito público, como la relación entre el crecimiento económico y la sostenibilidad, el papel de la tecnología, la forma en que los deseos humanos están limitados por las restricciones biofísicas o la posibilidad de puntos de inflexión climáticos. Por lo tanto, el juego desarrollado permite salvar la brecha entre la investigación científica y la sociedad.

Hasta ahora, no se ha realizado una evaluación rigurosa de la eficacia pedagógica del juego, aunque la retroalimentación de los participantes, así como la percepción de los profesores y facilitadores indica que es sustancial. El trabajo en curso se centra actualmente en la evaluación cuantitativa del rendimiento del juego con la versión estable final del juego. El trabajo futuro puede centrarse en la reducción de los impactos y en las posibles soluciones, lo que contribuiría a mejorar la dimensión socio-afectiva de la dinámica.

Materiales complementarios: Los siguientes documentos están disponibles en línea en <http://www.mdpi.com/2071-1050/11/13/3672/s1>, FORM1-HYP_Crossroads_EN; FORM2-BAU_Crossroads_EN; FORM3-OBJ_Crossroads_EN; FORM4-ALT_Crossroads_EN.

Contribuciones de los autores: Conceptualización I.C.-P.; metodología, I.C.-P., D.Á.-A., y L.J.M.; software, D.A.-A.; validación, I.C.-P. y D.Á.-A.; investigación, I.C.-P., D.Á.-A., y L.J.M.; redacción-elaboración de borradores originales, I.C.-P.; redacción-revisión y edición, I.C.-P., D.Á.-A., y L.J.M.

Financiación: Iñigo Capellán-Pérez agradece el apoyo de la Beca de Investigación Juan de la Cierva del Ministerio de Economía y Competitividad de España (nº FJCI-2016-28833).

Agradecimientos: Los autores agradecen a todos los participantes en los diferentes talleres realizados del juego, así como a las personas que han contribuido como facilitadores de las diferentes versiones del juego: Óscar Carpintero, Ignacio de Blas, Carmen Duce, José María Enríquez, Margarita Mediavilla y Gonzalo Parrado, del Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de Valladolid; Ilaria Perisi, Davide Natalini, Jordi Solé, Sara Falsini del Proyecto MEDEAS; y Álvaro Campos Celador de la Universidad del País Vasco. También agradecemos a Iñaki Arto por sus cálculos para obtener la huella y el uso de energía final para los países en la base de datos WIOD para el período 1995-2009.

Conflictos de Interés: Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Apéndice A. Marco de modelización del modelo MEDEAS-World.

MEDEAS-World (MEDEAS-W) es un modelo global, de una región, de energía, economía y medio ambiente (o modelo de evaluación integrado). Se trata de un modelo dinámico-recursivo de simulación de políticas que ha sido diseñado aplicando la Dinámica de Sistemas que facilita la integración del conocimiento desde las diferentes perspectivas y disciplinas, así como las retroalimentaciones de los diferentes subsistemas. El modelo ha sido desarrollado en el software Vensim DSS para Windows versión 6.4E (X32), y también está disponible en código abierto Python (<http://www.medeas.eu/>). El modelo se extiende típicamente de 1995 a 2050 (aunque el horizonte de simulación puede extenderse hasta 2100 si es necesario, por ejemplo, cuando se centra en cuestiones de cambio climático). MEDEAS-W está estructurado en siete submódulos principales: Economía, Energía, Infraestructuras, Materiales, Uso de la Tierra, Indicadores de Impacto Social y Ambiental, y Cambio Climático (vea Figura A1). Las principales variables que conectan los diferentes módulos están representadas por flechas.

