

## ARTÍCULO RESEÑA

# Metodologías para la evaluación de sistemas agropecuarios. Parte I. Generalidades. Análisis del ciclo de vida (ACV) y de las redes ecológicas (ENA)

## *Methodologies for evaluating farming systems. Part I. Generalities. Life cycle analysis (LCA) and ecological network analysis (ENA)*

Fabien Stark<sup>1,2,3\*</sup>, Charles-Henri Moulin<sup>4,5</sup>, Chloé Cangiano<sup>6</sup>, Mathieu Vigne<sup>8</sup>,  
Jonathan Vayssières<sup>7</sup> y Eliel González-García<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Unité Mixte de Recherche Systèmes d'Elevage Méditerranéens et Tropicaux (UMR 868, SELMET), 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France

<sup>2</sup>AgroParisTech, Centre de Montpellier, France

<sup>3</sup>Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Unité de Recherches Zootechniques (UR0143, URZ), Guadeloupe, France

<sup>4</sup>Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Unité Mixte de Recherche Systèmes d'Elevage Méditerranéens et Tropicaux (UMR 868, SELMET), France

<sup>5</sup>Montpellier Supagro, Unité Mixte de Recherche Systèmes d'Elevage Méditerranéens et Tropicaux (UMR 868, SELMET), France

<sup>6</sup>Agrosup Dijon, France

<sup>7</sup>Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Dakar, Sénégal

<sup>8</sup>Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), La Réunion, France

\*Autor para correspondencia: fabien.stark@iavff-agreenium.fr

**RESUMEN:** El objetivo de esta revisión es ofrecer las bases generales de una selección de metodologías actualmente disponibles a escala internacional para la evaluación dinámica de sistemas de producción. Después de un análisis de conceptos esenciales relacionados con el enfoque de sistemas, se presentan (en dos trabajos sucesivos) las metodologías análisis del ciclo de vida (ACV), análisis de redes ecológicas (Ecological Network Analysis –ENA–), eficiencia energética integral (EMERGY), y trayectoria de sistemas; así como un ejemplo de la aplicación de algunos de sus principios en la construcción de un modelo de evaluación integral de sistemas agropecuarios (denominado GAMEDE). Para cada una de las metodologías, se describen los principios y bases generales de su aplicación, los objetivos y el tipo de análisis que se puede abordar, así como las claves para la correcta utilización e interpretación de los resultados. Se utilizaron referencias que remiten a ejemplos concretos, en los que se emplean las metodologías que fueron descritas sucintamente. En cada una de las secciones del artículo se trata de contextualizar los principales elementos a tener en cuenta en la elección de la metodología más adecuada para llevar a cabo un determinado estudio, su dependencia en función de la naturaleza de los objetivos planteados, así como las eventuales posibilidades de combinación de una o más metodologías en el mismo marco de análisis.

**Palabras clave:** visión de sistema, análisis de redes ecológicas, emergía, trayectoria de sistemas.

**ABSTRACT:** The objective of this paper is to provide the general bases for a group of internationally available methodologies, used for the dynamic evaluation of production systems. After an analysis of key concepts related to the system approach, the methodologies are presented (in two successive works): life cycle analysis (LCA), ecological network analysis (ENA), integral energy efficiency (EMERGY) and system trajectory; as well as an example of the application of some of their principles in the construction of an integral evaluation model of farming systems (called GAMEDE). For each of the methodologies, the overall principles and bases for their successful application are described, as well as the objectives, the kind of analyses possible to be carried out, and the keys for the correct utilization and interpretation of the results. References were used that provided concrete examples, illustrating the use of the methodologies that were succinctly described. Each of the sections of the paper attempts to contextualize the main elements to be taken into consideration in the selection of the most adequate methodology to carry out a certain study, its dependence on the nature of the stated objectives, as well as the eventual possibilities of combining one or more methodologies in the same analysis framework.

**Keywords:** system approach, ecological network analysis, emergy, system trajectory

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas sostenibles para la producción agrícola y ganadera requiere de herramientas metodológicas que permitan una evaluación rigurosa de los procesos implícitos y de sus dinámicas. Estas herramientas permitirían avanzar en el estado del arte acerca del funcionamiento de una diversidad de sistemas complejos (por ejemplo, sistemas integrados agricultura-ganadería u otras variantes de sistemas agroecológicos). Además, facilitarían el diálogo entre los investigadores, los extensionistas, los productores y otros actores decisivos de la cadena de producción de alimentos (van Mil *et al.*, 2014), para acompañar los procesos de transferencia tecnológica, de extensión y de políticas decisionales (*decision making*).

En la literatura internacional existe un amplio espectro de metodologías para la evaluación de sistemas (Bockstaller *et al.*, 2006; 2008; 2009); sin embargo, una gran parte de ellas se concibieron para las condiciones específicas en que se hizo el estudio. Es por ello que, al seleccionar la(s) metodología(s) más idónea(s) que se deben aplicar en un contexto determinado, se recomienda efectuar un análisis previo de sus ventajas, desventajas, posibilidades de aplicación y modificaciones en el contexto de interés.

## El enfoque de sistema. Conceptos y reflexiones

Los sistemas se pueden definir como un conjunto de elementos o componentes que comparten la estructura de un todo y que están relacionados entre sí, con complementariedad y coherencia entre sus diversas funciones, y grados variables de interdependencia en el tiempo y el espacio.

Existen una serie de conceptos clave alrededor de la noción de sistemas (Packham *et al.*, 2007); entre los que se encuentran: A) la identidad (cómo reconocer y calificar el sistema); B) el propósito u objetivo principal, o sea, la prioridad del sistema; C) la identificación de: a) el ambiente (¿cuáles son los principales factores medioambientales que afectan el sistema?, sobre todo aquellos que este es incapaz de controlar), b) las fronteras dentro de las que el sistema posee algún control, c) los subsistemas —que son sistemas en sí mismos y poseen una jerarquía entre ellos—; D) la emergencia: en cada nivel de la jerarquía, se presentan propiedades emergentes que no pueden ser identificadas en el estudio «por partes» (pues constituyen «sorpresas») y que requieren de monitoreo, evaluación y ajuste continuo.

