

## SOLUCIONES ALIMENTARIAS RESILIENTES PARA EVITAR LA HAMBRUNA MASIVA DURANTE UN INVIERNO NUCLEAR EN ARGENTINA

Mónica A. Ulloa Ruiz<sup>1</sup>, Jorge A. Torres Celis<sup>1</sup>, Juan B. García Martínez<sup>1,2\*</sup>, Morgan Rivers<sup>2</sup>, David C. Denkenberger<sup>3</sup>

1. Observatorio de Riesgos Catastróficos Globales (ORCG), Baltimore, Maryland, Estados Unidos.

2. Alliance to Feed the Earth in Disasters (ALLFED), Wilmington, Delaware, Estados Unidos.

3. Department of Mechanical Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

*Mónica Ulloa R., Jorge Torres C. y Juan García M. son autores principales.*

\*Autor de correspondencia: [juan@allfed.info](mailto:juan@allfed.info)

**DOI:**  
<https://doi.org/10.55467/reder.v8i2.164>

**RECIBIDO**  
28 de septiembre de 2023

**ACEPTADO**  
15 de noviembre de 2023

**PUBLICADO**  
1 de julio de 2024

**Formato cita Recomendada (APA):**  
Ulloa Ruiz, M.A., Torres Celis, J.A., Rivers, M., Denkenberger, D.C. & García Martínez, J.B. (2024). Soluciones alimentarias resilientes para evitar la hambruna masiva durante un invierno nuclear en Argentina. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 8(2), 159-176. <https://doi.org/10.55467/reder.v8i2.164>



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

*Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)*

Diseño: Lupe Bezzina

### RESUMEN

Una guerra nuclear, una erupción volcánica, o el impacto de un asteroide o cometa pueden reducir la cantidad de luz solar que alcanza la superficie terrestre, de la que depende el sistema alimentario global. Los rendimientos agrícolas caerían debido a la disminución de temperaturas y precipitaciones, lo que se define como un Escenario de Reducción Abrupta de la Luz Solar (ERALS). Argentina podría tener un papel clave en caso de que esto ocurriese. Aquí se modelizan las intervenciones que permitirían prevenir la hambruna en Argentina e incluso en toda América Latina, incluyendo: redirección de alimentos usados como materias primas en la ganadería y producción de biocombustibles, racionamiento, relocalización de cultivos, despliegue de invernaderos simples y cultivo de algas, entre otras. Si no se implementasen adaptaciones adecuadas, la producción bruta podría caer al 30% del nivel actual, resultando insuficiente para la población Argentina. Afortunadamente, los resultados indican que incluso en un escenario de 150 Tg, las adaptaciones permitirían aumentar la producción neta desde una situación de hambruna nacional (1500 kcal/día/persona) hasta una producción equivalente a entre 3 y 6 veces la cantidad necesaria para la población Argentina (7800 - 14000 kcal/día/persona).

### PALABRAS CLAVES

Riesgo catastrófico global; Alimentos resilientes; Seguridad alimentaria; ERALS; Invierno nuclear; Argentina

RESILIENT FOOD SOLUTIONS TO PREVENT MASS FAMINE DURING A NUCLEAR WINTER IN ARGENTINA

### ABSTRACT

A nuclear war, a volcanic eruption, or the impact of an asteroid or comet can reduce the amount of sunlight reaching the Earth's surface, upon which the global food system depends. Agricultural yields would plummet due to decreased temperatures and precipitation in an Abrupt Sunlight Reduction Scenario (ASRS). Argentina may play a crucial role if such an event were to occur. This article presents and models a set of response interventions that could prevent famine in Argentina, or even Latin America as a whole. These interventions include redirecting food used as raw materials in animal agriculture and biofuel production, rationing, crop relocation, simple greenhouse deployment, and algae cultivation, among others. Without appropriate adaptations, gross production could fall to 30% of the current level, proving insufficient for the Argentine population. Fortunately, the results indicate that even in a 150 Tg scenario, the adaptations would increase net production from a national famine situation (1500 kcal/day/person) to a production equivalent to 3 to 6 times the amount necessary for the population (7800 - 14000 kcal/day/person).

### KEYWORDS

Global catastrophic risk; Resilient foods; Food security; ASRS; Nuclear winter; Argentina

## INTRODUCCIÓN

Los riesgos catastróficos globales refieren a riesgos que pueden afectar el bienestar de los seres humanos a escala global (Bostrom and Cirkovic, 2008). Dentro de los riesgos catastróficos globales, se encuentran eventos que afectan significativamente al sistema alimentario global, pudiendo causar un colapso del mismo (Benedict et al., 2021). Eventos de esta categoría se han pronosticado con una probabilidad de ocurrencia del 80% (Bailey et al., 2015), y una probabilidad de una pérdida casi total de la producción de alimentos del 10% en este siglo (Denkenberger and Pearce, 2014). A su vez, la globalización progresiva de las redes alimentarias modernas introduce una complejidad sin precedentes en el sistema alimentario global. Pese a los importantes beneficios que se derivan de esta dinámica, esto también introduce importante riesgo sistémico (Sandoval et al., 2023): las perturbaciones en un punto cualquiera del sistema podrían repercutir en toda la cadena de suministro alimentario (Maynard, 2015).

El riesgo alimentario más extremo que amenaza a la humanidad es un escenario de reducción abrupta de la luz solar (ERALS)<sup>1</sup>, es decir, un evento en el cual la atmósfera quedaría nublada por una gran cantidad de material particulado, impidiendo el paso de la luz solar, provocando un *invierno* global y, en consecuencia, un inminente colapso agrícola que podría acabar con la vida de miles de millones de personas (Xia et al., 2022).

Se han identificado al menos tres causas que podrían provocar un ERALS (Rivers et al., 2022b): el impacto de un gran asteroide o cometa, cuya probabilidad se estima en un ~0,0001% por año (Bostrom and Cirkovic, 2008); la erupción de un supervolcán, con una probabilidad de ~0,01% por año (Lin et al., 2022); y una guerra nuclear con una probabilidad de ~1% por año (Barrett et al., 2013). Las posibles consecuencias de un ERALS, como temperaturas bajo cero en el verano del hemisferio norte que impedirían la agricultura convencional, podrían llevar a un shock alimentario global catastrófico por una pérdida de la producción agrícola mundial (Coupe et al., 2019). Un ejemplo histórico de este tipo de escenario fue la erupción del volcán Tambora, ubicado en Indonesia, que desencadenó una crisis alimentaria global en el nombrado *año sin verano* en 1816 (Wilson et al., 2023). Las amenazas de origen natural (volcanes, asteroides y cometas) son notables, pero la amenaza antropogénica de la guerra nuclear es más preocupante respecto al riesgo de ERALS.

Aunque en el siglo XIX surgieron las primeras hipótesis sobre los efectos meteorológicos de la acumulación de cenizas y gases volcánicos en la atmósfera (Symons, 1888), los primeros acercamientos al estudio de un ERALS que fueron acogidos ampliamente por la comunidad científica se realizaron hasta 1982 (Martin, 1988), cuando la revista sueca *AMBIO* realizó un número especial sobre los efectos ambientales de la guerra nuclear. En este número, modelaron un escenario de una guerra nuclear a gran escala en la que se simuló una cantidad de armas equivalente a 5000 Mt de TNT sobre objetivos en América del Norte, Europa y Asia, e invitaron a diferentes científicos a escribir artículos sobre los efectos que tendría este evento. Paul Crutzen y John Birks, escribieron un artículo sobre el estado de la atmósfera tras un intercambio nuclear de estas dimensiones (Crutzen and Birks, 1983).

Tanto los hallazgos de Crutzen y Birks, como el estudio llevado a cabo por Turco et al. (1983), en el que participó el reconocido divulgador Carl Sagan, impulsaron el trabajo de investigadores de diferentes países que utilizaron modelos para calcular cómo respondería el sistema climático de la Tierra a tal cantidad de material particulado en la atmósfera y cómo la temperatura y otras variables climáticas cambiarían (Robock, 2015). A medida que los modelos climáticos se volvieron más refinados, algunos detalles sobre los cambios de temperatura se modificaron, pero nadie pudo encontrar un mecanismo que superara el "hecho básico de que la luz no puede atravesar nubes espesas de material particulado" (Ibid).

Desde estas primeras investigaciones hasta hoy, se han realizado simulaciones de los impactos que puede tener un ERALS, principalmente de origen nuclear. Algunos de los más relevantes actualmente son los ejercicios comparativos entre las proyecciones del modelo WACCM4 (Whole Atmosphere Community Climate Model version 4) y el GISS ModelE (Coupe et al., 2019). Dado que estos modelos predicen una duración de varios años para los efectos climáticos adversos, mientras que los stocks alimentarios solo podrían abastecer a la población durante varios meses, resulta urgente responder con rapidez para evitar una hambruna masiva en todo el mundo (Pham et al., 2022).

1. Usualmente abreviado en la literatura de habla inglesa como Abrupt Sunlight Reduction Scenarios (ASRS).

Como complemento de los modelos climáticos, también se han medido los impactos específicos que un evento así puede tener sobre el sistema alimentario mundial en diferentes escenarios de guerra (Xia et al., 2022). Estas investigaciones indican que la producción promedio de calorías de los cultivos podría experimentar reducciones significativas, estimándose una disminución que varía entre el 7% y el 90%, tal como se ilustra en la Figura 1; esto depende de los escenarios de guerra, que podrían generar hasta 150 Tg de ceniza según los objetivos y el tipo y cantidad de armas detonadas. Incluso el escenario más optimista implicaría una disminución del 7%, lo que superaría la mayor anomalía registrada desde el comienzo de las observaciones de la FAO sobre la producción y el consumo de calorías mundial.