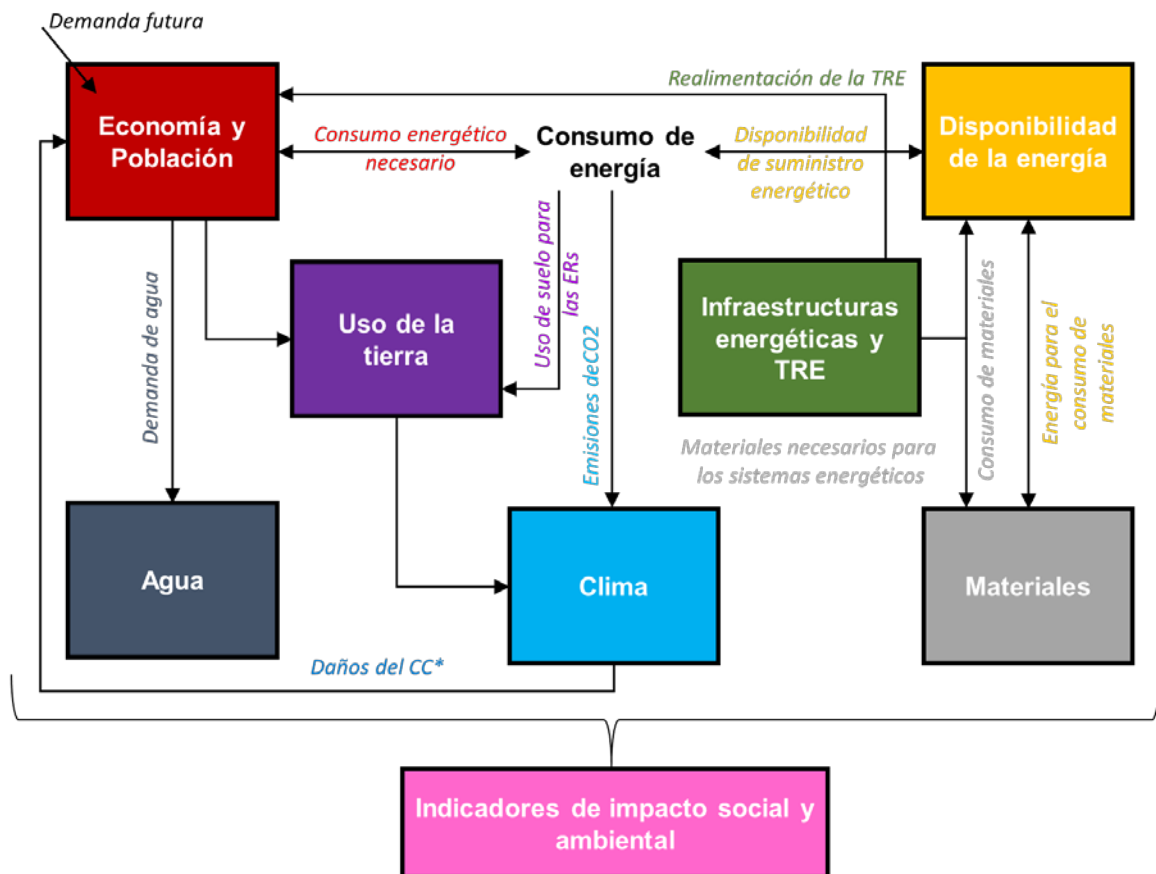


Figura A1. Resumen esquemático del modelo *MEDEAS-World*. Fuente: adaptación de [36]. CC: cambio climático; TRE: tasa de retorno energético. *La función de daño por cambio climático puede ser especificada por el usuario como una función de daño o como una función de pérdida de energía.

Las principales características de cada módulo son:

- **Economía y Población:** La economía global en MEDEAS se modela asumiendo que los mercados no son transparentes (es decir, que no se fuerza el equilibrio general), el crecimiento impulsado por la demanda y la complementariedad en lugar de la sustitución perfecta. Por lo tanto, la producción está determinada por la demanda final y la estructura económica, junto con las limitaciones de la oferta como la disponibilidad de energía. La estructura económica es capturada por la adaptación e integración dinámica de las tablas globales de input-output de WIOD, resultando en 35 industrias y 4 sectores institucionales [100]. Las intensidades energéticas finales por sector se obtienen combinando la información de las cuentas medioambientales de WIOD [101] y los balances de la Agencia Internacional de la Energía. La población evoluciona exógenamente según se defina por el usuario. Vea [102] para más detalles en este submódulo.
- **Disponibilidad de energía:** este módulo incluye el potencial y la disponibilidad de recursos energéticos renovables y no renovables, teniendo en cuenta las limitaciones biofísicas y temporales. En particular, la disponibilidad de recursos energéticos no renovables depende tanto de las existencias como de los flujos [103-105]. En total, se consideran 25 fuentes de energía y tecnologías, y 5 combustibles finales (electricidad, calor, sólidos, gases, y líquidos), con una gran desagregación tecnológica. La intermitencia de los renovables se considera computando los niveles endógenos de sobrecapacidad, almacenamiento y redes de distribución y transporte, dependiendo de la penetración de las tecnologías de las energías renovables variables. Este submódulo se basa principalmente en el modelo anterior WoLiM [106]. El transporte se modela

con gran detalle, diferenciando entre los distintos tipos de vehículos para los hogares, así como el transporte interior de mercancías y pasajeros (véase [36] para más detalles).

- **Infraestructuras energéticas y TRE:** Este módulo representa plantas de generación de electricidad y calor, lo que permite considerar retrasos en la planificación y construcción. Se aplica un enfoque de energía neta [107] que contabiliza de forma endógena y dinámica la TRE tanto de las tecnologías individuales como de la TRE del sistema. La demanda de energía se ve afectada por la variación de la TRE del sistema.
- **Materiales:** Los materiales son requeridos por la economía, con énfasis en los requeridos para la construcción y operación y mantenimiento de tecnologías de energías alternativas [107]. Se pueden aplicar políticas de reciclaje.
- **Uso de la tierra:** actualmente este módulo computa principalmente las necesidades de tierra de las energías renovables.
- **Agua:** este módulo permite calcular el uso del agua por tipo (azul, verde y gris) por sector económico y para los hogares.
- **Clima:** este módulo proyecta los niveles de cambio climático debido a las emisiones de GEI generadas por las sociedades humanas (las emisiones distintas del CO₂ se establecen exógenamente, tomando como referencia los escenarios de los RCPs [108]). El ciclo del carbono y el clima está adaptado de C-ROADS [109,110]. Este módulo incluye una función de daño que traduce el aumento de los niveles de cambio climático en daños para los sistemas humanos [111].
- **Impactos sociales y ambientales:** este módulo traduce los resultados biofísicos de las simulaciones en métricas relacionadas con los impactos sociales y ambientales. El objetivo de este módulo es contextualizar las implicaciones para las sociedades humanas en términos de bienestar para cada simulación.

