

Explorar escenarios posibles de transición agroecológica con el modelo SAFRA

Exploring possible scenarios of agroecological transition with the SAFRA model

Roc Padró
Generalitat de Catalunya
rocpadro@gencat.cat

Enric Tello
Universidad de Barcelona
tello@ub.edu

RESUMEN

Para hacer efectivos los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de Naciones Unidas, así como el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático, el mundo debe acelerar una transición ecológica global dentro de la cual la transición agroecológica del sistema alimentario constituye una pieza clave. Para contribuir a esa tarea, se necesitan nuevos tipos de modelos holísticos complejos capaces de desvelar las propiedades emergentes, los impactos multidimensionales y los dilemas y barreras a resolver en un cambio sistémico de tal envergadura. El modelo de programación no-lineal SAFRA ha sido concebido para explorar la pluralidad de caminos viables de transición agroecológica, partiendo de las capacidades y limitaciones de cada territorio, y de sus mejores prácticas agrarias ya existentes, como herramienta deliberativa en procesos participativos de innovación social y económica. Evitando una exposición muy técnica que ya está disponible en otras publicaciones, este artículo resume en lenguaje sencillo los resultados preliminares de la versión piloto de esa modelización reproductiva de los agroecosistemas que, optimizando diversas prioridades socialmente definidas, explora diversas configuraciones de esos nuevos territorios agroecológicos integrados por una bioeconomía circular.

Palabras clave: *transición agroecológica, bioeconomía circular, modelos reproductivos no-lineales de optimización, SAFRA.*

ABSTRACT

In order to meet the Sustainable Development Goals of the United Nations 2030 Agenda, and the Paris Agreement on Climate Change in particular, the world must accelerate a global ecological transition within which the agroecological transition of the food system is key. To contribute to this task, new types of complex holistic models are needed, capable of revealing the emergent properties, the multidimensional impacts, and the dilemmas and barriers to be resolved in such a systemic change. The SAFRA non-linear programming model has been conceived to explore the plurality of viable paths of agroecological transition, based on the capabilities and limitations of each territory, and its existing best agrarian practices, as a deliberative tool in participatory processes of social and economic innovation. Avoiding a very technical exposition that is already available in other publications, this article summarizes in simple language the preliminary results of the pilot version of this reproductive modeling of agroecosystems that, optimizing various socially defined priorities, explores various configurations of these new agroecological territories integrated by a circular bioeconomy.

Keywords: *agroecological transition, circular bioeconomy, non-linear reproductive optimization models, SAFRA.*

Recibido: 04/05/2022
Aceptado: 05/07/2022

I. INTRODUCCIÓN: POR QUÉ CAMBIAR EL MODELO AGROALIMENTARIO ES MUCHO MÁS IMPORTANTE DE LO QUE PARECE A PRIMERA VISTA

Cuando se analiza sistémicamente, y no como mero sector agrario, el sistema agroalimentario global genera el 34% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)¹. Incluso si las emisiones de combustibles fósiles se detuvieran de inmediato, las actuales tendencias de ese sistema alimentario mundial impedirían alcanzar el objetivo de 1,5°C y, para finales de siglo, nos acercarían peligrosamente a superar los 2°C de aumento de la temperatura media terrestre, de modo que hacer efectivo el Acuerdo de París requiere cambios rápidos y ambiciosos del sistema alimentario². Ello explica por qué el Comité de Seguridad Alimentaria Mundial de Naciones Unidas³, la FAO⁴ y la Unión Europea⁵ proponen acelerar la transición agroecológica como una pieza clave para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 y conseguir descarbonizar el funcionamiento la economía global en su conjunto.

Una transición agroecológica que cambie tanto el actual sistema industrial de producción agroalimentaria como la insana dieta que predomina en el Norte y entre las poblaciones más ricas del Sur Global es la vía más rápida y efectiva de reducir emisio-

¹ M. Crippa, E. Solazzo, D. Guizzardi, *et al.*, “Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions”, *Nature Food*, 2, 2021, págs. 198-209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>

² M.A. Clark, N.G.G. Domingo, K. Colgan, *et al.*, “Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets”, *Science*, 370(6517), 2020, págs. 705-708. <https://science.sciencemag.org/content/370/6517/705/tab-pdf>; P. Caron, Ferrero y G. de Loma-Osorio, D. Nabarro, *et al.*, “Food systems for sustainable development: proposals for a profound four-part transformation”, *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 2018, pág. 41. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0519-1>

³ CFS, *Agroecological and Other Innovative Approaches for Sustainable Agriculture and Food Systems that Enhance Food Security and Nutrition: Policy Recommendations*, 2021, Roma: FAO. <https://www.fao.org/agroecology/database/detail/en/c/1402652/>

⁴ HI.PE, *Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. A report of The High-Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security*, 2019, FAO: Roma. <http://www.fao.org/3/ca5602en/ca5602en.pdf>

⁵ European Commission, *Draft proposal for a European Partnership under Horizon Europe Accelerating farming systems transition: agroecology living labs and research infrastructures*, 2022, https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/agriculture-forestry-and-rural-areas/ecological-approaches-and-organic-farming/partnership-agroecology_en; J. Duncan, M. Rivera-Ferre, P. Claeys, “The importance of Food Sovereignty for the Farm to Fork strategy and the New Green Deal. Insights and limits of the SAM and SAPEA reports”, *Academic Brief*, 2020, <https://edepot.wur.nl/524951>; H. Schebesta, J.J.L. Candel, “Game-changing potential of the EU’s Farm to Fork Strategy”, *Nature Food*, 1, 2020, págs. 586-588. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00166-9>; R. S. Connino, C. Callenius, L. Lähteenmäki, J. Breda, J. Cahill, P. Caron, Z. Damianova, M.A. Gurinovic, T. Lang, A. Laperriere, C. Mango, J. Ryder, G. Verburg, T. Achterbosch, A.C.L. den Boer, K.P.W. Kok, B.J. Regeer, J.E. Broerse, T. Cesuroglu, Gill, *Research and Innovation Supporting the Farm to fork Strategy of the European Commission*, 2020, Published by FIT4FOOD2030. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10891.23840>

nes GEI abordando, a la vez, la superación de los límites planetarios en otras dimensiones de la crisis ecológica global: biodiversidad, disrupción de los ciclos biogeoquímicos de nitrógeno y fósforo, sobreexplotación y contaminación de recursos hídricos, sobrepesca, etc.⁶. Tal como indican los mejores modelos de dinámica de sistemas de que disponemos, acelerar la transición energética a fuentes renovables supone un efecto rebote del gasto energético para la obtención de minerales, metales y tierras extrañas, requeridos en la fabricación de placas solares, aerogeneradores y componentes, lo que durante mucho tiempo seguirá dependiendo de combustibles fósiles y generando GEI. En cambio, la transición agroecológica no solo reduce mucho más directamente las emisiones de GEI, sino que ayuda a enfriar el planeta secuestrando carbono mediante la regeneración de la vida del suelo (tal y como propone la iniciativa 4 por 1000 auspiciada, entre otros, por el gobierno español).