El *feedback* o retroalimentación constituye también una noción importante para comprender el potencial de adaptación del sistema. Este es negativo cuando la respuesta del sistema a una perturbación o cambio de práctica de manejo se opone al efecto de tales acciones, lo cual conduce al mantenimiento del balance y al equilibrio dinámico. En cambio, el *feedback* positivo es aquel en el que la respuesta del sistema sigue en el mismo sentido de la perturbación, lo que provoca cambios deseables o indeseables. Un sistema posee un estado de equilibrio inestable cuando las respuestas a los cambios son siempre positivas. Por otra parte, la noción de comunicación y control se refiere a los mecanismos en los que el sistema se basa para sus operaciones principales; con la comprensión de tales mecanismos se podrá influenciar el sistema hacia vías deseables (Packham *et al.*, 2007).

Además, existe la noción de sistemas abiertos o cerrados, la que depende del número o abundancia de entradas (*inputs*) y salidas (*outputs*) que ocurren a través de las fronteras del sistema y de la relación con su entorno. Así, un sistema será más abierto cuanto más *inputs* y *outputs* ocurran a través de sus fronteras.

A partir de lo expuesto anteriormente, se puede asumir que para lograr el equilibrio de los sistemas y sus componentes, es decir, para lograr que estos sean sostenibles, se requiere tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. La necesidad de conocer bien el sistema y su funcionamiento, en relación con:
  - La diversidad de sus componentes biofísicos.
  - El papel de cada componente dentro del todo (sistema).
  - La interdependencia entre los componentes y sus variaciones en tiempo y espacio (noción dinámica).
  - La naturaleza y los límites de los mecanismos específicos y genéricos, que garantizan la supervivencia del sistema (sostenibilidad) en situaciones de choque o perturbación (capacidad adaptativa).
2. Una vez conocido el sistema, este se podría modular, acompañar, regular y manejar para extraer los resultados deseados a corto, mediano y largo plazos.

Sin embargo, con relativa frecuencia no se obtienen los objetivos de sostenibilidad o de equilibrio del sistema, lo que se relaciona íntimamente con el desconocimiento de su funcionamiento. Entre las causas más frecuentes se encuentran: a) ignorar la diversidad y concentrarse en los componentes —o

subcomponentes— aislados, unitarios (rasgo característico de la ciencia reduccionista); b) concentrarse en funciones y/o mecanismos a escalas demasiado reducidas, sin considerar los efectos acompañantes, colaterales y secundarios, y las interdependencias (efecto dominó o *zoom*); c) concentrarse en el «ahora» (noción estática vs. dinámica); d) desconocer los límites (positivos y negativos) de los mecanismos y funciones que componen el sistema. Como consecuencia, frecuentemente se es incapaz de modular, acompañar, regular y manejar de forma correcta el sistema, con un enfoque holístico que lo haga sostenible.

En este sentido, desde el punto de vista conceptual, la idea central del *system-thinking* (visión de sistema) pretende sentar las bases para evitar dicha visión unilateral del todo (van Mil *et al.*, 2014). En síntesis, el concepto o visión de sistema aborda tres puntos fundamentales:

- El todo es diferente a la suma de las partes (contraste con la visión de la ciencia reduccionista).
- La interacción entre las partes le proporciona al sistema la propiedad del «todo».
- El establecimiento «del todo» en el que estamos interesados constituye un dilema y uno de los retos principales que se deben resolver cuando se comienza un estudio profundo de sistema. En este sentido, se recomienda evitar «resolver todos los problemas del universo» al mismo tiempo, cuando se analiza una problemática específica. Para ello, en primer lugar, se sugiere identificar un conjunto de interacciones, que no sea tan ambicioso pero que esté lo más relacionado posible con el objetivo global prioritario. Una vez identificado, inmediatamente se deben establecer sus fronteras.

### Las metodologías para la evaluación de los sistemas como herramientas acompañantes esenciales

La literatura internacional dispone de una gran diversidad de metodologías a partir de las preocupaciones relativamente recientes en torno a temas sensibles como la seguridad alimentaria, la sostenibilidad, el crecimiento demográfico, la crisis energética y/o el cambio climático (Verstegen, *et al.*, 1995; van der Werf y Petit, 2002; Singh *et al.*, 2012; Cinelli *et al.*, 2014). Dichas herramientas son de naturaleza variable (cualitativas, cuantitativas), con niveles de riqueza, complejidad/profundidad y flexibilidad fluctuantes y con aplicaciones de carácter más o menos científico o de soporte a políticas

decisionales (Figueira *et al.*, 2005; Gasparatos *et al.*, 2008; Gasparatos y Scolobib, 2012). Estas se pueden clasificar como metodologías finalizadas (*closed*) o en construcción o evolución (*open*), es decir, que admiten mejoras continuas en su estructura y funcionamiento. En la fase de aplicación de estas herramientas, la modelización desempeña un papel crucial en los procesos de diagnóstico, simulación de escenarios, predicción de resultados y estimación de impactos. Para la correcta ejecución de dichas metodologías resulta esencial, ante todo, poseer una visión y enfoque integrado y holístico del sistema. Por tanto, se fomenta entonces una visión de convivencia y compromiso entre especialidad y multidisciplinariedad, en la dinámica de trabajo en equipo.

Desafortunadamente, algunas de las metodologías disponibles presentan un exceso de tecnicismo, de complejidad de algoritmos, y un papel exagerado de la matemática y la estadística, a pesar de que son imprescindibles para garantizar el adecuado rigor en el análisis e interpretación de los resultados. En ocasiones, esto restringe el acceso de un tipo de usuario, lo que limita el aprovechamiento de las potencialidades y utilidades que se pudieran extraer de estas herramientas. Por otra parte, los avances en la concepción y construcción de estos métodos se han obtenido, principalmente, en centros y países desarrollados, con significativos recursos financieros y científicos. Sin embargo, existen grandes oportunidades para la generación, aplicación y validación de metodologías novedosas en las condiciones de países con menos recursos, en los que se están poniendo en práctica sistemas de producción innovadores, creativos y complejos, que han surgido —curiosamente— como respuesta a la escasez de recursos materiales y financieros.

Por ello, en el artículo se ofrecen las bases generales de cuatro metodologías utilizadas para la evaluación de sistemas agropecuarios: 1) análisis del ciclo de vida (ACV), 2) análisis de redes ecológicas (ENA), 3) eficiencia energética integral (EMERGY), y 4) trayectoria de sistemas. La selección se basó en que se dispone de experiencia en su utilización, y en que estas cuentan con un gran potencial de aplicación y adaptación a un rango flexible y diverso de condiciones biotécnicas y socioeconómicas.