El modelo funciona dinámicamente de la siguiente manera. Para cada periodo: primero, se estima una demanda económica sectorial a partir de un objetivo exógeno y dinámico de PIB per cápita. La demanda de energía final necesaria para satisfacer la producción se obtiene mediante un análisis híbrido basado en input-output de la economía energética, y combinando la producción monetaria y las intensidades energéticas para cada fuente de energía final. En segundo lugar, el submódulo de energía calcula la oferta neta de energía final disponible, que puede satisfacer (o no) la demanda requerida: la economía se adapta a la eventual escasez de combustible. En tercer lugar, se estiman los materiales necesarios para construir, operar, mantener, desmantelar, etc. Esto permite estimar la TRE del sistema y evaluar los eventuales cuellos de botella de material (aunque la disponibilidad de material no limita la producción económica en la versión actual del modelo). En cuarto lugar, el submódulo climático calcula las emisiones de GEI cuya acumulación deriva en un cierto nivel de cambio climático que a su vez retroalimenta la producción económica sectorial. Se tienen en cuenta las necesidades adicionales de tierra y agua. Finalmente, se calculan los impactos sociales y ambientales.

Para una documentación más detallada del modelo *MEDEAS-World*, ver [36].

Apéndice B. Talleres de juegos realizados.

El juego ha sido realizado 13 veces, en 2 países (España e Italia), abarcando una amplia gama de jugadores (de 10 a 100 personas) con un nivel heterogéneo de experiencia, educación y edad (vea Tabla A1). Dependiendo del número de jugadores, del tiempo disponible y de los facilitadores capacitados se probaron diferentes versiones del juego. En eventos fuera de la ciudad donde el grupo de investigación que desarrolla el juego tiene su sede, la versión de grupo era más difícil de realizar debido a razones prácticas. El juego se llevó a cabo en una diversidad de contextos, principalmente en la enseñanza académica (1, 2, 4-7, 10, 11, 13), pero también en eventos internos de organizaciones ambientales sin ánimo de lucro (3, 12), abiertas a la sociedad civil (8), y con profesionales de la sostenibilidad (9). Esta diversidad permitió una rica retroalimentación que logró mejorar considerablemente el juego.

Tabla A1. Talleres realizados del juego *Global Sustainability Crossroads* de Septiembre del 2017 a Diciembre de 2018.

Número de evento	Evento	Fecha	Place	Número de participantes	Características de los participantes (nivel de experiencia/edad)	Tipo de dinámica realizada
1	Academia de Verano Club de Roma	9-9-2017	Florenca (Italy)	~50	Expertos y activistas informados/todas las edades	En grupos—1 sesión
2	IV Curso de economía ecológica	26-10-2017	Universidad del País Vasco, Facultad de Economía, Bilbao (España)	~10	Expertos y activistas informados/todas las edades	En grupos—1 sesión
3	VII Congreso de Ecologistas en Acción	7-12-2017	Valladolid (España)	~40	Activistas informados/todas las edades	En grupos—1 sesión
4	Aula (Asignatura: Educación para la Paz y la Igualdad)	6-3-2018	Facultad de Educación Universidad de Valladolid, Segovia (España)	~25	Estudiantes /18–19 años	En grupos—1 sesión
5	Aula (Asignatura: Responsabilidad Social de la Ingeniería)	2do semestre Curso 2017-2018	Facultad de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid (España)	~25	Estudiantes /4º año	En grupos—5 sesiones