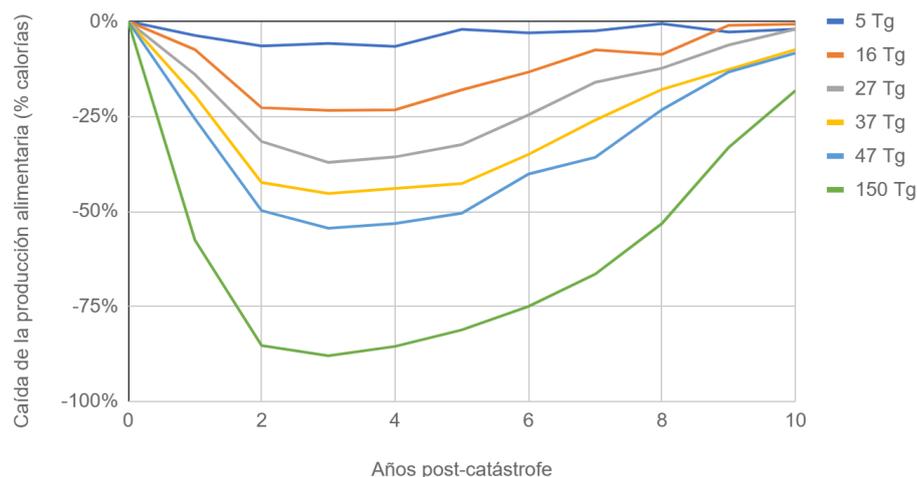


Figura 1. Disminución de la producción calórica global sin medidas de respuesta: estimaciones a lo largo del tiempo en diferentes magnitudes de invierno nuclear

Fuente: Autores, 2024, basado en Xia et al. (2022).

De la mano de estas estimaciones, durante los últimos años han surgido nuevas investigaciones que permitirían hacer frente al impacto de los ERALS sobre el sistema alimentario, identificando qué regiones son más vulnerables o resistentes a los impactos (Boyd and Wilson, 2022; Rivers et al., 2022b; Xia et al., 2022), investigando sobre alimentos resilientes (Baum et al., 2015; Jehn et al., 2023; Pham et al., 2022; Rivers et al., 2022b), o elaborando recomendaciones para agentes políticos (ALLFED, 2022; Torres et al., 2023b). La intervención de los gobiernos es prioritaria para prepararse para ERALS severos; debe haber coordinación, respaldos financieros, preparación, priorización y planes para el racionamiento de combustible, energía, atención médica y alimento (Boyd and Wilson, 2022). De acuerdo con la literatura disponible, las soluciones son posibles (Alvarado et al., 2020; Denkenberger and Pearce, 2017; García Martínez et al., 2022b; Jehn et al., 2023; Pham et al., 2022), pero la preparación debe darse con suficiente anticipación a fin de responder de manera adecuada.

A través de diferentes modelos climáticos y de adaptaciones (Rivers et al., 2022b; Xia et al., 2022), se ha resaltado la posibilidad de que algunos países del hemisferio sur experimenten una menor afectación en un ERALS. Considerando esta información, se ha llevado a cabo un proceso de selección para determinar qué país cuenta con las condiciones más favorables para ser objeto de un plan de respuesta ante tal evento dentro del contexto hispanohablante de América Latina. Teniendo en cuenta los modelos climáticos vigentes y las capacidades potenciales de producción agrícola durante un escenario así (Ver Tabla 1), el análisis sugiere que Argentina es uno de los principales candidatos para el incremento de la producción alimentaria en estas circunstancias (ver material suplementario<sup>2</sup>).

Considerando que la elaboración de un plan de respuesta en países capaces de autoabastecerse en un ERALS puede ser una oportunidad para mitigar la falta de alimento en el mundo durante este tipo de catástrofe, el presente artículo tiene como objetivo evaluar la eficacia de algunas propuestas que pueden implementarse para la preparación y respuesta ante un ERALS en Argentina. Para ello, se realiza un análisis de los cambios en la producción de calorías durante los 7 años siguientes a un ERALS de 150 Tg, considerando diferentes escenarios de implementación de las soluciones propuestas. Esto se lleva a cabo mediante un modelo de optimización lineal.

2. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11658966>

Indicador	5 Tg	16 Tg	27 Tg	37 Tg	47 Tg	150 Tg	150 Tg+hw*	150 Tg+tw**
Cambios en la producción de calorías (%) de los principales cultivos alimentarios (maíz, arroz, soja y trigo de primavera) y pescados marinos en el Año 2 después de guerras nucleares simuladas.	-2.5	7.4	-7.5	-18.4	-32.7	-73.9	-	-
Número de muertes por inanición (millones) después de la guerra nuclear simulada en el Año 2, asumiendo que no hay comercio y la producción de ganado continúa.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	-	-
Número de muertes por inanición (millones) después de la guerra nuclear simulada en el Año 2, asumiendo que el 50% del alimento para ganado se utiliza para consumo humano y el 50% del alimento para ganado se utiliza para criar ganado.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Número de muertes por inanición (millones) después de la simulación de la guerra nuclear en el Año 2, asumiendo que el ganado es sacrificado en el Año 1 y el 50% del alimento de grano para el ganado se utiliza para el consumo humano.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 1. Comparativa de Producción Alimentaria y Mortalidad Post-Guerra Nuclear en Argentina

Fuente: Xia et al. (2022).

Nota: \*150 Tg + hw representa la mitad de los desperdicios agregados al consumo de alimentos; \*\*150 Tg + tw representa el total de desperdicios agregados al consumo de alimentos.

A continuación, se describirá la metodología empleada para la priorización de países, la cual determinó la elección de Argentina como el foco de este estudio. Posteriormente, se presentarán las soluciones propuestas para la preparación y respuesta ante un ERALS. Se detallará la metodología del modelo empleado para evaluar la efectividad de estas soluciones, así como del modelo de expansión de cultivos. Además, se discutirán los resultados generados por el modelo, junto con las incertidumbres inherentes a la investigación y las perspectivas futuras para su abordaje. Finalmente, se ofrecerá una sección que contempla otras posibles intervenciones destinadas a mitigar el riesgo de un ERALS.

## METODOLOGÍA

### Priorización

La priorización del país objetivo se limitó a regiones hispanohablantes de América Latina, dado que ya existen otras iniciativas que estudian el riesgo y respuesta en regiones angloparlantes (ALLFED, 2022; Boyd and Wilson, 2022). Para la selección del país, se analizaron modelos climáticos y de producción de alimentos en condiciones ERALS (Rivers et al., 2022b; Xia et al., 2022). Tomando en consideración estos modelos, se analizó el potencial de respuesta de los países ante estos escenarios, la cual fue complementada con una matriz de decisión. En dicha matriz se evaluaron diferentes indicadores por país, como:

- » Resiliencia de la cadena de suministro, tomado del World Economic Forum Global Competitiveness Index (2020). Este indicador fue considerado, ya que en un ERALS será vital continuar con la distribución de alimentos y bienes.
- » La estabilidad política y la efectividad del gobierno, tomados del Worldwide Governance Indicators (World Bank, 2021), dado que la coordinación y la confianza en la gobernanza a nivel nacional y local pueden resultar importantes para la coordinación de la logística en la catástrofe (Boyd and Wilson, 2022).
- » Capacidad de producción. Este indicador refiere a la autosuficiencia alimentaria en condiciones de invierno nuclear, ya que cuanto mejor sea la situación de un país en el escenario sin adaptaciones, mejores posibilidades tiene de que sobreviva una parte de su población y de contribuir a la respuesta del resto de la región.

Este análisis permitió generar un listado de los países que serían prioritarios para responder a una catástrofe de esta índole, como Argentina, Uruguay y Chile. Decidimos centrarnos en Argentina, debido a que tendría mayor capacidad productiva durante un ERALS. Adicionalmente, es posible resaltar algunas condiciones potenciales de este país, como:

1. Ubicación: Como país de la zona templada del hemisferio sur, Argentina es menos vulnerable al impacto del invierno nuclear y probablemente también al invierno volcánico.
2. Recursos naturales: Argentina es rica en recursos naturales, incluyendo tierras agrícolas fértiles, reservas de petróleo, gas, y depósitos minerales.
3. Economía diversificada: La economía de Argentina es relativamente diversificada, con sectores fuertes en agricultura, minería, manufactura y servicios.
4. Infraestructura: Argentina tiene una infraestructura de transporte relativamente desarrollada (carreteras, ferrocarriles y aeropuertos) y conexiones de transporte con los principales socios comerciales.
5. Proximidad cercana a los principales socios comerciales: Argentina tiene vínculos ferroviarios con los seis países vecinos y buenos vínculos marítimos con algunos de ellos. En particular, Brasil es un importante exportador de alimentos y de combustibles fósiles. El comercio continuo con estos países, especialmente con Brasil, podría aumentar la capacidad para garantizar un suministro adecuado de alimentos y una recuperación más rápida para Argentina y alrededores.

#### Propuestas de intervenciones para la gestión del riesgo

En respuesta a la amenaza que representa un ERALS para la seguridad alimentaria en Argentina y el mundo, se proponen diversas iniciativas y estrategias que buscan garantizar el acceso a alimentos, minimizar los impactos en la producción agrícola y maximizar la disponibilidad de alimentos para el consumo humano.