#### 1) Análisis del ciclo de vida (ACV)

El análisis del ciclo de vida de un producto es una metodología relativamente reciente y en proceso

de evolución, que cobró auge a partir de la década de 1970, a propósito de los fenómenos relacionados con el cambio climático global y sus efectos colaterales sobre la mayoría de los sectores productivos y socioeconómicos. Actualmente, es una de las más extendidas y empleadas a nivel internacional, con una amplia literatura disponible en diversas esferas (Pennington *et al.*, 2004; Rebitzer *et al.*, 2004; EPA, 2006; Hellweg y Milà i Canals, 2014).

Esta metodología es utilizada por investigadores, especialistas y productores de todas las ramas para calcular los impactos potenciales relacionados con el ciclo de vida de un producto, e identificar las posibles formas de reducir el consumo de recursos y evitar efectos negativos sobre el medioambiente.

Como su nombre lo indica, mediante esta se analiza el ciclo de vida completo de un producto —con sus procesos implícitos—, desde el inicio hasta el final. En la figura 1 se muestran las posibles fases de un ACV, con las típicas entradas y salidas, desde la creación, producción o colecta del conjunto de materias primas involucradas, hasta la generación, la distribución y el consumo del producto por los «clientes potenciales» y las emisiones relacionadas durante todos los procesos.

### Tipos de ACV

En general, existen dos tipos de ACV: el ACV atributivo o descriptivo y el ACV consecuencial u orientado al cambio (Rebitzer *et al.*, 2004). En el

primer caso, se describe la serie de flujos que ocurren en el sistema y que están «asociados a» o son «atribuibles a» la liberación/producción de una cantidad específica de la unidad funcional (UF). La UF es la base que posibilita la comparación de los procesos en estudio, implicados en la producción de bienes y/o servicios (por ejemplo: kilogramos equivalentes de CO<sub>2</sub> para comparar el potencial contaminante de una práctica o tecnología). Los resultados a todos los niveles son lineales, al igual que la modelación del sistema, por lo que la magnitud de los flujos resulta de poca importancia.

Por su parte, el ACV consecuencial hace énfasis en el estimado del conjunto de cambios que pudieran ocurrir en el sistema, en relación con su potencial de contaminación y emisiones y con el flujo de recursos, como respuesta a los cambios provocados en el nivel de la UF. Por tanto, el sentido y efecto de los flujos puede depender significativamente de la magnitud del cambio provocado.

### Estructura y componentes de un ACV

En la serie 14000 de la *International Standard Organization* (ISO) se estableció la estructura del ACV (fig. 2). La ISO 14040 (International Standard Organization, 1997) se relaciona con los principios y la estructura; la ISO 14041 (International Standard Organization, 1998), con la definición de los objetivos, el marco y el análisis del inventario; la ISO 14042 (International Standard Organization,

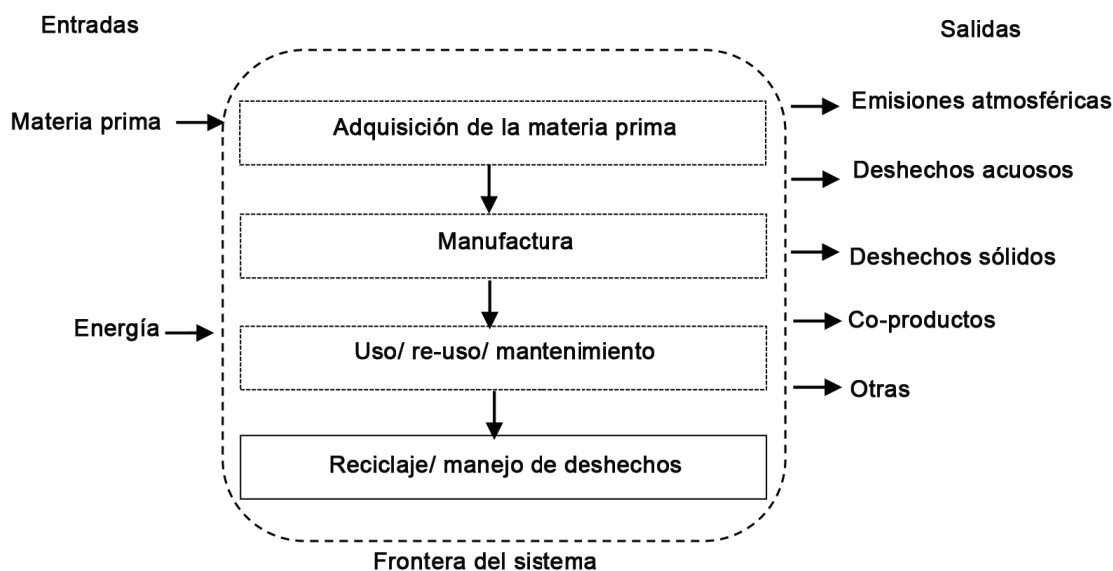


Figura 1. Lógica en la aplicación del ACV para la evaluación y/o comparación de escenarios en un tema determinado.

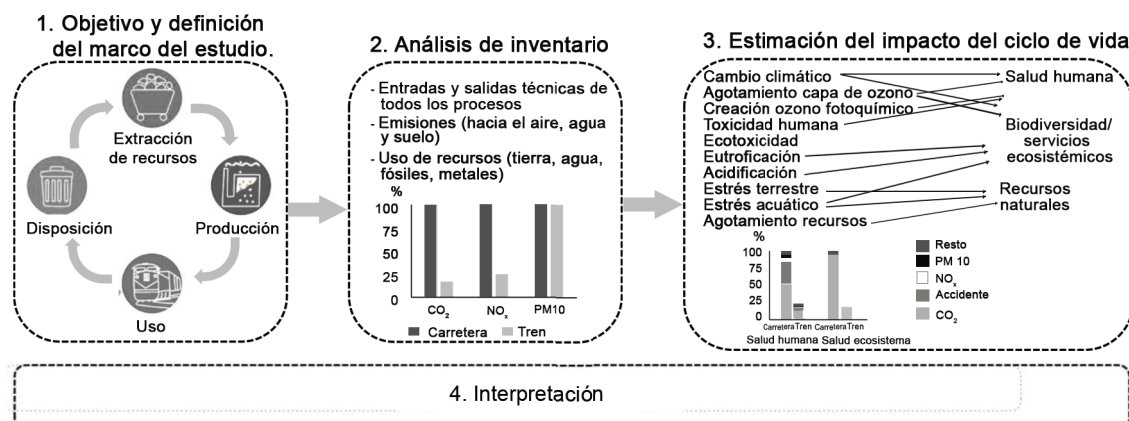


Figura 2. Las cuatro fases de un ACV. Ejemplo del impacto de diferentes medios de transporte de mercancía. Comparación del transporte por carretera o por ferrocarril. (Adaptado de Hellweg y Milá i Canals, 2014).