6	Aula (Asignatura: Ingeniería y Sociedad)	2do semes- tre Curso 2017- 2018	Facultad de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid (España)	~25	Estudiantes /4 ^o año	En grupos—5 sesiones
7	Classroom (subject: Engineering, Technology and Society)	2do semes- tre Curso 2017- 2018	Facultad de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid (España)	~15	Estudiantes /4 ^o año	En grupos—5 sesiones
8	“Jugando a Gobernar el Mundo” ⁴ (evento específico)	20-3- 2018	Valladolid (España)	~100	Heterogéneo/ todas las edades	Asamblea —1 sesión
9	15 ^a Jornadas Técnicas y Feria de Bioconstrucción	19-5- 2018	Aínsa, Huesca (España)	~45	Heterogéneo/ todas las edades	Asamblea —1 sesión
10	Aula (asignatura: Dinámica Sistemas - Modelado)	1 ^{er} semes- tre Curso 2018– 2019	Facultad de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid (España)	4	Estudiantes/4 ^o year	En grupos—3 sesiones
11	V Curso de Economía Ecológica	23-11- 2018	Universidad del País Vasco, Facultad de Economía (España)	~20	Heterogéneo/ todas las edades	En grupos—1 sesión
12	II Encuentro de energía cooperativa Energética	24-11- 2018	Burgos (España)	~15	Activistas informados/todas las edades	Asamblea —1 sesión
13	Aula (asignatura: Comportamient o del consumidor)	1 ^{er} Seme- stre Curso 2018– 2019	Facultad de Comercio Universidad de Valladolid (España)	~40	Estudiantes/2 ^o año	En grupos—3 sesiones
Total		Sept 2017– Dic 2018	España e Italia	~420	Heterogéneos/estudiant es/expertos/activistas informados/ciudadanos informados/todas las edades	En grupo— 1 y 5 sesiones, Asamblea —1 sesión

Notas: 1: <https://www.clubofrome.org/2017/05/17/summeracademy/>

2: http://www.hegoa.ehu.es/articulos/text/iv_curso_de_economia_ecologica

3: <https://www.ecologistasenaccion.org/SPIP/article35304.html>

- 3: <http://ucc.uva.es/actividades/Jugando-a-gobernar-el-mundo/>
- 4: <https://villadeainsa.com/eventos/programa-15a-jornadas-bioconstruccion/>
- 5: <https://www.ehu.eus/es/web/iraunkortasuna/ekonomia-ekologikoko-ikastaroak>
- 6: <https://energeticacoop.es/burgos-acoge-los-ii-encuentros-energeticos/>

Bibliografía

1. Anderson, K.; Bows, A. A new paradigm for climate change. *Nat. Clim. Chang.* **2012**, *2*, 639–640.
2. IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report*; Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2014. Available online: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (accessed on 1-6-2019).
3. Millennium Ecosystem Assessment (MEA). *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios*; Global Assessment Reports; Carpenter, S.R., Pingali, P.L., Bennett, E.M., Zurek, M.B., Eds.; Island Press: Washington, DC, USA, 2005; Volume 2, ISBN 1-55963-390-5.
4. 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.; et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* **2015**, *347*, doi:10.1126/science.1259855.
5. Steffen, W.; Broadgate, W.; Deutsch, L.; Gaffney, O.; Ludwig, C. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *Anthr. Rev.* **2015**, *2*, 81–98.
6. Lenton, T.M.; Held, H.; Kriegler, E.; Hall, J.W.; Lucht, W.; Rahmstorf, S.; Schellnhuber, H.J. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2008**, *105*, 1786–1793.
7. Daily, G. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*; Island Press: Washington DC (USA), 1997.
8. Levin, S.A.; Carpenter, S.R.; Godfray, H.C.J.; Kinzig, A.P.; Loreau, M.; Losos, J.B.; Walker, B.; Wilcove, D.S. *The Princeton Guide to Ecology*; Princeton University Press: Princeton, New Jersey (USA), 2009.
9. Schneider, S.H.; Morton, L. *The Primordial Bond Exploring Connections between Man and Nature through the Humanities and Sciences*; Plenum Press: New York, NY, USA, 1981.
10. O'Neill, D.W.; Fanning, A.L.; Lamb, W.F.; Steinberger, J.K. A good life for all within planetary boundaries. *Nat. Sustain.* **2018**, *1*, 88–95.
11. Bangay, C.; Blum, N. Education responses to climate change and quality: Two parts of the same agenda? *Int. J. Educ. Dev.* **2010**, *30*, 359–368.
12. Sterman, J.D. Sustaining Sustainability: Creating a Systems Science in a Fragmented Academy and Polarized World. In *Sustainability Science*; Weinstein, M.P., Turner, R.E., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2012; pp. 21–58 ISBN 978-1-4614-3187-9.
13. Sterman, J.D. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*; Irwin/McGraw-Hill: Boston, MA, USA, 2000; Volume 19.
14. Sterman, J.D. Learning in and about complex systems. *Syst. Dyn. Rev.* **1994**, *10*, 291–330.
15. Alessi, S.; Kopainsky, B. System Dynamics and Simulation/Gaming: Overview. *Simul. Gaming* **2015**, *46*, 223–229.
16. Groves, F.H.; Pugh, A.F. Cognitive Illusions as Hindrances to Learning Complex Environmental Issues. *J. Sci. Educ. Technol.* **2002**, *11*, 381–390.
17. Puttick, G.; Tucker-Raymond, E. Building Systems from Scratch: An Exploratory Study of Students Learning About Climate Change. *J. Sci. Educ. Technol.* **2018**, *27*, 306–321.
18. Rates, C.A.; Mulvey, B.K.; Feldon, D.F. Promoting Conceptual Change for Complex Systems Understanding: Outcomes of an Agent-Based Participatory Simulation. *J. Sci. Educ. Technol.* **2016**, *25*, 610–627.
19. Papadimitriou, V. Prospective Primary Teachers' Understanding of Climate Change, Greenhouse Effect, and Ozone Layer Depletion. *J. Sci. Educ. Technol.* **2004**, *13*, 299–307.
20. Gómez-Baggethun, E.; Naredo, J.M. In search of lost time: The rise and fall of limits to growth in international sustainability policy. *Sustain. Sci.* **2015**, *10*, 385–395.
21. UNCED. *Declaration on Environment and Development*; United Nations Conference on Environment and Development: Rio de Janeiro, Brazil, 1992.