Suministro de alimentos y comunicación	
Planes y estrategias para el suministro de agua	Diversificación de fuentes de suministro de agua, reducción de consumo por medio de campañas informativas, y mejoras en el almacenamiento.
Racionamiento y reducción del desperdicio de alimentos	Maximizar la disponibilidad de alimentos y garantizar el acceso a ellos de forma paulatina y controlada.
Apertura comercial y garantías para los productores	Contemplando los cupos de exportación del país, la apertura comercial sería un estimulante en la agricultura en materia de precios y una necesidad para la importación de suministros agrícolas. Se debe además brindar garantías a los productores como subsidios, compras anticipadas y el acceso al riego e insumos.
Gestión de comunicación	Contar con comunicación asertiva por medio de las entidades correspondientes para reducir el pánico que pudiese ocasionar un evento de esta índole, por ejemplo, por medio de la comprobación de que existe un plan de respuesta del país.
Soluciones en producción de alimentos	
Redirección de alimentos usados como materias primas en la producción animal y producción de biocombustibles	Redirigir el alimento que actualmente se destina a la alimentación de animales y a la producción de biocombustibles para utilizarlo en el consumo humano, además de usar biomasa vegetal no comestible para la alimentación de animales de la industria lechera.
Adaptaciones a sistemas agrícolas para aumentar la producción de alimentos	Las iniciativas propuestas de acuerdo a la ventaja productora de Argentina son las siguientes: relocalización y aumento de área de cultivos, implementación y aumento de área de invernaderos.
Adaptaciones de la acuicultura para aumentar la producción de alimentos	Las iniciativas propuestas incluyen la reactivación de la industria productora de algas y el fortalecimiento de la industria pesquera.
Adaptaciones de alta tecnología para aumentar la producción de alimentos	Las iniciativas propuestas incluyen la redirección de las capacidades industriales de producción de papel y biocombustible a la producción de azúcar, de la industria de alimentos para la obtención de proteínas vegetales y la generación de proteínas de origen unicelular (SCP).

Tabla 2. Resumen de propuestas de gestión en caso de ERALS en Argentina  
Fuente: Autores, 2024.

Las propuestas de gestión, obtenidas a través de una revisión de la literatura (Torres et al., 2023b), se han resumido en la Tabla 2 (ver arriba) y se han agrupado en dos categorías: i) soluciones en materia de suministro de alimentos y comunicación, y ii) soluciones asociadas a la resiliencia e incremento de la producción de alimentos; de este segundo grupo se desprenden las soluciones tomadas en consideración en el modelo matemático.

#### Suministro de alimentos y comunicación

En esta categoría, se encuentran recomendaciones centradas en la formulación de planes estratégicos como medidas preventivas en diversas áreas. Entre estas recomendaciones, se encuentra la gestión del suministro y el racionamiento de agua y alimentos, y la reducción del desperdicio de alimentos, lo que conlleva la implementación de campañas de concienciación entre la población (Torres et al., 2023b). A esto se suma la ejecución de una estrategia de comunicación efectiva con todos los sectores de la sociedad con el objetivo de establecer mecanismos centralizados que eviten la desinformación y el pánico en situaciones de crisis. Por último, se destaca la importancia de mantener una apertura comercial que permita la exportación de alimentos y la importación de bienes e insumos necesarios para afrontar este tipo de emergencias, como fertilizantes, pesticidas y maquinaria agrícola e industrial. Estas medidas de preparación se detallan con mayor profundidad en el informe titulado "Seguridad Alimentaria en Argentina en Caso de un Escenario de Reducción Abrupta de la Luz Solar (ERALS)" (Torres et al., 2023b).

#### Soluciones en producción de alimentos

En esta categoría se encuentran las propuestas asociadas al incremento en la producción de alimentos, la redirección de los mismos al uso humano y la aplicación de soluciones resilientes, tomadas de la literatura, principalmente (Rivers et al., 2022b). En este segundo grupo se consideran medidas a aplicar después de la ocurrencia de un ERALS, las cuales están divididas en las siguientes cuatro subcategorías:

a) Redirección de alimentos usados como materias primas en la producción animal y producción de biocombustibles.

Ante un eventual ERALS, es fundamental dar prioridad a las necesidades calóricas de los seres humanos. Se recomienda desescalar de manera progresiva pero ágil sectores agropecuarios e industriales que utilicen alimentos como base de su producción, como es el caso de gran parte de la ganadería y la producción de biocombustibles, lo que puede liberar hasta ~15,000 kcal/cápita/día (Rivers et al., 2022b; Torres et al., 2023b).

Por lo anterior sería fundamental detener la crianza de animales para producción de carne, aumentar la capacidad de sacrificio de animales de granja, y acrecentar el uso de fuentes alternativas de alimentos para los mismos, que no compitan con el alimento para humanos (como residuos vegetales). Asimismo, restringir el uso de maíz y soja que son usados actualmente como principales materias primas en la producción de Biodiesel y Bioetanol.

b) Adaptaciones a sistemas agrícolas para aumentar la producción de alimentos: relocalización de especies resilientes, expansión de área cultivada y despliegue de invernaderos.

En caso de ERALS ocurrirían cambios drásticos en las variables agroclimáticas, como la temperatura, las precipitaciones, la humedad y la radiación solar. Estos efectos serían especialmente notorios en cultivos que presenten baja tolerancia al frío como frutas, algunas hortalizas y soja. Por este motivo, sería necesario relocalizar cultivos en diferentes latitudes según el modelo climático, además de utilizar variedades vegetales que puedan adaptarse a estas nuevas condiciones de menor temperatura, como maíz, trigo y colza proveniente del hemisferio norte, o papa. El proceso de relocalización debería iniciarse inmediatamente tras la ocurrencia del evento como una forma de preparación para los años con peores condiciones, que son los primeros años tras la catástrofe (Rivers et al., 2022a).

Durante el año 2020 en Argentina fueron explotadas cerca de 37 millones de hectáreas (CEP XXI and MAGyPN, 2020); de estas, 31 millones corresponden a cultivos de alto aporte calórico a cielo abierto como maíz, soja y trigo. Durante un ERALS, ocurrirían caídas significativas en los rendimientos de los mismos de hasta un 70% (Xia et al., 2022). Debido a la dependencia de estas fuentes calóricas, se recomienda aumentar el área de tales cultivos con la finalidad de compensar las caídas en la producción, además de producir excedentes que puedan paliar la crisis alimentaria.

Según el Censo Nacional Agropecuario de 2018 (INDEC Argentina, 2021), Argentina cuenta con cerca de 154 millones de hectáreas de explotación agropecuaria, de las cuales 43 millones se consideran fácilmente cultivables desde el punto de vista de infraestructura y conectividad; estas últimas presentan un gran potencial para aumentar la producción de alimentos en el país.

Como complemento a la expansión y relocalización de cultivos, es recomendable aumentar el área de invernaderos en el país. Esto permitiría realizar un mayor control de las variables agroclimáticas, especialmente la temperatura, por lo que se recomienda un aumento rápido del área de invernaderos de baja tecnología. Alvarado et al. (2020) propone un aumento de hasta 360 veces durante los primeros 2 años, pasando de 6500 hectáreas cubiertas en la actualidad a cerca de 2.3 millones de hectáreas.

c) Adaptaciones de la acuicultura para aumentar la producción de alimentos.

Dentro de estas adaptaciones, se incluyen un incremento en la pesca y el resurgimiento de la industria de cultivo de algas, las cuales pueden ser una fuente importante de nutrientes en estos escenarios (Pham et al., 2022). Aunque la industria de cultivo de algas experimentó un auge en el país a mediados del siglo XX, en la actualidad es prácticamente inexistente. Las áreas con mayor potencial para esta actividad se encuentran en las costas de Chubut, y en el país existe conocimiento detallado de las variedades con mayor potencial (Raffo et al., 2022), no obstante existen retos en materia tecnológica que requieren intercambio técnico-científico con países con mayor experiencia en la producción de algas (Torres et al., 2023b). Además, las condiciones del escenario podrían ser lo suficientemente diferentes de la situación actual, lo que podría hacer que otras especies que no se han cultivado tradicionalmente estén mejor adaptadas al clima alterado, de manera similar a los cultivos de tierra (Jehn et al., 2023).

d) Adaptaciones de alta tecnología para aumentar la producción de alimentos.

Dentro de estas adaptaciones, se contemplan la rápida reconversión de fábricas de papel y pulpa en fábricas de azúcar lignocelulósica (Throup et al., 2022), el rápido establecimiento y despliegue de fábricas de proteínas unicelulares (SCP) (García Martínez et al., 2022b), y el aumento de las capacidades de la industria de alimentos existentes para la extracción y concentración de proteínas de origen vegetal para contrarrestar las pérdidas de la agricultura animal (Torres et al., 2023b).

### Metodología del modelo integrado

Con la finalidad de evaluar la efectividad del despliegue de diversas soluciones ante un ERALS en Argentina, se utilizó como base el modelo ALLFED Integrated Food System Model (Rivers et al., 2023) el cual usa Python. Para este caso, se tomaron en cuenta 6 escenarios con diferentes variables resumidas en la Figura 2.