2000a), con la estimación del impacto del ciclo de vida; y la ISO 14043 (International Standard Organization, 2000b), con la interpretación del ciclo de vida.

El ciclo de vida completo, junto con los flujos de materiales y de energía asociados, es comúnmente conocido como «sistema-producto». En este sentido, se reconocen cuatro componentes metodológicos, fases o etapas en los ACV (Rebitzer *et al.*, 2004; Hellweg y Milá i Canals, 2014):

**Etapla 1.** Definición de los objetivos y marco de intervención, fronteras del sistema (*goal and scope*)

Con esta etapa se garantiza la descripción detallada del sistema en términos de fronteras y de la UF.

**Etapla 2.** Inventario del ciclo de vida (ICV)

Con esta fase de trabajo, que consta de tres partes (1: compilación, 2: tabulación, y 3: análisis preliminar de todos los intercambios con el medioambiente –emisiones, consumo de recursos, etc.–), se pretende estimar el consumo de recursos y las magnitudes de flujos, residuos, desechos y/o emisiones, por UF, que son provocados en el sistema y causados por, o atribuibles a, el ciclo de vida de un producto.

**Etapla 3.** Estimación del impacto del ciclo de vida (EICV)

En esta etapa se seleccionan los indicadores pertinentes para el análisis de las contribuciones potenciales a la extracción y utilización de recursos, y las emisiones/desechos, sobre la base del inventario previo (etapa 2) relacionado con una serie de impactos potenciales.

**Etapla 4.** Interpretación y propuesta de mejora del ciclo de vida (mejora EICV)

En esta fase se interpreta el ciclo de vida en cada etapa del ACV, lo que conlleva realizar comparaciones

transversales entre categorías de impacto, particularmente cuando hay compromisos (*trade-offs*) entre productos alternativos, o si es deseable priorizar áreas de interés en el interior de un ciclo en análisis; además, se establecen los límites en magnitud y profundidad de los análisis e interpretaciones, los cuales serán el resultado de decisiones colectivas entre los actores incluidos/interesados en el análisis. Asimismo, la multidisciplinariedad del equipo que aplica el ACV desempeña un papel decisivo, ya que resulta imprescindible para realizar las interpretaciones transversales, en las que se combinan, por ejemplo, las ciencias naturales, las económicas y las sociales.

## Aplicaciones del ACV

La metodología ACV se puede aplicar a cualquier tipo de producto o tipo de decisión en el que los impactos ambientales de los ciclos o una de sus partes resulten de interés para un colectivo determinado, como es el caso de la agricultura (Brentrup *et al.*, 2001; Brentrup *et al.*, 2004; Basset-Mens y van der Werf, 2005; Renouf *et al.*, 2008; Bessou *et al.*, 2013) o la ganadería (Beauchemin *et al.*, 2011; Dick *et al.*, 2015).

Dicho colectivo puede representar a uno o a diferentes actores presentes en la cadena del ciclo (por ejemplo: organizaciones gubernamentales, o no gubernamentales, la industria y una amplia variedad de sectores, de manera autónoma o con la ayuda de centros de investigación o consultores).

Aunque se reconoce la importancia creciente de los ACV en el diseño de políticas públicas, hasta la actualidad las actividades en el sector industrial, junto con los cambios en el comportamiento de los consumidores, son finalmente los factores cruciales en el



aumento o la reducción de los impactos medioambientales asociados a los productos.

Por su parte, Rebitzer *et al.* (2004) describieron cómo los ACV podían influir en el funcionamiento de diferentes actores, desde pequeñas y medianas empresas o emprendedores hasta multinacionales y organizaciones internacionales (por ejemplo: Unión Europea, PNUMA), en el apoyo a la toma de decisiones y la planificación de políticas públicas efectivas. Uno de los elementos más importantes durante el proceso de aplicación de los ACV, y que depende de la naturaleza de los actores que lo ejecutan, es la «simplificación» del ejercicio, la que es determinada, fundamentalmente, por una correcta definición del marco de acción que se debe cubrir (fig. 3). Uno de los principales objetivos de un ACV, común a todos los niveles de aplicación, es la identificación de puntos ambientales «sensibles» (*hotspots*), que contribuyan a la toma de decisiones pertinentes para la mejora del producto y la sostenibilidad corporativa de la cadena a todos los niveles (Hellweg y Milà i Canals, 2014).

Beauchemin *et al.* (2011) aplicaron los ACV para contribuir con la evaluación de los impactos potenciales sobre el medioambiente de los sistemas típicos de producción de carne bovina en el oeste de Canadá. Los efectos de una serie de estrategias de atenuación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel del sistema productivo se evaluaron a través de ciclos productivos sucesivos; para ello se utilizaron diferentes estrategias y se modificó el sistema de alimentación y de manejo del rebaño. Los ACV se aplicaron con el empleo de la plataforma HOLOS –[www.agr.gc.ca/holos-ghg](http://www.agr.gc.ca/holos-ghg)– (Little *et al.*, 2008), la cual considera las emisiones significativas de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> a nivel de la granja, para establecer el potencial de emisiones totales en función de los escenarios. Las estrategias implementadas en el sistema de cría incluyeron cambios en los niveles de inclusión de forraje en la dieta, la suplementación con lípidos poliinsaturados, el uso de residuos de granos de maíz seco de destilería, el incremento de la longevidad del ganado de cría o la mejora de los indicadores reproductivos. El estudio