Sin embargo, sigue habiendo negacionistas que ponen en cuestión que la agricultura ecológica pueda alimentar al mundo sin destruir bosques y espacios naturales hoy protegidos, dado que sus rendimientos físicos por unidad de tierra son menores que en el cultivo agroindustrial. Al olvidar la enorme cantidad de derroche alimentario y pérdidas de recursos que se suceden a lo largo de las actuales cadenas agroalimentarias mundiales⁸, fruto del sistema económico y cultural imperante en el modelo de provisión de alimentos, tal presunción supone incurrir en una grave falacia de la composición. Según la FAO, un tercio de todos los alimentos producidos en el mundo se tira directamente a la basura⁹, lo que representa un orden de magnitud parecido a la diferencia de rendimiento existente entre un cultivo ecológico y otro agroindustrial en las mejores condiciones para este último. Pero, en términos biofísicos, el mayor de esos despilfarros es otro: dedicar a la alimentación animal casi la mitad de todos los cereales cosechados en el mundo, y en España el 53%¹⁰. Razón por la cual basta con cambiar un poco la dieta actual hacia otra más saludable, tanto para nosotros como el planeta,

⁶ J. Rockström, O. Edenhofer, J. Gaertner, J. *et al.*, "Planet-proofing the global food system", *Nature Food*, 1, 2020, págs. 3-5. <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0010-4>; J. Weigelt *et al.*, *Systemic Challenges, Systemic Responses: Innovating Adaptation to Climate Change through Agroecology*, 2020, TMG Working Paper. https://www.researchgate.net/publication/346962982_Systemic_Challenges_Systemic_Responses_Innovating_Adaptation_to_Climate_Change_through_Agroecology

⁷ J. Nieto, O. Carpintero, I. J. Miguel. *et al.*, "Macroeconomic modelling under energy constraints: Global low carbon transition scenarios", *Energy Policy* 137, 2020, 111090. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111090>

⁸ P. Alexander, C. Brown, A. Arneith, J. Finnigan, D. Moran, Rounsevell, D.A. Mark, "Losses, inefficiencies and waste in the global food system", *Agricultural Systems*, 153, 2017, págs. 190-200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.014>; IPCC, *Climate Change and the Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, 2019. <https://www.ipcc.ch/srccl/>

⁹ FAO, Food Loss and Waste Database. Take an in-depth look at what food is being lost and wasted, and where, 2019. <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/flw-data>

¹⁰ D. Soto, J. Infante-Amate, G.I. Guzmán *et al.*, "The social metabolism of biomass in Spain, 1900–2008: From food to feed-oriented changes in the agro-ecosystems", *Ecological Economics* 128, 2016, págs. 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.04.017>

para que sea factible alimentar agroecológicamente al mundo sin ampliar la superficie cultivada actual¹¹.

2. MODELIZAR LAS TRANSICIONES HACIA TERRITORIOS AGROECOLÓGICOS INTEGRADOS POR UNA BIOECONOMÍA CIRCULAR

En tanto que ciencia, práctica y movimiento, la agroecología dispone de orientaciones claras y criterios evaluables para emprender esa transición agroecológica. Steve Gliessman¹² la ha definido en cinco niveles que, junto a los diez elementos establecidos por la FAO y los trece principios agroecológicos adoptados por el High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition¹³ convocados por Naciones Unidas, han sido adoptados por la Comisión Europea y muchas otras instituciones y lugares del mundo (figura 1)

Se trata, sin embargo, de principios y no recetas para un cambio que debe partir de las capacidades, restricciones y situaciones específicas de cada lugar tanto en la dotación de recursos naturales como de los contextos sociales, económicos y políticos¹⁴. Aunque suele presentarse como una ampliación (*scaling up*) de las mejores prácticas actuales de la agricultura ecológica, y otros enfoques innovadores de agricultura sostenible, esa transición agroecológica supone un cambio sistémico. Y un cambio sistémico de tal envergadura no puede obtenerse simplemente por mera adición de nuevas explotaciones agrarias y consumidores finales que se vayan incorporando al proceso en marcha uno tras otro. Implica remover barreras, resolver dilemas y generar múltiples integraciones y nuevas sinergias que darán lugar a propiedades emergentes. Nadie sabe de antemano cómo serán, y a qué escalas, esos nuevos territorios agroecológicos integrados con una nueva bioeconomía circular donde sea posible empezar a cerrar los ciclos biofísicos básicos de carbono, nitrógeno, fósforo, materia orgánica y agua movidos por la producción, consumo y reciclaje de alimentos.

¹¹ W. Willett, J. Rockström, B. Loken *et al.*, "Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems", *The Lancet Commissions*, 2019. [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)33179-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(18)33179-9); M. C. Theurl, A. C. Lauk, G. Kalt *et al.*, "Food systems in a zero-deforestation world: Dietary change is more important than intensification for climate targets in 2050", *Science of The Total Environment* 735, 139353, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139353>

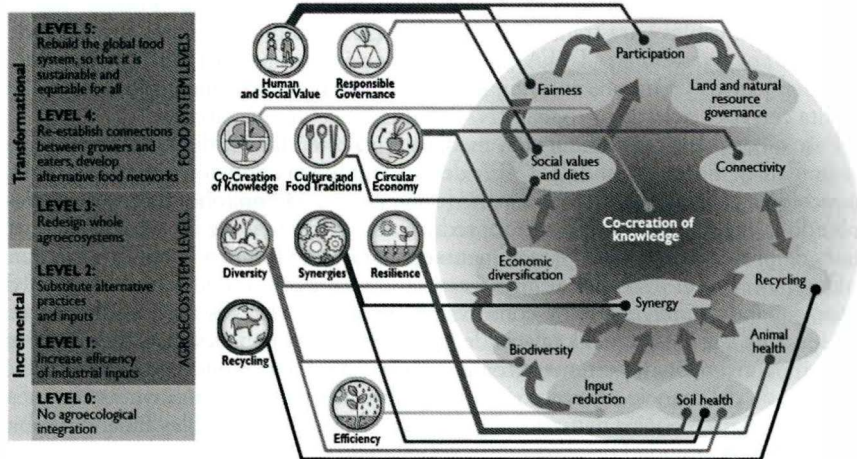
¹² S. Gliessman, "Transforming food systems with agroecology", *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(3), 2016, págs. 187-189. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1130765>.

