

Biologística: estrategias computacionales bioinspiradas para la gestión de las redes de suministro complejas

Nelson Alfonso Gómez-Cruz^{1, a}, John Leonardo Vargas Mesa^a

^aCentro de Innovación, Escuela de administración, Universidad del Rosario
Calle 200 con autopista norte, Bogotá, Colombia

Abstract

La gestión de las cadenas de suministro está basada en los supuestos del control, la optimización y la predicción. Sin embargo, para abordar retos como la personalización en masa, la limitación de los recursos, el crecimiento acelerado de la población mundial o la adaptabilidad en entornos cambiantes es necesario repensar la cadena como un sistema colectivo conformado por múltiples entidades que buscan su propio beneficio. La red de interacciones resultante puede dar lugar a patrones espontáneos de autoorganización que no comprendemos ni sabemos gestionar. Dentro de las posibilidades, un sistema colectivo puede llegar a exhibir características deseables como la flexibilidad, la robustez y la resiliencia. En este artículo esbozamos un modelo conceptual y tecnológico que, motivado por nociones y métodos bioinspirados, y bajo la lógica de los sistemas colectivos, permitirá una gestión más integral y orgánica de las redes (ya no de las cadenas) de suministro.

Keywords: sistemas colectivos; redes de suministro; complejidad; biologística; gestión; emergencia; autoorganización.

1. La naturaleza de las redes de suministro

La globalización, los mercados emergentes y las nuevas regulaciones han generado todo un abanico de retos para las redes de suministro, tales como la diferenciación, el empoderamiento del consumidor, la creación de capacidades a nivel local, el incremento de la transparencia y la adaptabilidad [1]. Comprender la producción de bienes o servicios en un contexto global, enmarcado dentro de las cadenas de valor, requiere de técnicas capaces de abordar la complejidad de las relaciones económicas y transaccionales que operan en el marco del suministro de las firmas.

Cuando se habla de cadena de suministro se hace referencia a un sistema integrado que sincroniza una serie de unidades de negocio interrelacionadas para la ejecución de las tareas de adquisición de materia y transformación de materia prima; distribución y promoción; agregación de valor y difusión de información [2,3]. Formalmente, las cadenas de suministro se pueden definir como sistemas de relaciones donde diferentes firmas interactúan para la ejecución de procesos que generan valor a un consumidor en forma de bienes o servicios [4].

El concepto de cadena de suministro, sin embargo, está ligado a una visión lineal del proceso de abastecimiento, en el que las interacciones entre las organizaciones siguen una jerarquía de eslabones. Pese a ello, una misma organización puede pertenecer a más de una cadena de suministro. Como resultado, las firmas y sus interacciones conforman no solo cadenas, sino *redes de suministro* [2]. En estas redes las dinámicas emergen a partir de las acciones e interacciones que ejecuta cada firma en el nivel local y, por tanto. El conjunto de decisiones e interacciones locales configura las características globales de la red. Porter y Kramer [5] hacen una aproximación temprana al tema, afirmando que algunas ventajas competitivas de la cadena de valor se generan por el manejo de las relaciones entre las organizaciones y no podrían ser alcanzadas de forma individual.

Disciplinas como la biología o las ciencias sociales han definido las dinámicas anteriormente mencionadas como fenómenos emergentes que resultan de la interacción entre individuos en sistemas colectivos. Un sistema colectivo es un conjunto de entidades que, con base en unas reglas de decisión e información parcial (local), generan dinámicas de grupo coherentes y coordinadas en ausencia de un controlador. Resulta entonces evidente que bajo este nuevo paradigma en el cual las cadenas -redes- de

¹ Autor de correspondencia: nelson.gomez@urosario.edu.co

suministro son sistemas colectivos, la forma de gestionarlas va a ser distinta de la clásica. Los sistemas vivos son un caso paradigmático de éxito en la resolución de problemas colectivos.

En la naturaleza es común encontrar sistemas colectivos como los insectos sociales, por ejemplo, las abejas, las hormigas o las termitas, las cuales enfrentan (y resuelven) problemas complejos. La ingeniería ha adaptado varias de las formas de solución que utilizan los sistemas colectivos naturales. Métodos como la optimización por colonia de hormigas (ACO) o la optimización por enjambres de partículas (PSO) se han utilizado ampliamente en el contexto de la logística para el diseño de rutas de transporte [6] o planeación de la producción [7].