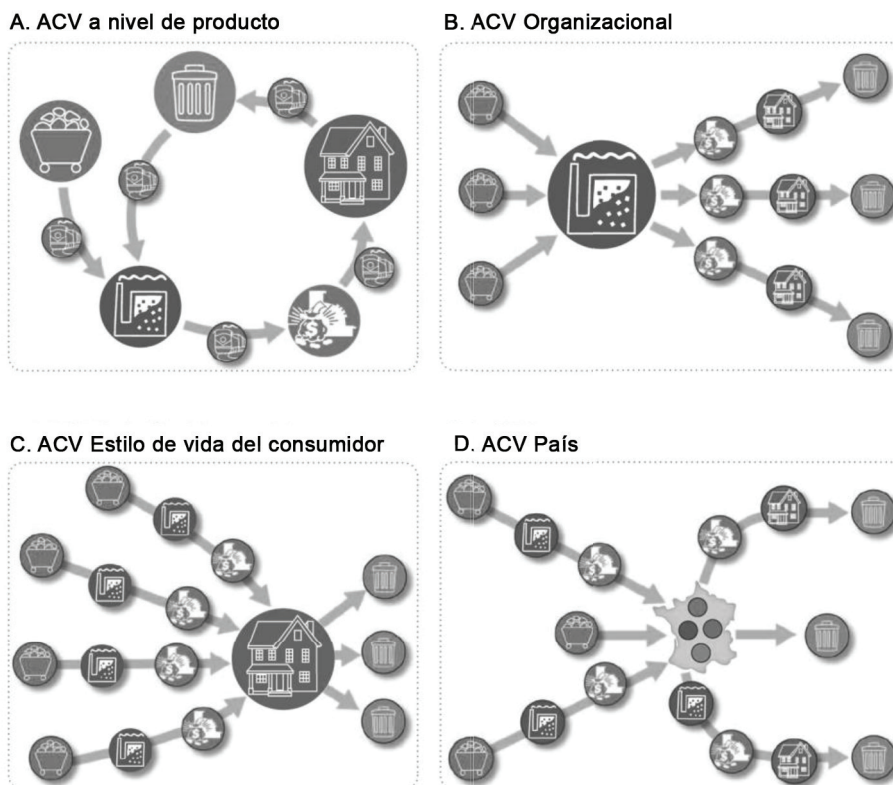


Figura 3. Representación de la naturaleza expansiva de los ACV. (A). Estudio a nivel del producto original. (B) ACV a nivel de una empresa/ compañía. (C) ACV de los patrones de consumo y estilos de vida del consumidor. (D) Estimaciones a nivel nacional (Adaptado de Hellweg y Milà i Canals, 2014).

se basó en la simulación de una granja con un rebaño de 120 vacas, cuatro toros y su descendencia, la cual completaba el ciclo productivo en un sistema de ceba en estabulación (*feedlot*). El sistema incluía un área de pastoreo con pasto natural y parcelas de producción de forraje. El ACV cubrió una estimación de ocho años sucesivos de producción. En el escenario línea de base (*baseline*; sin aplicar las estrategias de atenuación) se estimaron emisiones de GEI de 22 kg equivalentes de CO<sub>2</sub>/kg de canal producida; el 80 % provino del sistema de cría (vaca-ternero) y el otro 20 % del sistema de ceba en estabulación. Las emisiones entéricas representaron el 63 % de las emisiones estimadas en este escenario base. La aplicación de las estrategias antes citadas logró reducir las emisiones de GEI hasta el 8 %, para cada una de ellas de manera aislada, y hasta el 17 % cuando se combinaron. Sin embargo, las estrategias aplicadas al ganado de ceba (*feedlot*) tuvieron un impacto mínimo sobre las emisiones, con una reducción de menos de 2 % en el caso de las aplicadas individualmente y entre 3-4 % al combinarlas.

Dick *et al.* (2015) realizaron un estudio similar en las condiciones de la crianza de ganado bovino de carne en pastoreo, en Brasil. Las estrategias incluyeron el incremento de la producción de forraje y su calidad, la introducción de leguminosas para reemplazar la utilización de fertilizantes nitrogenados, la mejora de los indicadores reproductivos y el incremento de la eficiencia de utilización del forraje. También se consideró la estabilización del carbono almacenado en el suelo a largo plazo. Los resultados mostraron que inducir cambios en la producción y la calidad de forraje representó entre 7,8 y 20,7 % de los GEI producidos en el escenario *baseline*, y mejoras en la reproducción entre 0,5 y 1,2 % de las emisiones. El uso de la tierra se redujo entre 9,4 y 30,6 %, y la introducción de leguminosas disminuyó el agotamiento de los recursos fósiles. El análisis de sensibilidad indicó, finalmente, la posibilidad de aplicar estas estrategias con mejoras a corto plazo, incluyendo el potencial de secuestro de carbono. Se demostró que es factible aplicar mejoras en la productividad ganadera y en la protección ambiental simultáneamente, sobre la base de los pastos y forrajes, en sistemas ganaderos tropicales.

## 2) Análisis de redes ecológicas (ENA). Aspectos prácticos para su aplicación en el estudio de los agroecosistemas

El contexto agrícola mundial exige reconsiderar los objetivos agrícolas, que se relacionan con alcanzar

mejores producciones con la utilización de menos recursos, para una población en aumento, en un ambiente cada vez más vulnerable (Darnhofer, 2010; De Schutter, 2011; Dumont *et al.*, 2013). Para ello, en la actualidad existe un consenso sobre la necesidad de desarrollar sistemas agrícolas basados en los principios de la agroecología (Seré y Steinfeld, 1996; Herrero *et al.*, 2010; Altieri *et al.*, 2012), los cuales aportan un nuevo enfoque que permite la aplicación de metodologías que provienen de la ecología, para analizar el desarrollo de los agroecosistemas. De las metodologías que existen, el análisis de redes ecológicas (*Ecological Network Analysis*, ENA) constituye una de las opciones más interesantes para el análisis sistémico de los agroecosistemas. Este método es utilizado por los ecólogos para estudiar las relaciones que se establecen entre las especies en un ecosistema determinado, con el fin de analizar las propiedades holísticas y sistémicas a nivel del sistema. En este sentido, existen experiencias que utilizan la metodología ENA en agronomía (Rufino *et al.*, 2009a; Rufino *et al.*, 2009b).

### Breve reseña de la metodología ENA

La metodología ENA surgió a partir de la necesidad de los ecólogos de representar y analizar los procesos a nivel de ecosistema (Ulanowicz, 2004), a diferencia de enfoques más reduccionistas que se centraban en un elemento específico de las interacciones, sin tener en cuenta los efectos indirectos y complejos que ocurren a distintos niveles del ecosistema (Fath *et al.*, 2007). Se utilizan técnicas de álgebra lineal, lo que parece ser más relevante para analizar las propiedades estructurales y funcionales de los ecosistemas complejos, de una manera sistemática (Ulanowicz, 2004).