Este es un modelo de optimización lineal con el objetivo de minimizar la inanición y maximizar la disponibilidad de alimentos para la población, considerando una serie de variables y factores que afectan la producción y el suministro de alimentos. El modelo distribuye los stocks y la producción nueva de la manera que optimiza el número de vidas salvadas. Para evaluar las adaptaciones del sistema alimentario al invierno nuclear, combinamos las reducciones estimadas de la producción tradicional de alimentos con estimaciones previamente publicadas de carne y lácteos, poblaciones de ganado, desechos, piensos, uso de biocombustibles, alimentos almacenados y ampliación de alimentos resilientes. Estos datos se usan para determinar la producción de calorías mensualmente durante 120 meses (10 años), cubriendo los años de menor producción agrícola. Sin embargo, solamente se informan los primeros siete años de las simulaciones, ya que los dos últimos años tienen una producción agrícola cercana a la actual.

El modelo considera una variedad de fuentes de datos, incluyendo las estadísticas de producción de la FAO, así como las pérdidas en la producción de cultivos al aire libre según el estudio de Xia et al. (2022). En lo que respecta a las adaptaciones más simples, el modelo incorpora estrategias como el racionamiento y el almacenamiento, asumiendo una distribución equitativa de alimentos entre todos los habitantes. También contempla reducciones en el desperdicio alimentario debido a la menor disponibilidad de recursos. Además, permite simular medidas más complejas, como la reorientación de alimentos utilizados en la cría de animales y la producción de biocombustibles, así como el despliegue de alimentos resilientes como las algas, la relocalización

de cultivos, la construcción de invernaderos y el uso de alimentos industriales como azúcares de origen lignocelulósico y proteínas unicelulares. Estas variables pueden consultarse con mayor detalle en (Rivers et al., 2022b).

En el escenario 2 se asumieron cuatro condiciones diferentes posteriores a la ocurrencia de un ERALS de 150 Tg: i) el escenario 2a muestra la situación después del evento sin realizar cambios en el esquema actual de producción; ii) el escenario 2b muestra el impacto de redirigir los alimentos usados en la producción animal y de biocombustibles al consumo humano; iii) el escenario 2c muestra el impacto de añadir soluciones resilientes alternativas para la producción de alimentos, como el cultivo de algas o la producción de azúcares industriales; y iv) el escenario 2d muestra el impacto de desplegar soluciones intensivas, como aumentar la cobertura de invernaderos y ampliar las áreas de cultivo hasta 70 millones de hectáreas en los tres primeros años después del evento catastrófico.

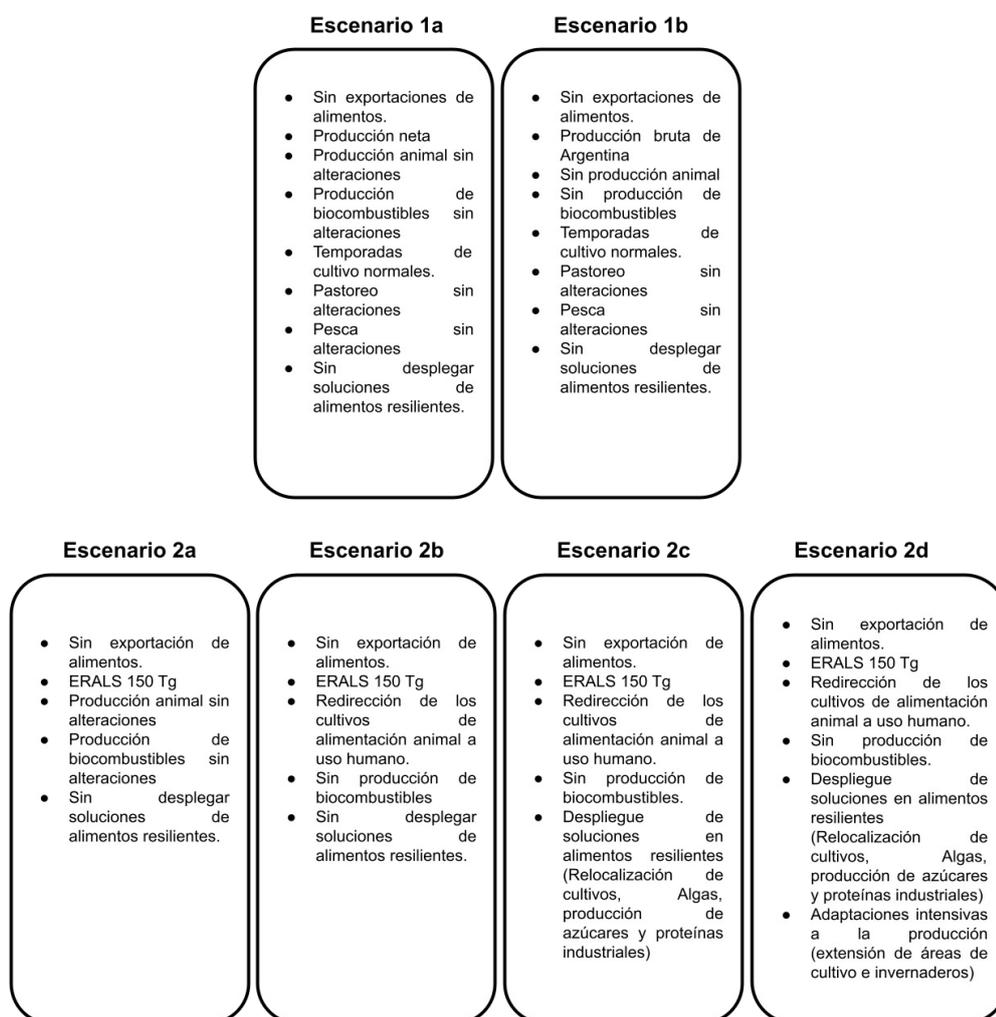


Figura 2. Resumen de las variables tomadas en consideración a la hora de correr el modelo  
Fuente: Autores, 2024.

### Expansión de cultivos

Para evaluar la alternativa con el mayor potencial de incremento en la producción calórica, que es la expansión de las zonas de cultivo, se realiza una extrapolación para determinar el aumento posible en la producción agrícola de Argentina. Esta estimación se basa en diferentes escenarios de expansión, manteniendo constante el rendimiento por hectárea. Para este propósito, se utilizan datos de rendimiento por hectárea de cultivos como soja, maíz, trigo, papa y avena, extraídos de las estadísticas de la FAO correspondientes a los años 2020, 2021 y 2022, con la finalidad de obtener la producción calórica total.

En la actualidad estos cultivos cubren un área cercana a 31 millones de hectáreas, lo que se considera como el valor de referencia. En el segundo caso, se realiza una estimación

de la producción calórica total mediante la expansión de las áreas de cultivo a 43 millones de hectáreas que se consideran fácilmente adaptables. Finalmente, en el tercer caso se considera una expansión en el área total de cultivo a 108 millones de hectáreas, las cuales requerirán adaptaciones mayores (Ritchie and Roser, 2013). Para tomar en consideración la disminución en la producción ante diferentes magnitudes de eventos de ERALS de entre 5 y 150 Tg se usa la información suplementaria de Xia et al. (2022), que incluye la caída porcentual del rendimiento promedio para el peor momento de cada escenario hacia el segundo año. Cabe mencionar que esta es una aproximación para cultivos como papa y avena, ya que en situaciones de ERALS, las caídas de rendimiento serían variables, siendo potencialmente mayores para cultivos sensibles al frío como la soja y el maíz, en comparación con cultivos más resistentes como la papa, el trigo y la avena (Torres et al., 2023a).

De lo anterior, se obtiene el aporte calórico total de la producción bruta de cada cultivo de interés en Kcal per cápita, comparados con un requerimiento de no menos de 2100 Kcal por día por persona para la población del país.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para facilitar la visualización de los efectos de un ERALS en el porcentaje de personas alimentadas, se utilizaron dos escenarios principales. El primero, basado en la producción calórica en Argentina sin un evento catastrófico (Escenario 1) con dos variaciones (a y b), y el segundo, que considera un evento de gran magnitud (150 Tg) denominado Escenario 2 con cuatro variaciones (a, b, c y d.). La finalidad de esta división es evaluar las diferentes soluciones utilizando los parámetros resumidos en la Figura 3. Los escenarios 1a y 1b tienen en cuenta la misma producción calórica, pero el último refleja la producción calórica bruta al incluir la redirección para uso humano de los alimentos utilizados en la industria animal y de biocombustibles.

Como resultado de la modelación, se obtienen en primer lugar los escenarios 1a y 1b que reflejan la producción neta y bruta respectivamente en Kcal del país previo a la ocurrencia de un ERALS, el escenario 2a muestra el resultado de no implementar ninguna medida una vez ocurre un ERALS de 150 Tg, mientras que los escenarios b, c y d, muestran el impacto de desplegar las soluciones propuestas para incrementar la producción de alimentos en Argentina.



Figura 3. Leyenda del modelo integrado para escenarios 1a, 1b, 2a, 2b, 2c y 2d  
Fuente: Autores, 2024.

### Resultados del modelo integrado sin respuesta a la catástrofe

Teniendo en cuenta los escenarios, podemos observar en la Figura 10. que, en caso de un ERALS de 150 Tg, hay una disminución significativa de 3300 Kcal disponibles para los seres humanos al pasar del Escenario 1a al Escenario 2a (Tabla 3). Esto indica que, si ocurriera esta catástrofe, el país enfrentaría inseguridad alimentaria logrando satisfacer las necesidades calóricas de apenas el 71% de su población. Por lo tanto, se necesitarán diversas soluciones para redirigir los alimentos, dar prioridad al ser humano, aumentar la producción y evitar la hambruna.