¹³ HI.PE, 2019, *Op. Cit.*

¹⁴ Wezel *et al.*, 2020, *Op. Cit.*

FIGURA 1

CARACTERIZACIÓN DE LA TRANSICIÓN AGROECOLÓGICA ADOPTADA
POR EL PROGRAMA HORIZON EUROPE



Fuente: A partir, por ejemplo, de Wezel y otros¹⁵; European Commission¹⁶

¿De qué herramientas analíticas disponemos para ayudar a abordar esa transformación sistémica agroecológica, proporcionando formas confiables de visualizar caminos de transición factibles y deseables, teniendo en cuenta que los sistemas agroalimentarios sostenibles son mucho más complejos que los no sostenibles? Aunque la economía anda muy huérfana de modelos holísticos complejos como los que requiere esa tarea, existen algunos que pueden ser de utilidad para abordarla. Modelos biofísicos de dinámica de sistemas conectados con las tablas input-output de la contabilidad nacional, como el modelo MEDEAS o *pymedeas* de acceso abierto en la web de la Comisión Europea para prever escenarios de transición energética, pueden emplearse para contrastar la previsión de escenarios *business-as-usual* (BAU) con otros que modifiquen componentes clave del sistema de un modo que ponga en claro las palancas clave de las que depende la elección social¹⁷.

¹⁵ Wezel et al., 2020, *Op. Cit.*

¹⁶ European Comission, *Draft proposal for a European Partnership under Horizon Europe Accelerating farming systems transition: agroecology living labs and research infrastructures*, 2022, *Op. Cit.*

¹⁷ Nieto et al., 2020, *Op. Cit.*; J. Solé, R. Samsó, E. García-Ladona, et al., "Modelling the renewable transition: Scenarios and pathways for a decarbonized future using pymedeas, a new open-source energy systems model", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 132, 110105, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110105>

Junto a esos escenarios de previsión (*forecasting*), también es posible y útil emplear modelos de “retrovisión” (*backcasting*). Estos generan primero escenarios futuros deseables que permitan alcanzar una serie de objetivos sociales previamente establecidos (como el Acuerdo de París sobre cambio climático, la estrategia europea sobre biodiversidad, la directiva sobre el agua y los flujos de nitrógeno, etc.), y buscar después caminos practicables para transitar hacia ellos. Dos ejemplos recientes son el modelo *Ten Years For Agroecology* (TYFA) de una transición europea para 2050¹⁸, y el de Gilles Billen y otros¹⁹ para una reconfiguración del sistema agroalimentario europeo que permita cerrar el ciclo de nitrógeno (N) con una bioeconomía circular.

Pese a considerar una reducción media del 35% en los rendimientos energéticos por unidad de tierra, el modelo TYFA demuestra que la adopción generalizada de la agroecología y dietas más saludables puede alimentar a 530 millones de europeos manteniendo la capacidad de exportación, reduciendo gradualmente las actuales importaciones de proteínas vegetales para alimentar ganado que eliminen la huella alimentaria de Europa sobre el resto del mundo, recortando un 40 % las emisiones de GEI del sector, ganando biodiversidad y conservando recursos naturales. Los resultados desmienten, una vez más, aquella falacia de la composición que ignora las grandes pérdidas de bioconversión del sistema agroalimentario actual sosteniendo que una adopción generalizada del manejo agroecológico no podría alimentarnos sin invadir bosques y poner en peligro espacios naturales. Por su parte, el modelo de Gilles Billen²⁰ también demuestra la posibilidad de alimentar con una dieta saludable a la población europea proyectada para el 2050 sin importar piensos para animales y con la mitad del nivel actual de pérdidas ambientales de N en el entorno. Resultados similares obtienen Eduardo Aguilera y Marta G. Rivera-Ferré en sus escenarios de transición agroecológica para España²¹.

Los resultados de ese tipo de modelización son útiles para iniciar debates participativos sobre como planificar y adoptar políticas de transición agroecológica a nivel europeo u otros grandes territorios, como el conjunto del Estado español. Pero al estar contruados de arriba abajo con el método de reasignar los recursos de toda la agricultura de la UE, o de España, como si fuera “una sola granja”, sus detalles a escala regional y local resultan poco precisos. Es más, y a diferencia del estudio sobre España encargado por Amigos de la Tierra que contempla diversos escenarios²², el modelo

¹⁸ X. Poux, P.M. Aubert, “An agroecological Europe in 2050: multifunctional agriculture for healthy eating. Findings from the Ten Years For Agroecology (TYFA) modelling exercise”, *Iddri-AScA, Study N°09/18*, París, 2018. <https://www.iddri.org/en/publications-and-events/study/agroecological-europe-2050-multifunctional-agriculture-healthy-eating>.

¹⁹ G. Billen, E. Aguilera, R. Einarsson, *et al.*, “Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity”, *One Earth* 4, 2021, págs. 839-850.

²⁰ *Ibid.*

²¹ E. Aguilera, M.G. Rivera-Ferré, *La urgencia de una transición agroecológica en España. Análisis de escenarios, estrategias e impactos ambientales de la transformación del sistema agroalimentario español*, Amigos de la Tierra, 2022. <https://www.tierra.org/la-urgencia-de-una-transicion-agroecologica-en-espana/>

²² *Ibid.*

TYFA elaborado en el IDDRI-Science Po de París²³ y el de Gilles Billen y otros²⁴ se limitan a ofrecer un único escenario para toda Europa. Sabemos, sin embargo, que el avance hacia nuevos territorios agroecológicos bio-económicamente circulares será un proceso de descubrimiento por ensayo y error para el que existen criterios y principios claros, pero no recetas ni trayectorias únicas.

3. EL MODELO SAFRA: EXPLORACIÓN DE DIVERSOS ESCENARIOS DE TRANSICIÓN AGROECOLÓGICA COMO HERRAMIENTA DELIBERATIVA

Nadie sabe de antemano cómo pueden ser esos territorios alimentarios de base agroecológica. ¿Qué tamaño debe tener un territorio agroecológico? ¿Cuántos circuitos hay que cerrar y de qué tipo? ¿Qué sinergias agroecológicas se pueden activar para ir más allá de una simple suma de fincas sin integrarlas como agroecosistema? ¿Qué dilemas deben abordarse? ¿Qué barreras deben superarse? Partiendo de las limitaciones biofísicas y las capacidades ya demostradas por las mejores prácticas locales existentes, el modelo SAFRA explora distintas opciones que resulten técnica y ecológicamente viables, así como socialmente deseables, de aumentar la escala de aquellas mejores prácticas ya existentes, e integrarlas entre sí en nuevos territorios agroecológicos con un metabolismo agrario circular específico de cada lugar. Es un modelo exploratorio de futuros posibles que funciona de abajo arriba como herramienta deliberativa en procesos participativos de innovación social y económica²⁵.