Dicha metodología es una adaptación del análisis *input/output* aplicado inicialmente en economía, el cual se basa en técnicas cuantitativas que permiten analizar las interdependencias entre diferentes sectores en una economía dada, como, por ejemplo, sistemas de bienes y servicios relacionados entre sí (Leontief, 1951). Los modelos de análisis *input/output* producen índices que permiten medir los efectos de los cambios que provoca un sector sobre otros, conectados indirectamente a la escala de todo el sistema. Hannon (1973) introdujo esta teoría en la ecología para estudiar las relaciones entre las especies en un ecosistema a través de los flujos de energía. Los modelos ENA permiten representar los compartimentos ecológicos y las interacciones

entre ellos, así como el análisis de redes, para determinar las relaciones globales y la importancia de cada uno de los componentes del sistema en particular (Fath *et al.*, 2007). Otras contribuciones provienen también de las teorías de la información, y se aplican al analizar la diversidad y la organización de la red de flujos dentro del sistema (Rutledge *et al.*, 1976; Ulanowicz, 1997; Latham, 2006).

Existe abundante literatura sobre estudios de ecosistemas, en la que se analiza el papel de los efectos indirectos en comparación con los efectos directos entre compartimentos (Szymer y Ulanowicz, 1987; Baird y Ulanowicz, 1989); así como consideraciones sobre el análisis de las relaciones a nivel trófico (Higashi y Burns, 1991), y la cuantificación del grado de reciclaje en una red determinada del ecosistema (Finn, 1980; Allesina y Ulanowicz, 2004). Sin embargo, la metodología ENA se ha utilizado más para el estudio de los sistemas urbanos (Liu *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012), y en el caso de los agroecosistemas, se ha empleado de manera marginal (Dalsgaard *et al.*, 1995; Rufino *et al.*, 2009a; Rufino *et al.*, 2009b; Álvarez *et al.*, 2014).

## Implicación de la metodología ENA en el estudio de los agroecosistemas

La aplicación de la metodología ENA para analizar agroecosistemas se puede sintetizar mediante la ejecución de tres pasos: 1) la conceptualización, 2) la modelización, y 3) la aplicación de los algoritmos para calcular los indicadores (fig. 4).

La conceptualización del sistema –de manera similar al ACV– consiste en identificar y definir sus elementos e interacciones, los cuales se deben representar en forma de diagrama de flujo (Fath *et al.*, 2007). En esta etapa es necesario delimitar las fronteras del sistema, a partir del conocimiento del entorno y los objetivos del trabajo. Sobre esta base, los diversos compartimentos que componen el sistema deben ser definidos, al igual que su nivel de agregación (Baird *et al.*, 2009). A continuación se identifican los flujos existentes entre los compartimentos, desde y hacia el entorno del sistema, en función de su origen, el destino y la naturaleza (por ejemplo: fertilización, alimentación, ventas, etc.). Estos elementos se utilizan para construir el diagrama de flujo.

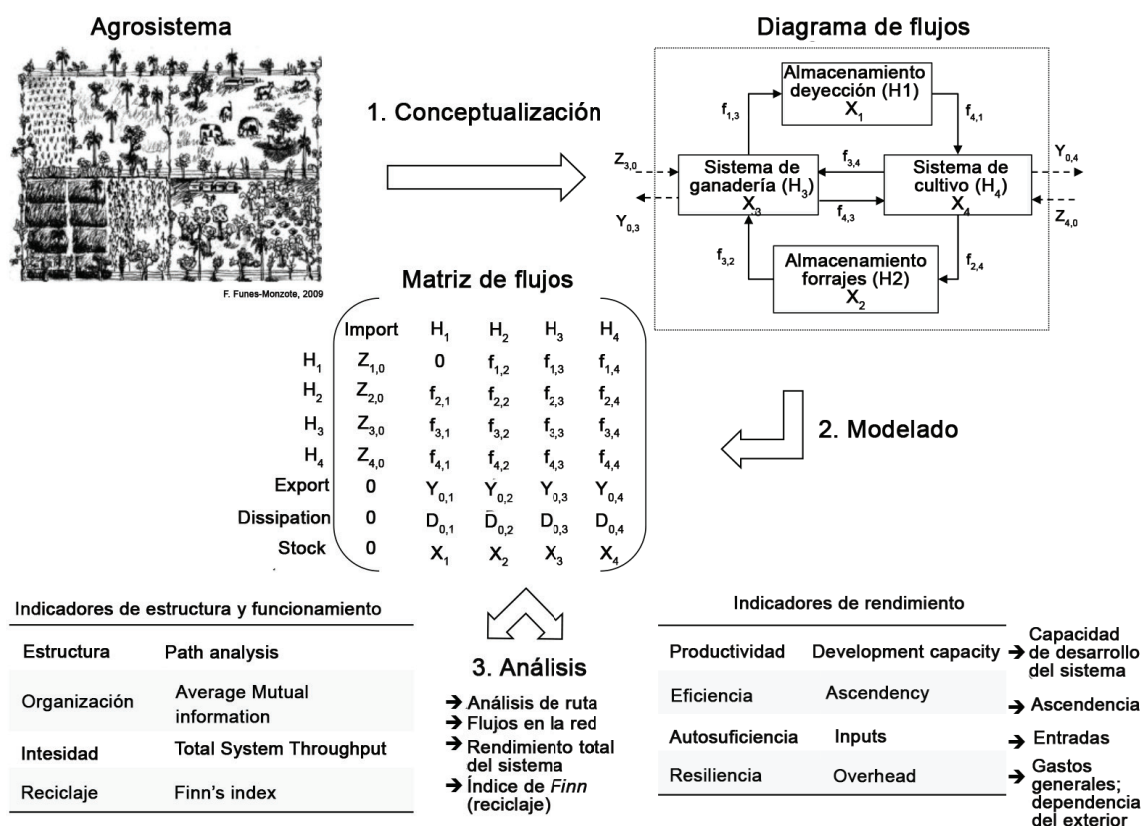


Figura 4. Representación esquemática de los pasos que implica un análisis de sistemas agropecuarios utilizando la metodología ENA.



Por otra parte, en la fase de modelización, que se basa en el diagrama, se miden los flujos identificados y se representan en forma de matriz (Fath *et al.*, 2007). Es importante seleccionar una unidad común (como la UF del ACV) para analizar de forma homogénea los flujos del sistema, en función de los objetivos del estudio (por ejemplo: nitrógeno, carbono, energía, biomasa, etc.). El siguiente paso consiste en cuantificar cada flujo, a partir de mediciones directas, encuestas y estimaciones, o sobre la base de la literatura existente. Por tanto, la cuantificación de cada flujo permite alimentar la matriz; en el eje de las abscisas se representan los compartimentos de origen, y en el de las ordenadas, los compartimentos de destino.