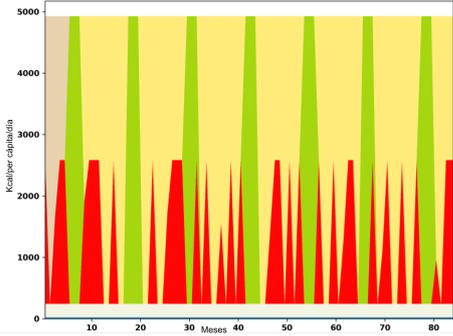
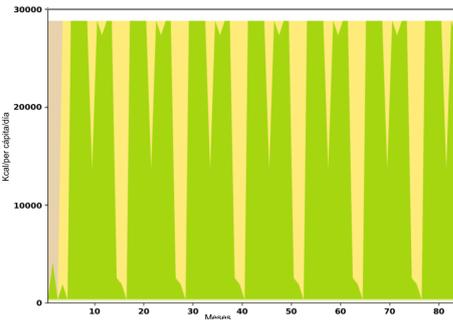
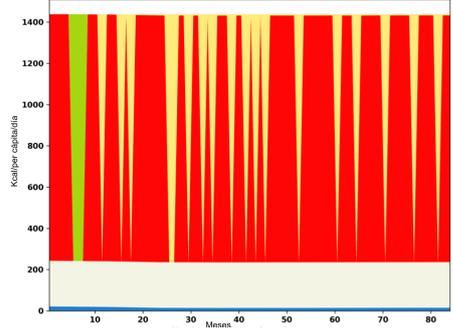
Escenario	Salida gráfica
<p>Escenario 1a) representa la producción actual neta de alimentos en Argentina, tras contabilizar la conversión del alimento usado en la producción animal a cárnicos y en la producción de biocombustibles.</p>	
<p>Escenario 1b) representa la producción actual bruta de alimentos en Argentina; esto es, la cantidad total de alimento que se produce antes de que algunos de estos alimentos se transformen en carne animal y biocombustibles.</p>	
<p>Escenario 2a) representa la producción actual neta de Argentina en un escenario dentro de las condiciones climáticas de un ERALS severo (150 Tg), con la consecuente pérdida de rendimiento agrícola, con una distribución equitativa del alimento almacenado pero ninguna otra adaptación, manteniendo el nivel actual de producción de carne animal y de biocombustibles. Nótese que la producción no alcanza la recomendación mínima de 2,100 kcal por persona y día. Este escenario supone que un porcentaje significativo de animales son sacrificados antes de ser alimentados, lo que reduce el uso de alimento a la mitad, debido a la insuficiencia de alimento disponible para los animales durante el invierno nuclear.</p>	

Tabla 3. Escenarios 1a, 1b y 2a  
Fuente: Autores, 2024.

### Resultados del impacto de las intervenciones propuestas

En los escenarios 2b, 2c y 2d, donde se redirigen los alimentos y se implementan soluciones de alimentación resilientes, se puede aumentar la producción calórica en caso de ERALS entre 3 y 6 veces los requerimientos de la población Argentina en comparación con el Escenario 2a, donde no se aplica ninguna solución. Esto permitiría suplir el consumo calórico interno y continuar con la exportación de alimentos.

Tomando en consideración los resultados obtenidos de los escenarios anteriores, se puede analizar la satisfacción de las necesidades calóricas de la población Argentina en un escenario sin ERALS (Tabla 3), donde la producción bruta es más de 10 veces las necesidades calóricas de la población. En caso de producirse un ERALS y no llevar a cabo adaptaciones en la producción de alimentos, la producción bruta cubriría tres veces la población (Tabla 4). No obstante, la producción neta no sería suficiente para satisfacer las necesidades mínimas de la población actual (Tabla 3). Esto demuestra que sería inviable alimentar a la población sin redirigir los alimentos empleados por las industrias cárnicas y de biocombustibles, incluso con un racionamiento óptimo. Con las adaptaciones de los escenarios 2c y 2d (Tabla 4), puede elevarse la producción bruta a entre 4 y 6 veces la cantidad necesaria para la población. Nótese que estos valores de producción siguen siendo muy inferiores a la producción calórica bruta actual, que es de casi 14 veces el requerimiento mínimo, pero resultan suficientes para alimentar a la población durante la crisis, si se manejan adecuadamente.

Escenario	Salida gráfica
<p>Escenario 2b) representa la producción de Argentina en ERALS con las 37 millones de hectáreas cultivadas en la actualidad, si se redirigiese el alimento que utilizan las industrias ganadera y de biocombustibles para consumo humano. La comparación con el escenario 1b) muestra cómo el ERALS ha reducido a poco más de un cuarto los cultivos utilizables para alimento en Argentina. La comparación con el escenario 2a) muestra cómo reducir la producción animal y de biocombustibles puede aumentar la disponibilidad alimentaria a casi seis veces.</p>	
<p>Escenario 2c) Es equivalente al escenario 2b), pero con la adición de adaptaciones de producción de alimentos resilientes, con el consecuente aumento de la producción y disponibilidad alimentarias. Muestra cómo soluciones alimentarias como la relocalización de cultivos, producción de algas y alimentos resilientes industriales pueden aumentar la disponibilidad alimentaria notablemente. Se asume que el azúcar lignocelulósico y la proteína unicelular de metano se utilizan como alimento para animales en este escenario y, por lo tanto, no se muestran en la figura. Aportan aproximadamente 200 kcal por persona y día entre los meses 15 y 35.</p>	
<p>Escenario 2d) es un escenario de adaptaciones más intensivas que 2c) incluyendo un despliegue significativo de invernaderos (cubriendo toda el área irrigada actual), y un aumento muy significativo de la tierra cultivada equivalente a plantar adicionalmente la mitad del área de uso agrícola que actualmente se dedica sólo a pasto (total 72 millones de hectáreas cultivadas, asumido como un aumento lineal a lo largo de 3 años, desde los 37 millones de hectáreas originales).</p>	

Tabla 4. Escenarios 2b, 2c y 2d  
Fuente: Autores, 2024.

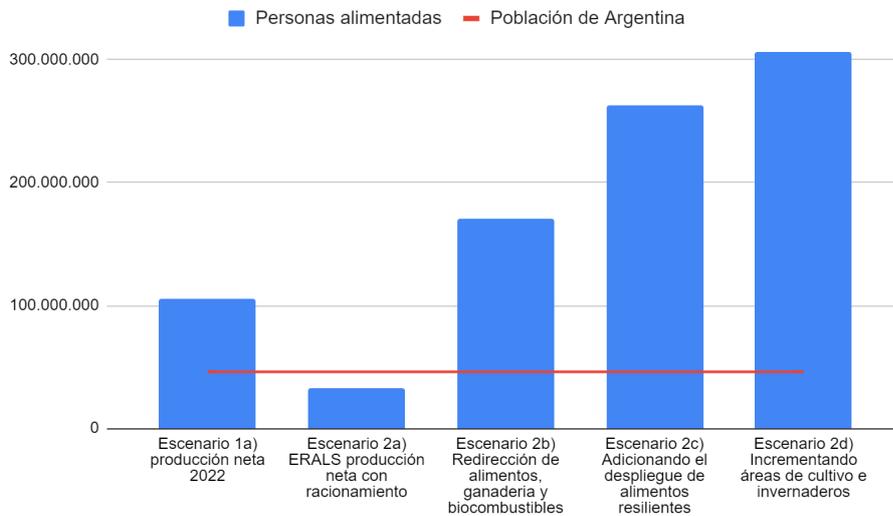


Figura 4. Número equivalente de personas alimentadas para cada escenario de modelación

Fuente: Autores, 2024.

Nota: Se contabiliza un requerimiento equivalente de 2100 kcal/día/persona.

Estos valores mayores al 100%, que se traducen en la satisfacción de las necesidades calóricas de la población actual Argentina, demuestran que es posible alimentar a poblaciones mayores en caso de ERALS mediante las exportaciones de excedentes que pueden salvar de la hambruna a casi 300 millones de personas (Figura 4). Esto ayudaría a mantener el comercio de importaciones clave para el mantenimiento de infraestructura crítica de Argentina y a reducir el riesgo de crisis humanitaria. Es importante aclarar que incluso el Escenario 2d de respuesta intensiva implicaría niveles de producción alimentaria bruta notablemente menores que los actuales, puesto que la producción bruta actual de Argentina es de unas 28000 kcal/día/persona.

Una de las soluciones que presentan mayor impacto en el aumento de la producción calórica es la redirección de los alimentos de la producción animal y de biocombustibles, cuya detención temprana en caso de ERALS aumentaría la disponibilidad de alimentos para los seres humanos de hasta 300%; este comportamiento puede verse con mayor detalle en la Figura 5.