El análisis bioeconómico considera los agroecosistemas una coproducción con la naturaleza en la que los agricultores invierten energía externa e información para obtener un producto agroalimentario útil para la sociedad, transformando la configuración del paisaje. A diferencia de los ecosistemas inicialmente transformados, los agroecosistemas no pueden autorreproducirse sin esa continua inversión de energía, materia e información por los agricultores. Su sostenibilidad depende de que los bienes-fondo vivos por medio de los cuales tiene lugar esa interacción sociedad-naturaleza (suelos fértiles, cultivos anuales y perennes, pastos, bosques, ganados, biodiversidad asociada, y la propia comunidad campesina) obtengan los flujos internos necesarios para mantenerse y reproducirse en buena salud, y puedan seguir proporcionando a la sociedad sus

²³ Pous y Aubert, 2018, *Op. Cit.*

²⁴ G. Biden *et. al.*, 2021, *Op. Cit.*

²⁵ R. Padró, E. Tello, I. Marco, J.R. Olarieta, M. M. Grasa, C. Font, "Modelling the scaling up of sustainable farming into Agroecology Territories: Potentials and bottlenecks at the landscape level in a Mediterranean case study", *Journal of Cleaner Production*, 275, 124043, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124043>; R. Padró, M. J. La Rota-Aguilera, A. Giocoli, J. Cirera, F. Coll, M. Pons, J. Pino, S. Pilia, T. Serrano, G. Villaba, J. Marull, "Assessing the sustainability of contrasting land use scenarios through the Socioecological Integrated Analysis (SIA) of the metropolitan green infrastructure in Barcelona", *Landscape and Urban Planning*, 203, 103905, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103905>; R. Padró, E. Tello, "Exploring Agroecology Transition Scenarios: A Pfaunder's Spectrum Assessment on the Relocation of Agri-Food Flows", *Land* 11, 824, 2022. <https://doi.org/10.3390/land11060824>

respectivos flujos y servicios ecosistémicos de producción y proveimiento, y también de sostén y regulación agroecológica, o culturales²⁶.

El *Sustainable Agroecological Farm Reproductive Analysis* (SAFRA) es un modelo de programación no-lineal que contabiliza en sus correspondientes unidades (superficie, materia seca o fresca, energía metabolizable, nutrientes, agua, horas de trabajo, etc.) todos los flujos que necesita cada bien-fondo vivo de una agroecosistema para reproducirse, junto a otras restricciones de contorno propias de cada lugar específico (dotaciones de tierra de distinta calidad y pendiente, agua disponible para riego, etc.) o que la propia sociedad haya decidido establecer (espacios naturales protegidos, límites de emisión, cargas ganaderas, etc.). Los flujos correspondientes a las capacidades productivas de esos bienes-fondo se determinan de acuerdo con los sistemas de manejo (rotaciones de cultivo, alimentación animal, etc.), capacidades productivas (rendimientos) y los requerimientos laborales (productividades) de las mejores prácticas ya existentes en el lugar previamente catalogadas, asignadas y ajustadas teniendo en cuenta las distintas cantidades y calidades de tierra y ganado (figura 2).

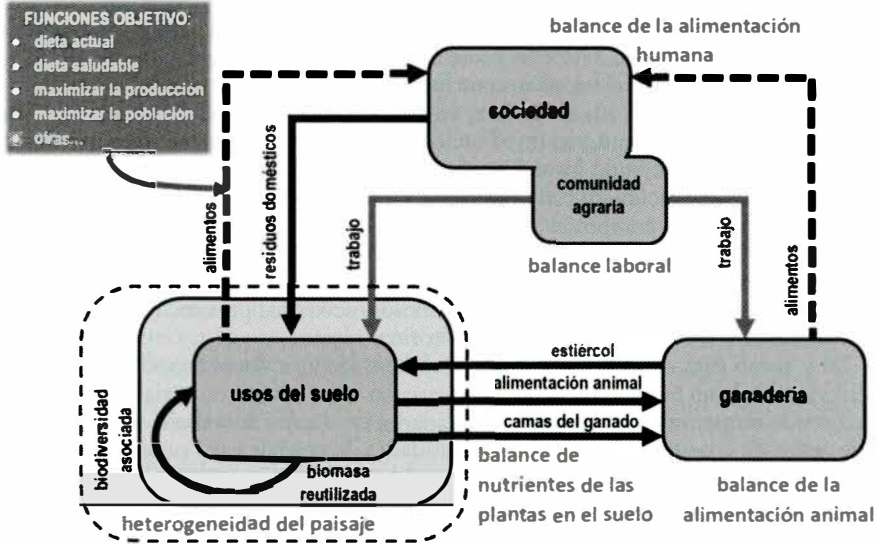
Todos esos flujos configuran distintos balances (de alimentación humana y animal, de nutrientes del suelo, laborales de la comunidad agraria) que el modelo busca optimizar respetando todas sus restricciones. Cuanto mejor alimentado esté el modelo con datos específicos de cada lugar, incluyendo las herencias bioculturales de formas precedentes de manejo agrario más sostenibles que se pueda y quiera recuperar, más confiables y precisos serán los resultados de las distintas exploraciones de futuros posibles del modelo. En la Figura 2, los cuadrados representan bienes-fondo y las flechas los flujos que estos pueden proporcionar o necesitan obtener para autorreproducirse. El modelo incorpora dos tipos de restricciones: 1) los flujos que aseguran la reproducción de los bienes-fondos (balances reproductivos); y 2) las que condicionan las capacidades y dimensiones intrínsecas de los bienes-fondo debido a limitaciones ecológicas, técnicas o culturales (a las que podemos llamar condiciones del entorno, porque son más específicas de cada lugar).

El modelo SAFRA asume que un sistema agrícola es sostenible cuando todos los bienes-fondos vivos autorreproducibles obtienen del agroecosistema toda la inversión biofísica necesaria para su mantenimiento mediante un funcionamiento bioeconómico circular, y no a partir de entradas externas. Dado que esa es una condición indispensable para efectuar cualquier optimización a partir de una función-objetivo, todos los escenarios agroecológicos explorados serán sostenibles en ese sentido limitado pero muy preciso del término. Si, por ejemplo, la función objetivo maximiza la población que podrá mantenerse con una dieta determinada en ese lugar específico, el modelo SAFRA proporciona la composición del paisaje resultante generado por este escenario prospectivo. En general, el principal resultado de cada modelización siempre será una determinada asignación de usos del suelo y el ganado que, en tales condiciones, maximiza la función-objetivo establecida como prioridad social. Cada combinación de cubiertas del suelo y actividad ganadera configura un paisaje agroecológico distinto cuya capacidad de albergar biodiversidad asociada deberá evaluarse después (y por eso el bien-fondo "biodiversidad asociada" aparece en la figura 2 con una línea discontinua).