Finalmente, la aplicación de la metodología ENA consiste en calcular una serie de indicadores con algoritmos lineales, a partir de cálculos matriciales (Ulanowicz, 2004; Latham, 2006). En el caso de los agroecosistemas, la metodología ENA permite evaluar su estructura mediante un análisis «de ruta» (*Path Analysis*) o de indicadores de organización (AMI, Hr). AMI (*Average Mutual Information* o información mutua promedio) cuantifica la organización de los flujos en la red, mientras que Hr (*Uncertainty Statistical* o estadística de incertidumbre) corresponde a la frontera superior del AMI (Ulanowicz, 2004; Rufino *et al.*, 2009a). El funcionamiento de los agroecosistemas se puede analizar con el empleo de indicadores de intensidad de los flujos, como el *Total System Throughflow* (TST o rendimiento total del sistema), que calcula la cantidad total de flujo que se desplaza a través de la red de compartimentos; o de indicadores de reciclaje, como el *Finn's Cycling Index* (FCI; Índice de Finn o de reciclaje), que calcula el porcentaje de los flujos que son generados por ciclo (Finn, 1980).

Asimismo, esta metodología posibilita analizar el estado de desarrollo del sistema (*development capacity* o capacidad de desarrollo, *ascendency* o ascendencia y *overhead* o gastos generales o dependencia del exterior, Latham, 2006). La ascendencia (A) representa el grado de desarrollo real del sistema, y *Development Capacity* (D), su potencial máximo de desarrollo; mientras que *Overhead* se refiere a la diferencia entre A y D, lo que ofrece una idea de la capacidad de reserva de desarrollo del sistema o de las posibilidades de mejora, por ejemplo, en la optimización de los flujos. Además, con la matriz de flujo también se pueden calcular otros indicadores más tradicionales, como los de

productividad (*outputs*), autosuficiencia (*inputs*) y eficiencia (relación *inputs/outputs*).

Por tanto, la aplicación de la metodología ENA para el estudio de los agroecosistemas ofrece muchas oportunidades de análisis, desde las perspectivas de un posible espectro de modalidades de funcionamiento y de desarrollo. El paralelismo que se establece entre ecosistema y agroecosistema debe ser examinado con precaución, ya que el propósito de un agroecosistema es producir alimentos; mientras que el de un sistema ecológico es la conservación de los recursos y procesos, que mantienen su equilibrio. No obstante, en el contexto de la agroecología, dicho paralelismo se considera relevante en términos de funcionamiento; por lo que el uso de metodologías que provienen de la ecología parece ser una alternativa pertinente e interesante para analizarlos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allesina, S. & Ulanowicz, R. E. Cycling in ecological networks: Finn's index revisited. *Comput. Biol. Chem.* 28 (3):227-233, 2004.
- Altieri, M. A.; Funes-Monzote, F. R. & Petersen, P. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agron. Sustain. Dev.* 32 (1):1-13, 2012.
- Alvarez, S.; Rufino, M. C.; Vayssières, J.; Salgado, P.; Tittonell, P.; Tillard, E. *et al.* Whole-farm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems in the highlands of Madagascar: An application of network analysis. *Agr. Syst.* 126:25-37, 2014.
- Baird, D.; Fath, B. D.; Ulanowicz, R. E.; Asmus, H. & Asmus, R. On the consequences of aggregation and balancing of networks on system properties derived from ecological network analysis. *Ecol. Model.* 220 (23):3465-3471, 2009.
- Baird, D. & Ulanowicz, R. E. The seasonal dynamics of the Chesapeake Bay ecosystem. *Ecol. Monogr.* 59:329-364, 1989.
- Basset-Mens, Claudine & van der Werf, H. M. G. Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. *Agr. Ecosyst. Environ.* 105 (1-2):127-144, 2005.
- Beauchemin, K. A.; Janzen, H. H.; Little, S. M.; McAllister, T. A. & McGinn, S. M. Mitigation of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada. Evaluation using farm-based life cycle assessment. *Anim. Feed Sci. Tech.* 166-167:663-677, 2011.
- Bessou, Cecile; Basset-Mens, Claudine; Tran, T. & Benoist, A. LCA applied to perennial cropping