22. UNFCCC. *United Nations Framework Convention on Climate Change*; FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62220 (E) 200705; United Nations: New York, NY, USA, 1992.
23. UN. *Convention on Biological Diversity*; United Nations: Rio de Janeiro (Brazil), 1992.
24. UN. *Resolution Adopted by the General Assembly on 25 September 2015*; United Nations: Washington, DC, USA, 2015.
25. Ehrlich, P.R.; Kareiva, P.M.; Daily, G.C. Securing natural capital and expanding equity to rescale civilization. *Nature* **2012**, *486*, 68–73.
26. Barab, S.; Dede, C. Games and Immersive Participatory Simulations for Science Education: An Emerging Type of Curricula. *J. Sci. Educ. Technol.* **2007**, *16*, 1–3.
27. Li, M.-C.; Tsai, C.-C. Game-Based Learning in Science Education: A Review of Relevant Research. *J. Sci. Educ. Technol.* **2013**, *22*, 877–898.
28. Tosteson, J.L. The Scientific World View, Information Technology, and Science Education: Closing the Gap between Knowledge-Generation and Knowledge-Consumption. *J. Sci. Educ. Technol.* **1997**, *6*, 273–284.
29. Davis, F.D.; Bagozzi, R.P.; Warshaw, P.R. Extrinsic and Intrinsic Motivation to Use Computers in the Workplace. *J. Appl. Soc. Psychol.* **1992**, *22*, 1111–1132.
30. Hamari, J.; Koivisto, J.; Sarsa, H. Does Gamification Work?—A Literature Review of Empirical Studies on Gamification. In *Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Waikoloa, HI, USA, 6–9 January 2014; pp. 3025–3034.
31. Markopoulos, A.P.; Fragkou, A.; Kasidiaris, P.D.; Davim, J.P. Gamification in engineering education and professional training. *Int. J. Mech. Eng. Educ.* **2015**, *43*, 118–131.
32. Karagiorgas, D.N.; Niemann, S. Gamification and Game-Based Learning. *J. Educ. Technol. Syst.* **2017**, *45*, 499–519.
33. Swinerton, E.N. Environmental Gaming Simulations. *J. Environ. Educ.* **1972**, *3*, 49–52.
34. Wu, J.S.; Lee, J.J. Climate change games as tools for education and engagement. *Nat. Clim. Chang.* **2015**, *5*, 413–418.
35. Stanitsas, M.; Kirytopoulos, K.; Vareilles, E. Facilitating sustainability transition through serious games: A systematic literature review. *J. Clean. Prod.* **2019**, *208*, 924–936.
36. Capellán-Pérez, I.; de Blas, I.; Nieto, J.; De Castro, C.; Miguel, L.J.; Mediavilla, M.; Carpintero, Ó.; Rodrigo, P.; Frechoso, F.; Cáceres, S. *D4.1 MEDEAS Model and IOA Implementation at Global Geographical Level*; MEDEAS, Barcelona (Spain): 2017.
37. Meadows, D. Leverage points. In *Places to Intervene in a System*; The Sustainability Institute: Hartland, VT, USA, 1999.
38. OECD. *Towards Green Growth*; Organisation for Economic Co-Operation and Development: Paris, France, 2011.
39. World Bank. *Inclusive Green Growth: The Pathway to Sustainable Development*; World Bank Publications: Washington DC (USA), 2012; ISBN 978-0-8213-9551-6.
40. Demaria, F.; Schneider, F.; Sekulova, F.; Martinez-Alier, J. What is Degrowth? From an Activist Slogan to a Social Movement. *Environ. Values* **2013**, *22*, 191–215.
41. Meadows, D.H.; Randers, J.; Meadows, D.L. *The Limits to Growth: The 30-Year Update*; Chelsea Green Publishing Company: White River Junction, VT, USA, 2004; ISBN 1-931498-51-2.
42. Meadows, D. H., Meadows, D. L., & Randers, J. *Beyond the limits: global collapse or a sustainable future*; Earthscan Publications Ltd., United Kingdom, 1992.
43. Meadows, D.H.; Meadows, D.L.; Randers, J.; Behrens, W.W., III. *The Limits to Growth*; Universe Books: New York (USA), 1972; ISBN 0-87663-165-0.
44. Meadows, D. World3 and Stratagem: History, Goals, Assumptions, Implications. In *Onishi, Akira (2009): Integrated Global Models of Sustainable Development*; Eolss Publishers, Oxford (UK), 2009; Volume 1, pp. 104–123.
45. Meadows, D. *Stratagem*; University of New Hampshire: Durham, New Hampshire, USA, 1984.
46. Meadows, D.L. Tools for Understanding the Limits to Growth: Comparing a Simulation and a Game. *Simul. Gaming* **2001**, *32*, 522–536.
47. Meadows, D.; Fiddaman, T.; Shannon, D. *Fish Banks, Ltd. A Microcomputer Assisted Group Simulation That Teaches Principles of Sustainable Management of Renewable Natural Resources*; Laboratory for Interactive Learning, Hood House, University of New Hampshire, Durham, NH, USA, 1993; pp. 698–706.