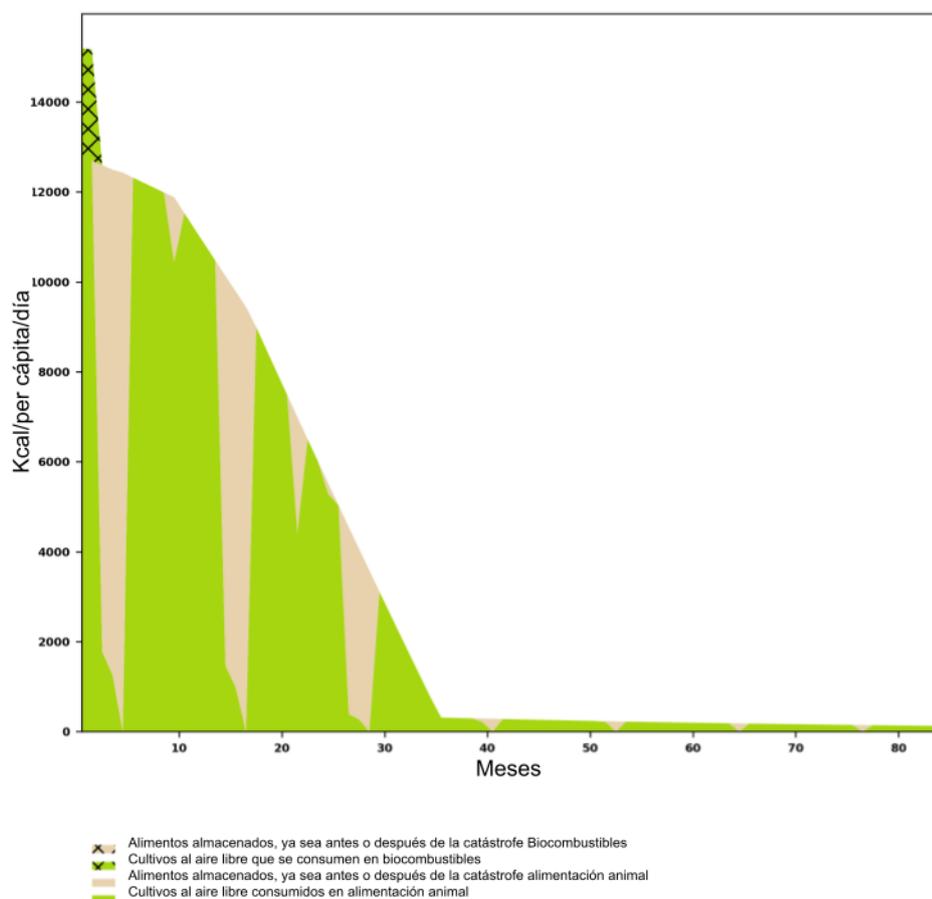


Figura 5. Calorías brutas consumidas por el ganado si se detuviese la crianza de animales para producción cárnica

Fuente: Autores, 2024.

Nota: De aquí se deduce el fuerte efecto de esta intervención en la disponibilidad calórica para la población, puesto que una cantidad de alimentos muy superior al requerimiento calórico de la población (2100 kcal/día/persona) se liberaría del uso ganadero pasando a estar disponible para consumo humano.

Debido a las principales fuentes calóricas del país provenientes de cultivos al aire libre como maíz, soya, trigo y papas, se han estimado los efectos de expandir estas zonas junto con la relocalización de variedades climáticamente tolerantes y despliegue de invernaderos de baja tecnología debido a cambios en condiciones agroclimáticas. Este aumento en la producción calórica mediante la expansión se estimó con 3 áreas: 31, 43 y 108 millones de hectáreas y tomando en consideración los cálculos de la caída en los rendimientos antes diferentes grados de afectación de ERALS obteniendo las Kcal per cápita ante cada uno de ellos, los cuales se pueden ver en la Figura 6. Nótese que 31 corresponde al área actual de los 5 cultivos principales, 43 al área fácilmente cultivable y 108 al área total utilizable para cultivo y pastoreo. Es posible que en estas áreas de más difícil cultivo se obtuviesen menores rendimientos en promedio, pero el análisis actual no lo contempla.

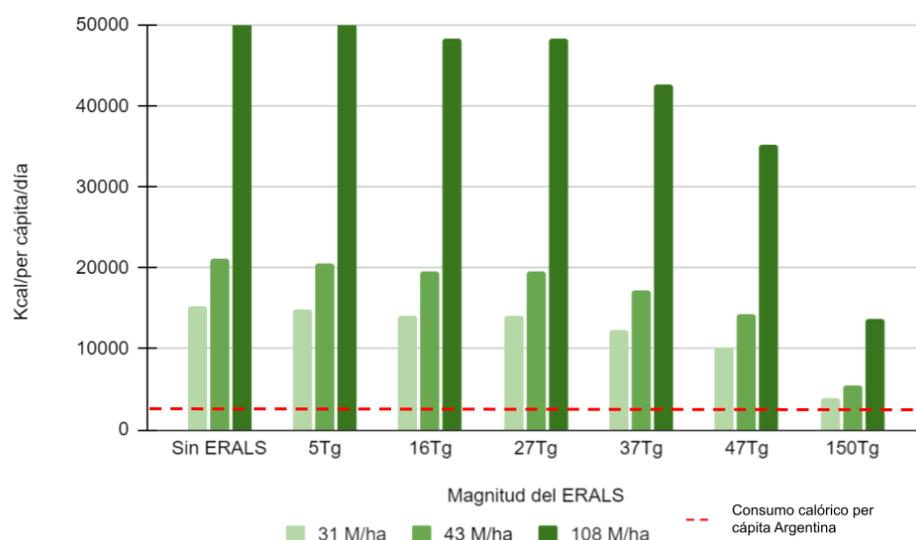


Figura 6. Producción agrícola bruta (Kcal per cápita) en función del aumento del área de cultivo en Argentina ante diferentes magnitudes de ERALS

Fuente: Autores, 2024.

Nota: La línea roja punteada representa el consumo calórico per cápita equivalente a 2100 Kcal por día.

Al considerar la cobertura de los requerimientos calóricos de la población Argentina de 2100 Kcal/día es posible estimar los excedentes que podrían destinarse al comercio internacional y disminuir la crisis generada por diferentes intensidades en un ERALS. En el mejor de los casos utilizando el área de 108 millones de hectáreas (las cuales requerirían adaptaciones mayores en materia de infraestructura) se generaría una producción calórica bruta suficiente para alimentar entre 6 y 22 veces la población del país en comparación con la base de entre 1.5 y 7 veces, dependiendo de la gravedad del escenario. En un escenario más conservador, realizando una expansión a las hectáreas fácilmente cultivables de 43 millones de hectáreas, se podría aumentar la producción calórica para cubrir las necesidades de entre 2 y 8 veces la población.

#### Incertidumbres y trabajo a futuro para abordarlas

Las incertidumbres son una característica constante al abordar la gestión de eventos de seguridad alimentaria a gran escala. Cuestiones como la magnitud del acaparamiento alimentario, la escala y severidad del escenario, la disponibilidad de alimentos o su valor nutricional, son incertidumbres cuya reducción requiere de modelos sofisticados y una comprensión profunda de los sistemas interconectados, utilizando técnicas como el análisis de escenarios, el escaneo de horizontes y la prospectiva de futuros (Rivers et al., 2022b). A continuación, se presentan las principales incertidumbres y el trabajo futuro para abordarlas.

#### Modelo integrado

A pesar del potencial de las granjas de algas como fuente de alimentos, existen desafíos tecnológicos y logísticos no resueltos. La viabilidad de aumentar la producción de algas para satisfacer una porción considerable de las necesidades calóricas humanas enfrenta incertidumbres en aspectos como el desarrollo de tecnologías de cultivo a gran escala y la disponibilidad de recursos como la fibra sintética necesaria (Rivers et al., 2022b). También se conocen limitaciones nutricionales y digestivas a la cantidad total de algas que pueden consumir diferentes poblaciones, por lo que son necesarios más estudios al respecto (Ibid).

#### Consideración del Escenario de Catástrofe

Las incertidumbres sobre el escenario pueden variar según la naturaleza de la catástrofe que provoque la reducción abrupta de la luz solar (invierno volcánico, invierno nuclear, impacto de asteroides/cometas o un escenario desconocido no cubierto en la literatura) (Pham et al., 2022), o para el escenario de guerra nuclear según los países involucrados, duración y alcance del conflicto, armas utilizadas, así como las relaciones diplomáticas y comerciales restantes (Ibid). El momento en que ocurra el evento también influye, ya que diferentes niveles de existencias de alimentos y momento de cosecha afectarían la disponibilidad inicial de alimentos (Boyd and Wilson, 2022).

### Valores Nutricionales

Este estudio utiliza la ingesta de calorías de referencia para el peso corporal promedio mundial de 62 kg, que son 2100 Kcal. Sin embargo, las necesidades nutricionales varían según la edad, género y condiciones de diferentes grupos. No se puede garantizar que las necesidades nutricionales de la población se mantendrán iguales en caso de ERALS (por ejemplo, si se diese un aumento de las calorías necesarias por persona debido a la reducción de la temperatura), ni que, en caso de mantenerse inalteradas, los valores seleccionados aplicarán específicamente para Argentina.

A su vez, en un contexto de aumento de desnutrición y enfermedades en períodos propensos a hambruna, la digestibilidad y biodisponibilidad de nutrientes podrían verse afectadas (Pham et al., 2022). La efectividad de las propuestas de producción de alimentos puede enfrentar incertidumbre debido a cambios en la luz solar y temperatura que afectan el contenido de nutrientes en cultivos, necesitando más investigación. La aceptación de los alimentos en situaciones extremas, como algas marinas o carne, se basa en su valor nutricional percibido y sensación de saciedad (Ibid).

### Variables locales

La efectividad de las intervenciones se ve influenciada por limitaciones ambientales específicas de cada región en Argentina, como las variaciones climáticas, el déficit hídrico y las particularidades del suelo. En el apartado *Trabajo futuro*, se aborda la necesidad de desarrollar modelos adaptados a este país, que permitan comprender el impacto de estas características en la productividad de los cultivos.

Asimismo, la implementación exitosa de las soluciones propuestas dependerá en gran medida de la coordinación y el compromiso de los gobiernos locales. En Argentina, un Estado federal descentralizado, cada provincia tiene su propia Constitución y marco normativo, lo que genera notables contrastes en cuanto a la legislación relacionada con la adaptación al cambio climático, la gestión ambiental, la gestión del riesgo, la planificación territorial, entre otras políticas públicas relevantes para el manejo de un ERALS.