- systems: a review focused on the farm stage. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18 (2):340-361, 2013.
- Bockstaller, C.; Gaillard, G.; Baumgartner, D.; Freiermuth Knuchel, R.; Reinsch, M. & Brauner, R. *et al. Méthodes d'évaluation agri-environnementale des exploitations agricoles: Comparaison des méthodes INDIGO, KUL/USL, REPRO et SALCA. ITADA.* Colmar, France, 2006.
- Bockstaller, C.; Guichard, L.; Keichinger, O.; Girardin, P.; Galan, Marie B. & Gaillard, G. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29 (1):223-235, 2009.
- Bockstaller, C.; Guichard, L.; Makowski, D.; Aveline, Anne; Girardin, P. & Plantureux, S. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 28 (1):139-149, 2008.
- Brentrup, F.; Küsters, J.; Kuhlmann, J. H. & Lammel, J. Application of the life cycle assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilisers. *Eur. J. Agron.* 14 (3):221-233, 2001.
- Brentrup, F.; Küsters, J.; Kuhlmann, J. H. & Lammel, J. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. *Eur. J. Agron.* 20 (3):247-264, 2004.
- Cinelli, M.; Coles, S. R. & Kirwan, K. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecol. Indic.* 46:138-148, 2014.
- Dalsgaard, J. P. T.; Lightfoot, C. & Christensen, V. Towards quantification of ecological sustainability in farming systems analysis. *Ecol. Eng.* 4 (3):181-189, 1995.
- Darnhofer, I. S. Strategies of family farms to strengthen their resilience. *Environ. Policy Gov.* 20 (4):212-222, 2010.
- De Schutter, O. *Rapport du Rapporteur spécial sur le droit à l'alimentation.* ONU: Assemblée générale, Conseil des droits de l'homme, seizième session, 2011.
- Dick, Milene; Abreu da Silva, M. & Dewes, H. Mitigation of environmental impacts of beef cattle production in southern Brazil. Evaluation using farm-based life cycle assessment. *J. Cleaner Prod.* 87:58-67, 2015.
- Dumont, B.; Fortun-Lamothe, L.; Jouven, M.; Thomas, M. & Tichit, M. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal.* 7 (6):1028-1043, 2013.
- Environmental Protection Agency (EPA). *Life cycle assessment: principles and practice.* Cincinnati, USA: National Risk Management Research Laboratory, 2006.
- Fath, B. D.; Scharler, Ursula M.; Ulanowicz, R. E. & Hannon, B. Ecological network analysis: network construction. *Ecol. Model.* 208 (1):49-55, 2007.
- Figueira, J.; Greco, S. & Ehrgott, M. *Multicriteria decision analysis: State of the Art Surveys.* New York: Springer, 2005.
- Finn, J. T. Flow analysis of models of the Hubbard Brook ecosystem. *Ecology.* 61 (3):562-571, 1980.
- Gasparatos, A.; El-Haram, M. & Horner, M. A critical review of reductionist approaches for assessing the progress towards sustainability. *Environ. Impact Assess.* 28 (4-5):286-311, 2008.
- Gasparatos, A. & Scolobig, A. Choosing the most appropriate sustainability assessment tool. *Ecol. Econ.* 80:1-7, 2012.
- Hannon, B. The structure of ecosystems. *J. Theor. Biol.* 41 (3):535-546, 1973.
- Hellweg, Stefanie & Milà i Canals, L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. Special section: Rethinking the global supply chain. *Science.* 344 (6188):1109-1113, 2014.
- Herrero, M.; Thornton, P. K.; Notenbaert, A. M.; Wood, S.; Msangi, S.; Freeman, H. A. *et al.* Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. *Science.* 327 (5967):822-825, 2010.
- Higashi, M. & Burns, T. P. *Theoretical studies of ecosystems: the network perspective.* New York: Cambridge University Press, 1991.
- International Standard Organization. *Environmental management-life cycle assessment-goal and scope definition and inventory analysis.* ISO 14041. Geneva, Switzerland: ISO, 1998.
- International Standard Organization. *Environmental management-life cycle assessment-life cycle impact assessment.* ISO 14042. Geneva, Switzerland: ISO, 2000a.
- International Standard Organization. *Environmental management-life cycle assessment-life cycle interpretation.* ISO 14043. Geneva, Switzerland: ISO, 2000b.
- International Standard Organization. *Environmental management-life cycle assessment-principles and framework.* ISO 14040. Geneva, Switzerland: ISO, 1997.
- Latham, L. G. Network flow analysis algorithms. *Ecol. Model.* 192 (3-4):586-600, 2006.
- Leontief, W. W. *The structure of American economy, 1919-1939: an empirical application of equilibrium analysis.* New York: Oxford University Press, 1951.
- Little, S.; Linderman, J.; Maclean, K. & Janzen, H. *HOLOS: a tool to estimate and reduce green-*

- house gases from farms. *Methodology and algorithms for version 1.1*. Agriculture and Agri-Food Canada, 2008.
- Liu, G. Y.; Yang, Z. F.; Chen, B. & Zhang, Y. Ecological network determination of sectoral linkages, utility relations and structural characteristics on urban ecological economic system. *Ecol. Model.* 222 (15):2825-2834, 2011.
- Packham, R.; Petheram, J. & Murray-Prior, R. A framing systems research (FSR) as a platform for research, development and extension (RD&E) in agriculture and natural resources management (NRM). *APEN Forum'07*. Canberra, Australia: Australian Pacific Extension Network (APEN) Forum, 2007.
- Pennington, D. W.; Potting, J.; Finnveden, G.; Lindeijer, E.; Jolliet, O.; Rydberg, T. *et al.* Life cycle assessment. Part 2: Current impact assessment practice. *Environ. Int.* 30 (5):721-739, 2004.
- Rebitzer, G.; Ekvall, T.; Frischknecht, R.; Hunkeler, D.; Norris, G.; Rydberg, T. *et al.* Life cycle assessment. Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environ. Int.* 30 (5):701-720, 2004.
- Renouf, M. A.; Wegener, M. K. & Nielsen, L. K. An environmental life cycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation. *Biomass Bioenerg.* 32 (12):1144-1155, 2008.
- Rufino, M. C.; Hengsdijk, H. & Verhagen, A. Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 84 (3):229-247, 2009a.
- Rufino, M. C.; Tiftonell, P.; Reidsma, P.; Lopez-Ridaura, S.; Hengsdijk, H.; Giller, K. E. *et al.* Network analysis of N flows and food self-sufficiency-a comparative study of crop-livestock systems of the highlands of east and southern Africa. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 85 (2):169-186, 2009b.
- Rutledge, R. W.; Basore, B. L. & Mulholland, R. J. Ecological stability: an information theory viewpoint. *J. Theor. Biol.* 57 (2):355-371, 1976.
- Seré, C. & Steinfeld, H. *World livestock production systems. Current status, issues and trends*. Rome: FAO, 1996.
- Singh, R. K.; Murty, H. R.; Gupta, S. K. & Dikshit, A. K. An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecol. Indic.* 15 (1):281-299, 2012.
- Szyrmer, J. & Ulanowicz, R. E. Total flows in ecosystems. *Ecol. Model.* 35 (1-2):123-136, 1987.
- Ulanowicz, R. E. *Ecology, the ascendent perspective*. New York: Columbia University Press, 1997.
- Ulanowicz, R. E. Quantitative methods for ecological network analysis. *Comput. Biol. Chem.* 28 (5-6): 321-339, 2004.
- van der Werf, H. G. M. & Petit, J. Evaluation of environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agr. Ecosyst. Environ.* 93 (1-3):131-145, 2002.
- van Mil, H. G. J.; Foegeding, E. A.; Windhab, E. J.; Perrot, N. & van der Linden, E. A complex system approach to address world challenges in food and agriculture. *Trends Food Sci. Techn.* 40 (1):20-32, 2014.
- Verstegen, J. A. A. M.; Huirne, R. B. M.; Dijkhuizen, A. A. & Kleijnen, J. P. C. Economic value of management information systems in agriculture: a review of evaluation approaches. *Comput. Electron. Agr.* 13 (4):273-288, 1995.
- Zhang, Y.; Liu, H.; Li, Y.; Yang, Z.; Li, S. & Yang, N. Ecological network analysis of China's societal metabolism. *J. Environ. Manage.* 93 (1):254-263, 2012.

Recibido el 4 de agosto de 2015

Aceptado el 30 de noviembre de 2015