²⁶ J. Marull, R. Padró, J. Cirera, A. Giocoli, M. Pons, E. Tello, "A socioecological integrated analysis of the Barcelona metropolitan agricultural landscapes", *Ecosystem Services*, 51, 101350, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101350>

FIGURA 2

ESQUEMA BÁSICO DE LOS PRINCIPALES FLUJOS DE REPRODUCCIÓN Y PROVEIMIENTO QUE INTERRELACIONAN LOS BIENES-FONDOS DEL AGROECOSISTEMA CONSIDERADOS EN EL MODELO DE OPTIMIZACIÓN NO-LINEAL SAFRA



Fuente: Elaboración propia a partir de Padró *et al.*²⁷.

La parametrización del sistema de ecuaciones y balances del modelo SAFRA tiene muy en cuenta las posibilidades de integración y cierre de ciclos biofísicos entre todos esos bienes-fondo vivos, incluyendo la provisión de una dieta saludable a la población consumidora y las capacidades de retorno de los nutrientes a la tierra de donde proceden. Si la obtención de los flujos requeridos por cada bien-fondo establece el criterio de sostenibilidad del modelo, la complejidad de la circulación entre todos esos flujos socio-metabólicos acaba determinando la configuración de un territorio agroecológico integrado y su paisaje. Una vez definidos como limitantes todos esos requerimientos reproductivos, junto con otras restricciones de contorno, el modelo SAFRA explora los grados de libertad del sistema para descubrir y sacar partido a todas las capacidades de integración bioeconómica circular factibles con cada conjunto de interacciones fono-flujo de los recursos disponibles (figura 2).

Como cualquier modelo de optimización, SAFRA necesita definir una función-objetivo para poder resolver todo el sistema de ecuaciones de cada exploración de escenarios futuros de transición agroecológica. De modo que para obtener cada uno

²⁷ Padró *et al.*, 2020, *Op. Cit.*

de los escenarios prospectivos, los participantes del proceso deliberativo sobre dicha transición deberán definir qué prioridades sociales quieren adoptar (que a su vez pueden jerarquizarse, o bien explorarse por separado como posibilidades alternativas). La elección de cada prioridad da lugar a un escenario distinto en forma de asignación de bienes-fondo vivos, posibles dietas y cantidad de población que podrá proveerse con estas cestas de consumo agroalimentario. Esas diferentes combinaciones de usos del suelo y ganado en distintos territorios agroecológicos son los que deberán ser analizados con enfoques y métricas del metabolismo y la agroecología del paisaje para estimar su capacidad para proveer servicios ecosistémicos de sostén, regulación y culturales directa o indirectamente relacionados con la biodiversidad²⁸.

Las emisiones de GEL a la atmósfera, así como las de nitrógeno (N) y fósforo (F) a los cuerpos de agua, constituyen otros tantos criterios para comparar y evaluar desde un punto de vista ambiental los distintos escenarios derivados de la prioridad social que define la optimización en cada escenario. Comparando sus resultados, los requerimientos laborales, la composición de las dietas, la cantidad de población que puede ser proveída, o el grado de apertura a intercambios comerciales con otros territorios agroecológicos con los que se establezcan relaciones de interdependencia, proporcionan otros tantos criterios para evaluar los distintos escenarios prospectivos explorados con el modelo SAFRA en cada paisaje, territorio o región.

Tal y como está concebido, armado y alimentado con datos específicos de cada lugar, se trata de un modelo bioeconómico circular que trabaja con variables biofísicas (incluyendo requerimientos laborales en unidades de tiempo de trabajo, y proveimiento de cestas de consumo final medidas en unidades de peso de cada producto o por su respectivo contenido en los nutrientes requeridos por la alimentación humana). Ese rasgo del modelo SAFRA deriva de adoptar una clara prelación analítica: *la sostenibilidad biofísica es lo primero*. Para considerar después los impactos de esos cambios de asignación de recursos biofísicos en los flujos monetarios de valor añadido intersectoriales y macroeconómicos, se necesita conectar sus resultados con otros tipos de modelización (por ejemplo, mediante Tablas Input-Output ambiental y socialmente ampliadas, tal como ya ocurre en el modelo *pymedeas*). Así pues, SAFRA no es un modelo prescriptivo que genere de arriba abajo un único escenario al que tender, sino una herramienta de exploración de abajo arriba de diferentes escenarios factibles y sostenibles cuya conveniencia debe ser discutida y decidida en las deliberaciones participativas de formulación de políticas, y decisiones de inversión o consumo privadas.

Como herramienta deliberativa para elegir entre diferentes caminos viables y sostenibles de transición agroecológica, los principales resultados proporcionados por el modelo son los siguientes: a) diferentes configuraciones de paisajes agroecológicos; b) un conjunto específico de requisitos laborales cuya viabilidad monetaria debe evaluarse desde un punto de vista socioeconómico; c) un tipo específico de dieta que establece la coherencia entre la producción y el consumo de alimentos, y determina el grado

²⁸ Padró *et al.*, "Assessing the sustainability of contrasting land use scenarios through the Socioecological Integrated Analysis (SIA) of the metropolitan green infrastructure in Barcelona", 2020, *Op. Cit.*; J. Marull, C. Font, R. Padró, E. Tello, A. Panazzolo, "Energy-Landscape Integrated Analysis: A proposal for measuring complexity in internal agroecosystem processes (Barcelona Metropolitan Region, 1860-2000)", *Ecological Indicators* 66, 2016, págs. 30-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.015>; Marull *et al.*, 2021, *Op. Cit.*

de autosuficiencia del territorio agroecológico considerado como paisaje alimentario, junto con su apertura comercial; y, d) a través de un análisis de sensibilidad, el descubrimiento de los principales palancas de cambio, cuellos de botella, dilemas y sinergias potenciales de cada optimización realizada.

4. RESULTADOS PRELIMINARES Y POTENCIALIDADES DEL MODELO SAFRA PARA EXPLORAR ESCENARIOS Y MONITORIZAR PROCESOS DE TRANSICIÓN AGROECOLÓGICA A DIVERSAS ESCALAS

Los resultados preliminares en la primera prueba piloto del modelo SAFRA han sido obtenidos empleando como banco de pruebas un pequeño territorio de cuatro municipios de la comarca catalana del Vallès con el que nuestro equipo de investigación lleva trabajando mucho tiempo y para el que hemos acumulado una gran cantidad de datos específicos del lugar²⁹. Concretamente, esa versión piloto del modelo contiene 1417 variables y 1977 restricciones con las que, para cada función-objetivo, SAFRA ejecuta optimalidades no lineales con la herramienta NLOPT_LN_COBYLA programada con R Core Team (2017). Se trata, sin embargo, de un territorio demasiado pequeño para que los resultados sean relevantes en términos absolutos, razón por la cual nos limitaremos aquí a presentarlos en términos relativos para poner de manifiesto los factores más determinantes que el modelo es capaz de desvelar.