48. McBurnett, L.R.; Hinrichs, M.M.; Seager, T.P.; Clark, S.S. Simulation Gaming Can Strengthen Experiential Education in Complex Infrastructure Systems. *Simul. Gaming* **2018**, *49*, 620–641, doi:10.1177/1046878118767729.
49. Rooney-Varga, J.N.; Sterman, J.D.; Fracassi, E.; Franck, T.; Kapmeier, F.; Kurker, V.; Johnston, E.; Jones, A.P.; Rath, K. Combining role-play with interactive simulation to motivate informed climate action: Evidence from the World Climate simulation. *PLOS ONE* **2018**, *13*, e0202877.
50. Sterman, J.; Franck, T.; Fiddaman, T.; Jones, A.; McCauley, S.; Rice, P.; Sawin, E.; Siegel, L.; Rooney-Varga, J.N. World Climate: A Role-Play Simulation of Climate Negotiations. *Simul. Gaming* **2015**, *46*, 348–382.
51. Lucas, J.; Escapa García, M.; González-Eguino, M. *The Use of Role-Play Games in Teaching: The International Climate Negotiation Game*; ADDI (University of the Basque Country), Spain, 2016.
52. MIT. World Energy: A Climate and Energy Policy Negotiation Game. Available online: <https://mitsloan.mit.edu/LearningEdge/simulations/worldenergy/Pages/default.aspx> (accessed on 10 March 2018).
53. Kriegler, E.; Hall, J.W.; Held, H.; Dawson, R.; Schellnhuber, H.J. Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2009**, *106*, 5041–5046.
54. Chen, J.C.; Martin, A.R. Role-Play Simulations as a Transformative Methodology in Environmental Education. *J. Transform. Educ.* **2015**, *13*, 85–102.
55. Wang, J.; Feng, L.; Tang, X.; Bentley, Y.; Höök, M. The implications of fossil fuel supply constraints on climate change projections: A supply-side analysis. *Futures* **2017**, *86*, 58–72.
56. van Vuuren, D.P.; Kok, M.T.J.; Girod, B.; Lucas, P.L.; de Vries, B. Scenarios in Global Environmental Assessments: Key characteristics and lessons for future use. *Glob. Environ. Chang.* **2012**, *22*, 884–895.
57. Leach, M.; Raworth, K.; Rockström, J. Between social and planetary boundaries: Navigating pathways in the safe and just space for humanity. In *World Social Science Report 2013*; Organisation for Economic Co-Operation and Development: Paris (France), 2013; pp. 84–89.
58. Cottrell, F. *Energy and Society: The Relation between Energy, Social Change, and Economic Development*; AuthorHouse: Bloomington, Indiana (USA), 2009; ISBN 978-1-4490-3169-5.
59. Tainter, J.A. *The Collapse of Complex Societies*; Reprint ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 1990; ISBN 978-0-521-38673-9.
60. White, L.A. Energy and the evolution of culture. *Am. Anthropol.* **1943**, 335–356.
61. Arto, I.; Capellán-Pérez, I.; Lago, R.; Bueno, G.; Bermejo, R. The energy requirements of a developed world. *Energy Sustain. Dev.* **2016**, *33*, 1–13.
62. Rao, N.D.; Riahi, K.; Grubler, A. Climate impacts of poverty eradication. *Nat. Clim. Chang.* **2014**, *4*, 749–751.
63. WBGU. *World in Transition 3: Towards Sustainable Energy Systems*; Earthscan, London (UK) and Sterling, VA (USA), 2003.
64. Lamb WF, Steinberger JK (2017) Human well-being and climate change mitigation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 8:e485. <https://doi.org/10.1002/wcc.485>
65. Akizu, O.; Bueno, G.; Barcena, I.; Kurt, E.; Topaloğlu, N.; Lopez-Guede, J.M. Contributions of Bottom-Up Energy Transitions in Germany: A Case Study Analysis. *Energies* **2018**, *11*, 849.
66. European Commission. *A Roadmap for Moving to a Competitive low Carbon Economy in 2050*; Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions; European Commission, Brussels, Belgium, 2011.
67. Hines, J.M.; Hungerford, H.R.; Tomera, A.N. Analysis and Synthesis of Research on Responsible Environmental Behavior: A Meta-Analysis. *J. Environ. Educ.* **1987**, *18*, 1–8, doi:10.1080/00958964.1987.9943482.
68. Arrow, K.; Bolin, B.; Costanza, R.; Dasgupta, P.; Folke, C.; Holling, C.S.; Jansson, B.-O.; Levin, S.; Mäler, K.-G.; Perrings, C.; et al. Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Ecol. Econ.* **1995**, *15*, 91–95.
69. Stern, D.I. The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve. *World Dev.* **2004**, *32*, 1419–1439.
70. UNEP. *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth*; United Nations Environment Programme: 2011; ISBN 978-92-807-3167-5.
71. IRENA. *db IRENA Resource*; International Renewable Energy Agency: Masdar City, United Arab Emirates, 2019. Available online: <http://resourceirena.irena.org> (accessed on 1-6-2019).