### Cooperación y comercio

Durante un ERALS, la disponibilidad de alimentos es posible, pero está condicionada por la capacidad de respuesta y cooperación en medio de la catástrofe. No se puede garantizar la cooperación nacional e internacional ante este tipo de evento, que es de lo que depende la distribución de los insumos necesarios para la producción alimentaria moderna.

Específicamente en cuanto a las suposiciones sobre el comercio internacional durante la catástrofe, las incertidumbres radican en la reacción de los países ante la catástrofe y en el escenario cambiante de las relaciones internacionales antes y durante el escenario. Un ejemplo de ello es la solicitud de ingreso de Argentina a los BRICS+, el bloque económico al que pertenecen Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica, que podría introducir nuevas variables y consideraciones en el panorama geopolítico de las decisiones comerciales. A su vez, estas decisiones estarían influenciadas por otros factores difíciles de predecir como la política interna o la priorización de la supervivencia de la población nacional, lo que puede dificultar la concreción de acuerdos efectivos (Rivers et al., 2022b). La falta de datos concretos y la complejidad de los sistemas implicados generan incertidumbres en los resultados.

### Trabajo futuro

El cálculo preciso de la ingesta nacional de calorías en el contexto de un ERALS requerirá un enfoque más detallado en la distribución de alimentos dentro de las diversas regiones del país. Para lograr esto, se deberán incorporar modelos económicos que permitan comprender de manera más precisa las contribuciones del comercio y los sistemas locales de distribución de alimentos a la ingesta de calorías durante un ERALS.

Otro aspecto importante sería mejorar los modelos climáticos específicos para Argentina, lo que proporcionaría una base más sólida para comprender cómo los cambios en las condiciones climáticas afectarían la producción de cultivos y la disponibilidad de recursos alimentarios en el país, con el propósito de reducir la incertidumbre inherente a los modelos de cultivo. También podría involucrarse el estudio del cultivo de diversas especies bajo una gama de condiciones de ERALS, explorando cómo los cultivos responden a estas condiciones simuladas, de manera que

se puedan ajustar y validar los modelos existentes. Será necesario cotejar estos resultados con las posibilidades de implementación de cada estrategia de acuerdo a las características edafológicas, climáticas y socioeconómicas de las diferentes provincias productoras de alimentos de Argentina, así como las disposiciones del Plan Nacional de Reducción del Riesgo de Desastres que se encuentre vigente.

Dado que, como se mencionó previamente, las necesidades nutricionales varían en función de factores como la edad, el género y las condiciones específicas de diversos grupos demográficos, es esencial que las investigaciones futuras aborden estas diferencias de manera más detallada. Sería beneficioso considerar una amplia gama de subgrupos poblacionales con diferentes necesidades nutricionales (Pham et al., 2022). Se sugiere a futuro realizar un análisis detallado de cómo los diferentes grupos demográficos responden y cómo sus requerimientos dietéticos podrían ser satisfechos durante un ERALS.

Por último, resulta de importancia evaluar diferentes niveles de afectación de los sistemas industriales como parte de futuros estudios. Estos análisis deberían abarcar desde una afectación mínima hasta una disrupción extrema, con el propósito de comprender cómo los sistemas se comportarían en diferentes escenarios de crisis.

### **Otras intervenciones para la reducción del riesgo de ERALS**

El presente artículo se ha centrado en el análisis de diferentes alternativas de respuesta ante un ERALS. Sin embargo, el éxito de una respuesta depende del nivel de preparación y flexibilidad de las instituciones públicas y privadas y la población. Hay varias medidas de reducción del riesgo que se pueden aplicar para mejorar la situación actual.

A nivel gubernamental se recomienda la generación de planes de preparación, respuesta y resiliencia ante ERALS, así como los hay para otros riesgos particulares como tsunamis, terremotos o inundaciones (SINAGIR, 2018). Se pueden mejorar los inventarios estratégicos de materiales clave como insumos agrícolas o maquinaria industrial. Se pueden realizar inversiones estratégicas en investigación y desarrollo de producción de alimentos resilientes a ERALS, como pruebas piloto de construcción y despliegue rápido de sistemas de producción alimentaria (por ejemplo relocalización de cultivos o cultivo de algas), y pruebas piloto de sistemas de producción alimentaria independientes de la agricultura (como síntesis de proteína unicelular o azúcar lignocelulósica) (García Martínez et al., 2022a, 2022b, 2021; Throup et al., 2022; Tzachor et al., 2021).

Para la eficacia de la coordinación e implementación de estas recomendaciones a nivel gubernamental, será necesario contemplar las especificidades de los gobiernos provinciales y locales, dado que Argentina es un Estado federal descentralizado y estos entes poseen normativas autónomas y diferenciadas entre sí. Esto significa que la implementación puede variar según el contexto específico de cada región, por lo que será necesario identificar de manera clara y precisa los actores responsables al momento de elaborar los planes de preparación, respuesta y resiliencia, y analizar las herramientas jurídicas y los recursos disponibles en cada provincia para gestionar este riesgo, considerando las particularidades y capacidades de cada una.

Se puede adaptar la legislación para responder con rapidez y flexibilidad ante una catástrofe que requiera reducir las cuotas de producción esperadas para biocombustibles y carnes permitiendo la redirección de los alimentos que utilizan, o para facilitar el despliegue de otros métodos como algas y alimentos industriales que complementen la producción agrícola. También en el ámbito legislativo se puede adoptar legislación que requiera un análisis en profundidad de escenarios catastróficos globales y reducción del riesgo, como el Global Catastrophic Risk Mitigation Act de los Estados Unidos (Portman, 2023).

A nivel supranacional se pueden promover iniciativas que mejoren la gestión internacional de catástrofes globales, como la plataforma de emergencia global propuesta por el secretario general de las Naciones Unidas (United Nations, 2023), o medidas similares enfocadas en la preparación en lugar de sólo en la respuesta.

De manera general, se pueden también aplicar más métodos de anticipación, a través de la prospectiva de futuros, escaneo de horizontes, métodos de pronóstico (por ejemplo Delphi), o red teaming de políticas de manejo del riesgo.

## CONCLUSIONES

Un escenario de reducción abrupta de la luz solar representa una amenaza significativa para Argentina, pudiendo reducir el nivel de producción agrícola por debajo de las necesidades alimentarias de la población (cubriendo únicamente a un 70% de la misma). El análisis integrado de producción en ERALS realizado sugiere que las intervenciones propuestas pueden cambiar esto por completo, permitiendo a Argentina producir suficiente alimento para abastecer a su población y exportar a los países vecinos, ayudando a paliar una crisis alimentaria en la región.

Los resultados del modelo de optimización indican que las intervenciones (como racionamiento, redirección de alimentos consumidos por industria cárnica y de biocombustibles, adaptaciones agrícolas como relocalización de cultivos resistentes al frío y despliegue de invernaderos, despliegue de soluciones alternativas como producción de algas, y expansión del área cultivada) pueden evitar una situación de hambruna nacional (1500 kcal/día/persona) produciendo entre 3 y 6 veces la cantidad necesaria para la población (7800 - 14000 kcal/día/persona).

Sin embargo, para tener éxito, esto necesitaría complementarse de otras intervenciones de respuesta como la comunicación con la población, apertura comercial, suministro de agua, garantías económicas, entre otras. Asimismo, se recomienda establecer medidas de preparación como planes de contingencia e inversiones en tecnologías resilientes.

El trabajo futuro con vistas a reducir el riesgo de ERALS podría centrarse en una mejor caracterización del riesgo (por ejemplo, modelos agroclimáticos con menor incertidumbre y análisis de escenarios, o centrados en la región, o modelado económico), o en el desarrollo de intervenciones de respuesta, por ejemplo, investigaciones y pruebas piloto de intervenciones de resiliencia ante ERALS como las propuestas.

## AGRADECIMIENTOS Y OTROS

Agradecimientos especiales por su participación en un proyecto preliminar a este artículo a: Daniela Tiznado, Roberto Tinoco, Guillem Bas y Jaime Sevilla.

Los autores contribuyeron a la realización del trabajo de la siguiente forma. Mónica: Metodología, Validación, Análisis Formal, Redacción —Borrador Original, Revisión y Edición—, Visualización. Jorge: Metodología, Validación, Análisis Formal, Redacción —Borrador Original, Revisión y Edición—, Visualización, Administración del Proyecto. Morgan: Metodología, Software, Validación, Análisis Formal, Visualización. David: Metodología, Validación, Análisis Formal, Redacción —Revisión y Edición—. Juan: Conceptualización, Metodología, Validación, Análisis Formal, Redacción —Borrador Original, Revisión y Edición—, Visualización, Supervisión, Administración del Proyecto, Adquisición de Fondos.

El código del modelo para las simulaciones está disponible en <https://github.com/allfed/allfed-integrated-model>. La versión citable del código publicado con este artículo está disponible en <https://zenodo.org/record/8253820>.