4.1. *La dieta importa mucho, y la excreta todavía más*

Cuando el modelo se ejecuta para buscar cuánta población se puede proveer con los recursos, capacidades y restricciones del área de estudio, los resultados permiten constatar, en primer lugar, que, debido en parte al menor rendimiento por unidad de superficie, un cambio a cultivo ecológico sin cambiar también la dieta reduciría a una quinta parte la población que podría alimentarse. Pero si además de transitar a un cultivo ecológico, se provee a los consumidores una dieta mediterránea más saludable que la actual, la población que podría alimentarse se multiplicaría por 2,4. Así pues, basta con cambiar la dieta promedio a una mediterránea que reduzca a *la mitad* la actual ingesta de proteína animal para que se pueda *doblar* la cantidad de población que se puede alimentar con productos ecológicos en la misma superficie cultivada.

Sin embargo, esa población alimentada con una dieta mediterránea de productos ecológicos aún sería solo *la mitad* de la actualmente provista con una dieta insana por una agricultura convencional insostenible. Si a continuación nos preguntamos por qué, cuando el desnivel de rendimientos físicos por unidad de tierra entre el cultivo ecológico y el convencional es mucho más reducido, un análisis de sensibilidad nos revela que la causa principal reside en el balance de nutrientes del suelo. Per definición, el modelo SAFRA debe reponer en el suelo todo el N y P extraído sin recurrir a inputs industriales externos que la agricultura convencional obtiene directa o indirectamente de combustibles fósiles.

¿Significa eso que no existen en ese territorio recursos para conseguir un cierre sostenible del ciclo de nutrientes del suelo? En absoluto. El modelo consigue cerrar los flujos de N recurriendo a la capacidad fijadora de las plantas leguminosas, que también son un ingrediente importante de una dieta mediterránea más saludable y

²⁹ Pardó et al., 2020, *Op. Cit.*

sostenible. El problema reside en la reposición del fósforo (P) excretado por los consumidores de esos alimentos, que acaba concentrado en los lodos de las depuradoras de aguas residuales urbanas. Dado que en las grandes depuradoras esos lodos contienen muchos otros productos tóxicos o peligrosos cuando dan servicio tanto al sistema de cloacas domésticas como a talleres, industrias, oficinas, centros sanitarios, educativos y demás efuentes, por precaución ambiental hemos excluido en esa versión piloto del modelo SAFRA la reutilización de lodos de depuradora como abono orgánico para la producción de alimentos. Sin embargo, basta relajar un poco ese supuesto tan estricto para que el modelo SAFRA nos diga que, en tales condiciones, la población que podría alimentarse con una dieta mediterránea de productos ecológicos podría *doblar* la que actualmente se provee de una dieta hipercarnívora producida en la misma superficie cultivada con un manejo agroindustrial insostenible.

Ese primer resultado del modelo SAFRA es muy importante, porque además de corroborar como otros modelos la importancia de la dieta para reducir el enorme desperdicio que supone el actual sistema de ganadería industrial, también señala otra pérdida vital en el eslabón siguiente de la misma cadena agroalimentaria lineal: la conversión de los flujos de P de recurso vital a un residuo contaminante. De hecho, la disrupción de este ciclo biogeoquímico terrestre por el actual sistema agroalimentario mundial es una de las principales transgresiones de los límites planetarios de nuestro actual modelo económico-social, junto con el cambio climático y la crisis de biodiversidad³⁰.

Existen diversas líneas de investigación para tratar de cerrar esa brecha metabólica abierta ya en el siglo XIX con el sistema de cloacas de Londres —pese a la airada protesta de Justus von Liebig (1859)—, ahora impulsadas entre otras instituciones por la Unión Europea³¹. Una de ellas es la separación del fósforo, el nitrógeno y el magnesio contenido en aquellos lodos a través de la cristalización de esos tres elementos en forma de estruvita. Se ha calculado, por ejemplo, que bastaría con extraer esos cristales de estruvita de los lodos de una sola planta depuradora de aguas residuales del área metropolitana barcelonesa en el Delta del río Llobregat para fertilizar todas las tierras de cultivo existentes en la provincia de Barcelona³². Sin embargo, aún existen dudas de que esa recuperación del P perdido en los lodos pueda hacerse en condiciones sanitarias seguras que eviten dispersar patógenos peligrosos en las tierras de cultivo³³.

³⁰ J. Rockström, O. Edenhofer, J. Gaertner, *et al.*, “Planet-proofing the global food system”, *Nature Food*, 1, 2020, págs. 3-5. <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0010-4>

³¹ European Commission, EU rules promote the use of sewage sludge in agriculture as part of the Circular Economy and Bioeconomy strategies, 2022. <https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/sewage-sludge>

³² M. Rufi-Salis, N. Brunnhofer, A. Petit-Boix, X. Gabarrell, A. Guisasaola, G. Villalba, “Can wastewater feed cities? Determining the feasibility and environmental burdens of struvite recovery and reuse for urban regions”, *Science of the Total Environment* 737, 139783, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139783>

³³ D. Cordell, A. Rosemarin, J. J. Schröder, A. I. Smit, “Towards global phosphorus security: a systems framework for phosphorus recovery and reuse options”, *Chemosphere*, 84, 2011, págs. 747-758. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2011.02.032>; Q. Chen, X. An, Y. Zhu, J. Su, M. Gillings, Z. Ye, L. Cui, “Application of Struvite Alters the Antibiotic Resistome in Soil, Rhizosphere, and Phyllosphere”, *Environmental Science & Technology* 51(14), 2017, págs. 8149-8157. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01420>

Esa pérdida de ingentes cantidades de P que acaban vertidas al mar³⁴ es una de las grandes eco-ineficiencias del actual sistema lineal agroalimentario global, entre otras tantas que convierten en una falacia de la composición la presunción de que alimentar agroecológicamente al mundo requerirá mucha más tierra cultivada que la actual. De hecho, la única relajación de la restricción al retorno del P a los suelos cultivados que hemos introducido en el modelo SAFRA, y que en el caso de referencia empleado para ese primer test piloto permite acabar alimentando agroecológicamente al *doblo* de la población actual con la misma tierra cultivada, ha consistido en admitir una lenta desacumulación del considerable estoc de P actualmente inmovilizado en esos suelos después de medio siglo de sobrefertilización mineral con un uso altamente ineficiente de abonos industriales³⁵. Si este consumo del estoc de P se minimizara al máximo, a tan solo 2,3 kg P/ha/año, esa minería de nutrientes podría durar cerca de un milenio³⁶. Antes de agotarlo se deberían haber resuelto los problemas técnicos, sanitarios y económicos de recuperar los nutrientes de la excreta humana acumulados en los lodos de las depuradoras. Además, la decisión parece más que razonable en un nivel de asunción de riesgos muy inferior a otras que se siguen tomando hoy en día.