72. Fouquet, R. The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service. *Energy Policy* **2010**, *38*, 6586–6596.
73. Smil, V. *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*; Praeger: Santa Barbara, CA, USA, 2010; ISBN 0-313-38177-1.
74. IEA. *IEA World Energy Statistics and Balances*; World Energy Statistics and Balances (Database); IEA/OECD: Paris, France, 2019.
75. EC. A Clean Planet for All—A European Strategic Long-Term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy; European Commission: Brussels, Belgium, 2018.
76. Bush, D.; Sieber, R.; Seiler, G.; Chandler, M. Examining Educational Climate Change Technology: How Group Inquiry Work with Realistic Scientific Technology Alters Classroom Learning. *J. Sci. Educ. Technol.* **2018**, *27*, 147–164.
77. Fischer-Kowalski, M.; Krausmann, F.; Pallua, I. A sociometabolic reading of the Anthropocene: Modes of subsistence, population size and human impact on Earth. *Anthr. Rev.* **2014**, *1*, 8–33, doi:10.1177/2053019613518033.
78. Haberl, H. The global socioeconomic energetic metabolism as a sustainability problem. *Energy* **2006**, *31*, 87–99.
79. Krausmann, F.; Gingrich, S.; Eisenmenger, N.; Erb, K.-H.; Haberl, H.; Fischer-Kowalski, M. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecol. Econ.* **2009**, *68*, 2696–2705.
80. Frigo, G. Energy ethics, homogenization, and hegemony: A reflection on the traditional energy paradigm. *Energy Res. Soc. Sci.* **2017**, *30*, 7–17.
81. Smith, J.; High, M.M. Exploring the anthropology of energy: Ethnography, energy and ethics. *Energy Res. Soc. Sci.* **2017**, *30*, 1–6.
82. Arto, I.; Dietzenbacher, E. Drivers of the Growth in Global Greenhouse Gas Emissions. *Environ. Sci. Technol.* **2014**, *48*, 5388–5394.
83. Feng, K.; Davis, S.J.; Sun, L.; Hubacek, K. Drivers of the US CO₂ emissions 1997–2013. *Nat. Commun.* **2015**, *6*, 7714.
84. Lan, J.; Malik, A.; Lenzen, M.; McBain, D.; Kanemoto, K. A structural decomposition analysis of global energy footprints. *Appl. Energy* **2016**, *163*, 436–451.
85. Weinzettel, J.; Hertwich, E.G.; Peters, G.P.; Steen-Olsen, K.; Galli, A. Affluence drives the global displacement of land use. *Glob. Environ. Chang.* **2013**, *23*, 433–438.
86. Wiedmann, T.O.; Schandl, H.; Lenzen, M.; Moran, D.; Suh, S.; West, J.; Kanemoto, K. The material footprint of nations. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2013**, *112*, 6271–6276, doi:10.1073/pnas.1220362110.
87. Amery, C. *Hitler als Vorläufer Auschwitz—Der Beginn des 21 Jahrhunderts?*; Luchterhand Literaturverlag: München (Germany), 2002; ISBN 3-630-62027-2.
88. van Sluisveld, M.A.E.; Martínez, S.H.; Daioglou, V.; van Vuuren, D.P. Exploring the implications of lifestyle change in 2 °C mitigation scenarios using the IMAGE integrated assessment model. *Technol. Forecasting Soc. Chang.* **2016**, *102*, 309–319.
89. Dreborg, K.H. Essence of backcasting. *Futures* **1996**, *28*, 813–828.
90. Johnson, D.W.; Johnson, R.T. *Promoting Constructive Student-Student Relationships through Cooperative Learning*; Minnesota University, Minneapolis (USA), 1980.
91. Dickinson, J.L.; Crain, R.; Yalowitz, S.; Cherry, T.M. How Framing Climate Change Influences Citizen Scientists' Intentions to Do Something About It. *J. Environ. Educ.* **2013**, *44*, 145–158.
92. Dubois, B.; Krasny, M.E. Educating with resilience in mind: Addressing climate change in post-Sandy New York City. *J. Environ. Educ.* **2016**, *47*, 255–270.
93. Capellán-Pérez, I.; Arto, I.; Polanco-Martínez, J.M.; González-Eguino, M.; Neumann, M.B. Likelihood of climate change pathways under uncertainty on fossil fuel resource availability. *Energy Environ. Sci.* **2016**, *9*, 2482–2496.
94. Dietz, S.; Stern, N. Endogenous Growth, Convexity of Damage and Climate Risk: How Nordhaus' Framework Supports Deep Cuts in Carbon Emissions. *Econ. J.* **2015**, *125*, 574–620.
95. De Blas Sanz, I.; Capellán-Pérez, I.; Carpintero Redondo, Ó.; De Castro, C.; Frechoso, F.; Lobejón, L.F.; Lomas Huertas, P.L.; Mediavilla, M.; Miguel, L.J.; Nieto, J.; et al. D4.2 MEDEAS Model and IOA Implementation at European Geographical Level; MEDEAS Project: Barcelona, Spain, 2018.
96. Álvarez Antelo, D.; de Blas Sanz, I.; Capellán-Pérez, I.; Carpintero Redondo, Ó.; De Castro, C.; Frechoso, F.; Lobejón, L.F.; Lomas Huertas, P.L.; Mediavilla, M.; Miguel, L.J.; et al. D4.3 MEDEAS Model and IOA