Por último, se entrega material suplementario (Matriz de priorización): <https://zenodo.org/records/11658966>

## REFERENCIAS

- ALLFED, 2022. A Strategic Proposal to Facilitate U.S. Food Security in an Abrupt Sunlight Reduction Scenario (Unpublished).
- Alvarado, K.A., Mill, A., Pearce, J.M., Vocaet, A., Denkenberger, D., 2020. Scaling of greenhouse crop production in low sunlight scenarios. *Sci. Total Environ.* 707, 136012. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136012>
- Bailey, R., Benton, T., Challinor, A., Elliott, J., Gustafson, D., Hiller, B., Jones, A., Kent, A., Lewis, K., Meacham, T., 2015. *Extreme weather and resilience of the global food system: Final project report from the UK-US taskforce on extreme weather and global food system resilience*. The Global Food Security Programme, London.
- Barrett, A.M., Baum, S.D., Hostetler, K., 2013. *Analyzing and Reducing the Risks of Inadvertent Nuclear War Between the United States and Russia*. *Sci. Glob. Secur.*
- Baum, S., Denkenberger, D.C., Pearce, J.M., Robock, A., Winkler, R., 2015. Resilience to Global Food Supply Catastrophes. *Environ Syst Decis.* 35, 301–313. <https://doi.org/10.1007/s10669-015-9549-2>

- Benedict, K., Kane, A., Castro, J., Osano, P., Heymann, D., Kofler, R., Johnson, L., Drolshagen, G., 2021. *Global Catastrophic Risks 2021: Navigating the Complex Intersections*. Global Challenges Foundation.
- Bostrom, N., Cirkovic, M.M., 2008. *Global Catastrophic Risks*. Oxford University Press.
- Boyd, M., Wilson, N., 2022. Island refuges for surviving nuclear winter and other abrupt sunlight-reducing catastrophes. *Risk Analysis*, 43, 1824–1842. <https://doi.org/10.1111/risa.14072>
- CEP XXI, MAGyPN, 2020. *Informe de Coyuntura Agrícola*. Gobierno de Argentina.
- Coupe, J., Bardeen, C.G., Robock, A., Toon, O.B., 2019. Nuclear Winter Responses to Nuclear War Between the United States and Russia in the Whole Atmosphere Community Climate Model Version 4 and the Goddard Institute for Space Studies ModelE. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 124, 8522–8543. <https://doi.org/10.1029/2019JD030509>
- Crutzen, P., Birks, J., 1983. *The Atmosphere after a Nuclear War: Twilight at Noon*. IAEA.
- Denkenberger, D., Pearce, J., 2017. Cost-effectiveness of interventions for alternate food in the United States to address agricultural catastrophes. *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, 27, 278–289. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.10.014>
- Denkenberger, D.C., Pearce, J.M., 2014. Feeding Everyone: Solving the Food Crisis in Event of Global Catastrophes that Kill Crops or Obscure the Sun 18. *Futures*, 72, 57–68, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.333187>
- García Martínez, J.B., Alvarado, K.A., Denkenberger, D.C., 2022a. Synthetic fat from petroleum as a resilient food for global catastrophes: Preliminary techno-economic assessment and technology roadmap. *Chem. Eng. Res. Des.*, 177, 255–272. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.10.017>
- García Martínez, J.B., Pearce, J.M., Throup, J., Cates, J., Lackner, M., Denkenberger, D.C., 2022b. Methane Single Cell Protein: Potential to Secure a Global Protein Supply Against Catastrophic Food Shocks. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 10.
- García Martínez, J.B., Egbejimba, J., Throup, J., Matassa, S., Pearce, J.M., Denkenberger, D.C., 2021. Potential of microbial protein from hydrogen for preventing mass starvation in catastrophic scenarios. *Sustain. Prod. Consum.*, 25, 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.08.011>
- Jehn, F.U., Dingal, F.J., Mill, A., Harrison, C.S., Ilin, E., Roleda, M.Y., James, S.C., Denkenberger, D.C., 2023. Seaweed as a resilient food solution after a nuclear war. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7578762>
- Lin, J., Svensson, A., Hvidberg, C.S., Lohmann, J., Kristiansen, S., Dahl-Jensen, D., Steffensen, J.P., Rasmussen, S.O., Cook, E., Kjær, H.A., Vinther, B.M., Fischer, H., Stocker, T., Sigl, M., Bigler, M., Severi, M., Traversi, R., Mulvaney, R., 2022. Magnitude, frequency and climate forcing of global volcanism during the last glacial period as seen in Greenland and Antarctic ice cores (60–9 ka). *Clim Past*, 18, 485–506. <https://doi.org/10.5194/cp-18-485-2022>
- Martin, B., 1988. Nuclear winter: science and politics. *Sci. Public Policy*, 15, 321–334. <https://doi.org/10.1093/spp/15.5.321>
- Maynard, T., 2015. *Food system shock: the insurance impacts of acute disruption to global food supply*. Lloyd's Emerg. Risk Rep. Lloyd's Lond. UK.
- Pham, A., García Martínez, J.B., Brynych, V., Stormbjorne, R., Pearce, J.M., Denkenberger, D.C., 2022. Nutrition in Abrupt Sunlight Reduction Scenarios: Envisioning Feasible Balanced Diets on Resilient Foods. *Nutrients*, 14, 492. <https://doi.org/10.3390/nu14030492>
- Portman, R., 2023. S.4488 - Global Catastrophic Risk Management Act of 2022.
- Raffo, M.P., Dellatorre, F., Ciancia, M., 2022. Seaweed resources of Argentina (S W Atlantic): production, bio-ecological, applied research and challenges for sustainable development. *Appl. Phycol.*, 3, 383–421. <https://doi.org/10.1080/26388081.2022.2076260>
- Ritchie, H., Roser, M., 2013. *Land Use*. Our World Data.
- Rivers, M., García Martínez, J., Tieman, R., Jaeck, V., Butt, T., Denkenberger, D., 2022a. Deployment of Resilient Foods Can Greatly Reduce Famine in an Abrupt Sunlight Reduction Scenario. [Preprint] <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1446444/v1>
- Rivers, M., Hinge, M., García Martínez, J.B., Tieman, R., Jaeck, V., Butt, T., Jehn, F., Grillo, V., Denkenberger, D., 2022b. Food System Adaptation and Maintaining Trade Greatly Mitigate Global Famine in Abrupt Sunlight Reduction Scenarios. [Preprint] <https://allfed.info/images/pdfs/Preprint%20V2.0%20Integrated%20assessment%20ALLFED.docx.pdf>

- Rivers, M., Jehn, F.U., Lint Action, K-R-A-S-S, LzhangUT, Strange-Boop, Mears, D., Jaz H, 2023. allfed/allfed-integrated-model: Argentina. [Preprint] <https://doi.org/10.5281/ZENODO.8253820>
- Robock, A., 2015. Climate and Climate Change | Nuclear Winter. En: North, G.R., Pyle, J., Zhang, F. (Eds.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (Second Edition). Academic Press, Oxford, pp. 95–101. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00245-0>
- Sandoval, V., Voss, M., Flörchinger, V., Lorenz, S. & Jafari, P., 2023. Integrated Disaster Risk Management (IDRM): Elements to Advance its Study and Assessment. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14(3), 343–356. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00490-1>
- SINAGIR, 2018. *Plan Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres 2018-2023*. Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo.
- Symons, G.J., 1888. The eruption of Krakatoa, and subsequent phenomena: report of the Krakatoa Committee of the Royal Society. No Title.
- Throup, J., García Martínez, J.B., Bals, B., Cates, J., Pearce, J.M., Denkenberger, D.C., 2022. Rapid repurposing of pulp and paper mills, biorefineries, and breweries for lignocellulosic sugar production in global food catastrophes. *Food Bioprod. Process.*, 131, 22–39. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.10.012>
- Torres, J., Roberto, T., Daniela, T., Monica, U., Jaime, S., Juan, G., 2023a. Apéndices informe “Propuesta estratégica para facilitar la seguridad alimentaria de argentina en un escenario de reducción abrupta de la luz solar”. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7863880>
- Torres, J., Ulloa, M., Tiznado, D., Tinoco, R., Bas, G.B., Sevilla, J., Garcia, J., Morgan, R., Denkenberger, D., 2023b. Seguridad alimentaria en Argentina en caso de un Escenario de Reducción Abrupta de la Luz Solar (ERALS) Propuesta Estratégica. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11906.96969>
- Turco, R.P., Toon, O.B., Ackerman, T.P., Pollack, J.B., Sagan, C., 1983. Nuclear Winter: Global Consequences of Multiple Nuclear Explosions. *Science*, 222, 1283–1292. <https://doi.org/10.1126/science.222.4630.1283>
- Tzachor, A., Richards, C.E., Holt, L., 2021. Future foods for risk-resilient diets. *Nat. Food*, 2, 326–329. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00269-x>
- United Nations, 2023. *Our Common Agenda Policy Brief 2: Strengthening the International Response to Complex Global Shocks – An Emergency Platform* (Policy Brief). United Nations.
- Wilson, N., Valler, V., Cassidy, M., Boyd, M., Mani, L., Brönnimann, S., 2023. Impact of the Tambora volcanic eruption of 1815 on islands and relevance to future sunlight-blocking catastrophes. *Sci. Rep.*, 13, 3649. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30729-2>
- World Bank, 2021. *Worldwide Governance Indicators (WGI)*. The World Bank.
- World Economic Forum, 2020. *Global Competitiveness Report Special Edition 2020: How Countries are Performing on the Road to Recovery*. WEF.
- Xia, L., Robock, A., Scherrer, K., Harrison, C.S., Bodirsky, B.L., Weindl, I., Jägermeyr, J., Bardeen, C.G., Toon, O.B., Heneghan, R., 2022. Global food insecurity and famine from reduced crop, marine fishery and livestock production due to climate disruption from nuclear war soot injection. *Nat. Food*, 3, 586–596. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00573-0>