4.2. Sinergias agroecológicas: de la parcela a la integración a escala de paisaje

Uno de los elementos y principios centrales de la agroecología como ciencia, práctica y movimiento es la búsqueda de sinergias entre los componentes del agroecosistema. Se trata de un concepto estrechamente vinculado a los de diversidad, reciclaje y ahorro de inputs externos que tiene mucho que ver, en sus resultados, con la biodiversidad del paisaje y el suelo, la diversificación económica, y la resiliencia de todo el sistema (Figura 1). En los manuales³⁷ esas sinergias suelen ejemplificarse con prácticas como el cultivo mixto intercalado, la rotación de cultivos con leguminosas, y otras prácticas

³⁴ M. Chen, T. E. Graedel, "A half-century of global phosphorus flows, stocks, production, consumption, recycling, and environmental impacts", *Global Environmental Change* 36, 139e152, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.12.005>.

³⁵ D. Cordell, J. O. Drangert, S. White, "The story of phosphorus: global food security and food for thought", *Global Environmental Change* 19, 292e305, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>; M. Li, T. Wiedmann, M. Hadjikakou, "Towards meaningful consumption based planetary boundary indicators: the phosphorus exceedance footprint", *Global Environmental Change* 54, 227e238, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.12.005>; J. Peñuelas, J. Sardans, J. M. Alcaniz, J. M. Poch, "Increased eutrophication and nutrient imbalances in the agricultural soil of NE Catalonia, Spain", *Journal of Environmental Biology* 30, 841e846, 2009. <http://www.jeb.co.in/>

³⁶ Padró et al., 2020, *Op. Cit.*

³⁷ SOCLA, *Agroecology: Key Concepts Principles and Practices*, Berkeley: Third World Network and Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología, 2015. <http://agroeco.org/wp-content/uploads/2015/11/Agroecology-training-manual-TWN-SOCLA.pdf>; J. D. Van der Ploeg, D. Barjolle, J. Bruil, et al., "The economic potential of agroecology: Empirical evidence from Europe", *Journal of Rural Studies*, 71, 2019, págs. 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.09.003>; C. R. Anderson, J. Bruil, M. J. Chappell, C. Kiss, M. P. Pimbert, *Agroecology Now! Transformations Towards More Just and Sustainable Food Systems*, Cham: Palgrave Mcmillan/Springer Nature, 2021. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/43292>

diversificadas que buscan sacar partido a esas asociaciones. En tales casos, la clave son las complementariedades de nicho que reducen o incluso revierten la competencia por los recursos escasos del suelo entre especies vegetales filogenéticamente muy distintas, permitiendo que el aumento de la biodiversidad redunde en una mayor Producción Primaria Neta fotosintética por unidad de superficie³⁸, y una mayor estabilidad³⁹ al prevenir el surgimiento y propagación de enfermedades y plagas⁴⁰.

Junto a esas prácticas que incrementan la agro-diversidad a nivel de parcela, el modelo SAFRA ayuda a comprender y cuantificar las propiedades emergentes de las sinergias practicadas a escala de paisajes y territorios agroecológicos más amplios⁴¹. En efecto, uno de los resultados más importantes de la primera contrastación empírica del modelo SAFRA es el siguiente: la cantidad de tierra necesaria para proveer una determinada dieta es mayor cuando se cuenta cada componente vegetal y animal por separado, que cuando la modelización integra los diversos usos del suelo entre sí y con el ganado mediante una bioeconomía circular que aproveche todos los coproductos y subproductos a escala de paisaje. Ese resultado demuestra lo que las sinergias agroecológicas pueden conseguir revirtiendo las ineficiencias derivadas de la falta de interconexión fondo-flujos en el manejo lineal de los monocultivos de la agricultura convencional y las granjas de engorde industrial de ganado⁴².

En el caso de estudio empleado como primer banco de pruebas, si el manejo ecológico se lleva a cabo mantenimiento separados el ganado y la producción agrícola, la cantidad total de tierra de cultivo necesaria con la dieta actual serían 0,47 ha/persona, que se limitarían a 0,24 ha con una dieta mediterránea; pero aun se reducirían hasta tan solo 0,16 ha por persona relajando las restricciones para la reposición de los flujos de P en el suelo, y añadiendo una mayor integración y complejidad circular del paisaje agroecológico. Por tanto, cuando los usos agrarios no se integran en paisajes agroecológicos más complejos, la capacidad de alimentar población de manera sostenible es menor de la que tiene el cultivo convencional, debido la diferencia de rendimiento entre agricultura ecológica y convencional, y los ciclos más largos de la ganadería ecológica. Sin embargo, el modelo SAFRA muestra que esas diferencias pueden anularse y revertirse con estrategias de gestión agroecológica multifuncional a escala de paisaje.

³⁸ P. Reich, J. Knops, D. Tilman, *et al.*, "Plant diversity enhances ecosystem responses to elevated CO₂ and nitrogen deposition", *Nature* 410, 2001, págs. 809-810. <https://doi.org/10.1038/35071062>

³⁹ M. W. Cadotte, R. Dinnage, D. Tilman, "Phylogenetic diversity promotes ecosystem stability", *Ecology* 93(8), S223-S233, 2012. <https://doi.org/10.1890/11-0426.1>

⁴⁰ T. Kennedy, S. Naem, K. Howe, *et al.*, "Biodiversity as a barrier to ecological invasion", *Nature* 417, 636-638, 2002. <https://doi.org/10.1038/nature00776>

⁴¹ M. A. Altieri, C. I. Nicholls, "Agroecology Scaling Up for Food Sovereignty and Resilience", In E. Lichtfouse (ed.), *Sustainable Agriculture Reviews*. Vol. 11, Dordrecht: Springer Nature, 2012, págs. 1-29. [file:///C:/Users/Enric/Downloads/agroeco-scaling-upfor%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Enric/Downloads/agroeco-scaling-upfor%20(1).pdf); A. Wenzel, H. Brives, M. Casagrande, *et al.*, "Agroecology territories: places for sustainable agricultural and food systems and biodiversity conservation", *Agroecology and Sustainable Food Systems* 40(2), 2016, págs. 132-144. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1115799>; D. López-García, M. González de Molina, "An Operational Approach to Agroecology-Based Local Agri-Food Systems" *Sustainability* 13(15), 8443, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13158443>

⁴² Padró *et al.*, 2020, *Op. Cit.*

La estrategia más determinante es integrar la ganadería —las especies rumiantes en particular— como bio-convertidores de pastos naturales y subproductos agrícolas que no compiten con la alimentación humana, lo que reduce significativamente el coste territorial de la agricultura ecológica comparada con el manejo convencional y las granjas industriales de engorde. Otra estrategia de integración es el uso multifuncional del bosque como proveedor de nutrientes del suelo cultivado, sea directamente —con abono vegetal obtenido de aclareos selectivos, podas y mantillo— o a través de la bioconversión animal con la ganadería extensiva. Esas estrategias de la agroecología del paisaje, basadas en las sinergias de una mayor diversidad de bienes-fondo vivos integrados a través de flujos más complejos y circulares, generan a su vez mosaicos agro-silvo-pastorales ecofuncionales que acogen mayor biodiversidad. En un contexto mediterráneo, son cada vez más valorados como medio de prevención de incendios forestales.