- Implementation at Country Level: the Cases of Austria and Bulgaria; MEDEAS Project: Barcelona, Spain, 2018.
97. Hudlicka, E. Affective gaming in education, training and therapy: Motivation, requirements, techniques. In *Handbook of Research on Improving Learning and Motivation through Educational Games: Multidisciplinary Approaches*; IGI Global: Hershey PA (USA), 2011; pp. 482–511. ISBN 978-1-60960-495-0
 98. Kowalski, K.; Stagl, S.; Madlener, R.; Omann, I. Sustainable energy futures: Methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis. *Eur. J. Oper. Res.* **2009**, *197*, 1063–1074.
 99. Mortensen, L.L. Teacher Education for Sustainability. I. Global Change Education: The Scientific Foundation for Sustainability. *J. Sci. Educ. Technol.* **2000**, *9*, 27–36.
 100. Dietzenbacher, E.; Los, B.; Stehrer, R.; Timmer, M.; de Vries, G. The Construction of World Input–Output Tables in the Wiod Project. *Econ. Syst. Res.* **2013**, *25*, 71–98.
 101. Genty, A.; Arto, I.; Neuwahl, F. *Final Database of Environmental Satellite Accounts: Technical Report on Their Compilation*; WIOD Deliverable 4.6.; 2012. Available online: http://www.wiod.org/publications/source_docs/Environmental_Sources.pdf (accessed on 1-6-2019).
 102. Nieto, J.; Carpintero, Ó.; Miguel, L.J.; de Blas, I. *Macroeconomic Modelling under Energy Constraints: Global Low Carbon Transition Scenarios*; University of Valladolid Working Paper, Valladolid (Spain), 2019.
 103. Campbell, C.J.; Laherrère, J. The end of cheap oil. *Sci. Am.* **1998**, *278*, 60–65.
 104. Kerschner, C.; Capellán-Pérez, I. Peak-Oil and Ecological Economics. In *Routledge Handbook of Ecological Economics: Nature and Society*; Spash, C.L., Ed.; Routledge, Abingdon, UK, 2017; pp. 425–435.
 105. Mohr, S.H.; Wang, J.; Ellem, G.; Ward, J.; Giurco, D. Projection of world fossil fuels by country. *Fuel* **2015**, *141*, 120–135.
 106. Capellán-Pérez, I.; Mediavilla, M.; de Castro, C.; Carpintero, Ó.; Miguel, L.J. Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: An integrated approach. *Energy* **2014**, *77*, 641–666.
 107. Capellán-Pérez, I.; De Castro, C.; Miguel, L.J. *Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and Material Requirements in Scenarios of Global Transition to Renewable Energies*; University of Valladolid Working Paper, Valladolid (Spain), 2019.
 108. van Vuuren, D.P.; Edmonds, J.A.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Weyant, J. A special issue on the RCPs. *Clim. Chang.* **2011**, *109*, 1.
 109. Fiddaman, T.; Siegel, L.S.; Sawin, E.; Jones, A.P.; Sterman, J. *C-ROADS Simulator Reference Guide*; Ventana Systems, Climate Interactive and MIT, USA, 2016.
 110. Sterman, J.; Fiddaman, T.; Franck, T.; Jones, A.; McCauley, S.; Rice, P.; Sawin, E.; Siegel, L. Climate interactive: The C-ROADS climate policy model. *Syst. Dyn. Rev.* **2012**, *28*, 295–305.
 111. Capellán-Pérez, I.; de Castro, C. *Integration of Global Environmental Change Threat to Human Societies in Energy–Economy–Environment Models*; 12th Conference of the European Society for Ecological Economics, Budapest, Hungary, 2017.