Dicho de otro modo, la integración sinérgica entre bienes-fondo en los territorios agroecológicos puede reducir o anular el menor rendimiento físico del cultivo y la ganadería ecológicas, comparadas con la agricultura industrial y la eficiencia lineal pienso-carne de las granjas industriales de engorde. Esto explica que la densidad de población sostenible con un territorio agroecológico integrado pueda llegar a *superar* la que puede alimentarse en la situación actual. En definitiva, por esa otra vía los resultados preliminares del modelo SAFRA confirman de nuevo que el desnivel de rendimiento entre agricultura ecológica y la convencional a escala de parcela o finca puede contrarrestarse con estrategias de recirculación interna de baja entropía mediante una integración más compleja entre los bienes-fondos vivos de los paisajes agroecológicos.

4.3. *Relocalización y autosuficiencia no supone autarquía: grados de apertura comercial sostenible entre territorios agroecológicos interdependientes*

El modelo SAFRA también permite evaluar las ventajas y limitaciones de concebir los nuevos territorios alimentarios de base agroecológica no como islas autárquicas, sino como una red interdependiente de áreas básicamente autosuficientes donde una bioeconomía circular pueda garantizar la soberanía alimentaria y el cierre del ciclo de nutrientes del suelo. En este caso, las distintas optimizaciones se han aplicado considerando los nutrientes requeridos por una alimentación humana sana, dejando que la modelización busque y encuentre los productos de la cesta alimentaria que pueden suministrarlos tanto con la producción local como a través de un cierto grado de intercambio comercial, siempre que este no impida la completa reposición de nutrientes del suelo. Los resultados indican que la autarquía reduciría en un tercio la capacidad de suministro de alimentos del territorio estudiado, comparado con cierto grado de intercambio que se mantenga dentro de un umbral sostenible determinado por la reproducción orgánica de la fertilidad del suelo en el territorio estudiado.

Al mismo tiempo, sin embargo, más allá de ese umbral sostenible que puede y debe evaluarse para cada territorio agroecológico interdependiente, la apertura comercial se enfrentaría con crecientes problemas para mantener una reposición circular de nutrientes del suelo, y también la diversidad del paisaje requerida para albergar suficiente biodiversidad asociada a los agroecosistemas y mantener los servicios ecosistémicos de sostén y regulación. Esos resultados preliminares confirman el enfoque pionero de

la cuestión planteado por Leopold Pfaundler en 1902⁴³, pero requieren más estudios empíricos en áreas más amplias realizados junto con agricultores y ganaderos locales u otros actores interesados que definan conjuntamente las condiciones, capacidades, factores limitantes y los rangos de apertura comercial compatibles con la justicia ambiental global entre diversos procesos de transición agroecológica en marcha⁴⁴.

5. CONCLUSIÓN

El modelo SAFRA ha sido concebido y desarrollado por el ingeniero forestal Roc Padró en el equipo multidisciplinar liderado por Enric Tello dentro del equipo catalán del proyecto internacional *Sustainable Farm Systems*, constituyendo también la base de los desarrollos realizados en su tesis doctoral⁴⁵. Su versión piloto inicial ha sido contrastada empíricamente con datos de un pequeño territorio de la comarca catalana del Vallès, obteniendo unos primeros resultados preliminares que demuestran las capacidades de ese nuevo tipo de modelización para explorar diversos caminos viables de transición agroecológica, desvelando sus sinergias y palancas de cambio, y también los dilemas a resolver o barreras a derribar. Esa exploración prospectiva de escenarios futuros está concebida como una herramienta para la deliberación de políticas públicas en un proceso participativo de innovación social y económica de abajo arriba, metodológicamente afín a los planteamientos de la agroecología como ciencia, práctica y movimiento. El primer caso de estudio relevante como territorio donde se está aplicando el modelo SAFRA es la isla de Menorca, por encargo del Institut Menorquí d'Estudis (IME).

Como todos los modelos, SAFRA tiene también sus límites, y la deliberación sobre qué escenarios de transición agroecológica factibles se consideran más deseables desde un punto de vista ambiental y socioeconómico requiere conectar sus resultados con otros modelos. Las distintas configuraciones de los paisajes agrarios prospectivos pueden examinarse con modelos como ELIA, IDC o SIA para evaluar su capacidad para albergar biodiversidad y proveer el abanico completo de servicios ecosistémicos⁴⁶. Sus impactos socioeconómicos a lo largo de la cadena de valor del sistema agroalimentario pueden evaluarse con un análisis Input-Output social y ambientalmente ampliado que, en los países y regiones de la Unión Europea, permita conectar el SAFRA con la base de datos del modelo CAPRI que emplean los Joint Research Centers de la Comisión Europea que trabajan en el sistema agroalimentario.

⁴³ J. Martínez Alier, J. Roca Jusmet, *Economía Ecológica y Política Ambiental*. Fondo de Cultura Económica: México City, México, 2013.

⁴⁴ Padró y Tello, 2022, *Op. Cit.*

⁴⁵ Padró, *Agroecological Landscape Modelling as a Deliberative Tool, Learning from Social Metabolism Assessment of Historical Transitions to Industrial Agriculture for Future Sustainable Food System*, Facultat d'Economia i Empresa de la Universitat de Barcelona, 2018. <https://www.tdx.cat/handle/10803/463069#page=1>

⁴⁶ Padró *et al.*, "Assessing the sustainability of contrasting land use scenarios through the Socioecological Integrated Analysis (SIA) of the metropolitan green infrastructure in Barcelona", 2020, *Op. Cit.*; Marull *et al.*, 2016, 2021, *Op. Cit.*

El próximo lanzamiento de un paquete de programas de investigación Horizon Europe para acelerar la transición agroecológica⁴⁷, con apoyo del Plenario de la Asamblea de Representantes Regionales y Locales de la Unión Europea⁴⁸, va a necesitar que la comunidad científica desarrolle y aplique modelos innovadores como el SAFRA que puedan contribuir a esa tarea imprescindible para abordar y resolver los grandes retos ambientales y sociales de nuestro tiempo.

⁴⁷ European Commission, *Draft proposal for a European Partnership under Horizon Europe Accelerating farming systems transition: agroecology living labs and research infrastructures*, 2022, *Op. Cit.*

⁴⁸ European Commission, Declaration of The EU's Assembly of Regional and Local Representatives on Agroecology. NAT-VII/010, 142nd plenary session, 3, 4 and 5 February 2021. <https://cor.europa.eu/EN/our-work/Pages/OpinionTimeline.aspx?oplId=CDR-3137-2020>