Es posible, por tanto, analizar los sistemas vivos desde la perspectiva logística y proponer soluciones logísticas bioinspiradas. El punto consiste en hacer un símil entre estos dos tipos de sistemas (biológicos-logísticos) aceptando que es posible tener una representación común donde las comprensiones y las técnicas de un dominio son útiles en el otro [8]. La idea de unir la biología y las ciencias de la complejidad en el contexto de la logística se conoce como *biológica* [9]. La perspectiva de los sistemas colectivos, sin embargo, no ha permeado suficientemente la gestión de las redes de suministro. Tampoco el uso de métodos y técnicas bioinspiradas provenientes de la ingeniería. La tesis que proponemos en este artículo es que dicha perspectiva no solo es interesante sino necesaria en términos de gestionar la red de suministro como un sistema colectivo y no como una relación horizontal de eslabones. Esto implica un cambio de mentalidad en los tomadores de decisiones. El objetivo es entonces, esbozar un modelo bajo el cual se enmarque la lógica de las redes de suministro como sistemas colectivos y proponer el uso de herramientas bioinspiradas que contribuyan a la comprensión, resolución y gestión en los distintos niveles de emergencia de la red.

2. La comprensión y la ingeniería de los sistemas colectivos

El estudio de los sistemas colectivos consiste en comprender cómo las acciones e interacciones en el nivel individual de un sistema pueden generar patrones complejos y sofisticados en el nivel colectivo. El tipo de sistemas que nos interesan aquí, también llamados *sistemas colectivos adaptativos* (SCA)², se caracterizan, fundamentalmente, porque su dinámica es *autoorganizada*, es decir, no depende de la intervención de un controlador central o de un líder que comande las acciones de los individuos que componen el sistema. Por el contrario, es a partir del comportamiento local, el acceso a información limitada y el intercambio de información por parte de los individuos, que el sistema logra integrar la información parcial del entorno y convertirla en conocimiento colectivo [10]. Esto le permite al sistema tomar decisiones y resolver problemas que están más allá de las capacidades de los individuos considerados de manera independiente. A esta propiedad se le denomina *inteligencia de enjambre* o *inteligencia colectiva* [11].

Una comprensión de los sistemas colectivos implica considerar, por lo menos, dos escalas. Una local, en la que los componentes del sistema interactúan entre ellos y con su entorno, y otra global, en la que las propiedades de alto nivel pueden ser observadas. No obstante, hay sistemas que estructuran en múltiples niveles de la organización, cada uno de ellos exhibiendo propiedades autoorganizadas y emergentes con respecto al nivel inmediatamente anterior. Adicionalmente, los sistemas colectivos son descentralizados, distribuidos y tolerantes a fallos. Un sistema colectivo es, en síntesis, aquel cuyos patrones de organización espaciotemporal surgen de forma espontánea y coherente a partir de la interacción reiterada y distribuida entre sus componentes. Tales patrones de organización, denominados *emergentes*, pueden ser estructurales, comportamentales o funcionales.

Los patrones estructurales se refieren a la manera como los componentes se relacionan y forman estructuras de alto nivel. Los patrones comportamentales, por su lado, capturan la lógica del cambio en el sistema. Los patrones funcionales, por último, dan cuenta de lo que el sistema es capaz de hacer. Los copos de nieve (en física) [12], la reacción Belousov-Zhabotinsky (en química) [13] y la capacidad de las hormigas del género *Iridomyrmex* para determinar colectivamente la fuente de alimento más cercana entre dos o más opciones (en biología) [14] son ejemplos de patrones estructurales, comportamentales y funcionales, respectivamente. Cabe resaltar que los patrones funcionales operan únicamente en los sistemas biológicos (con el fin de mantener el estado vivo) y en algunos de nuestros sistemas sociotécnicos modernos (para realizar tareas de interés humano).

Durante las últimas dos décadas, el comportamiento de los SCA se ha comenzado a investigar de forma sistemática tanto en ciencia como en ingeniería. En biología, por ejemplo, la organización espontánea de las actividades colectivas se ha estudiado en redes neuronales, colonias de bacterias, insectos sociales, bancos de peces, bandadas de aves y grupos humanos, entre muchos otros [15, 16, 17, 10]. Diversos

² Esta noción aplica para los sistemas biológicos y para algunos sistemas sociotécnicos. En los sistemas físicos y químicos, por el contrario, la autoorganización está soportada en las interacciones físicas entre los componentes del sistema y no en los intercambios de información o en interacciones tróficas.

principios acerca del comportamiento colectivo se han logrado abstraer [18] y múltiples mecanismos por los cuales operan han sido investigados [19]. Como consecuencia, el comportamiento colectivo en animales y otras entidades biológicas se ha establecido como un dominio de investigación por derecho propio [20, 21].

En el marco de la ingeniería de los sistemas complejos y la computación no convencional, por su parte, nuevos dominios dedicados al diseño e implementación de sistemas colectivos artificiales han surgido. El software autoorganizado [22], la vida artificial [23] y la robótica colectiva [24] son ejemplos notables de esto. Adicionalmente, nuevas tecnologías para el modelamiento, la simulación y la gestión de sistemas colectivos han comenzado a emerger. Una de ellas, quizás la más relevante, es la simulación basada en agentes [25, 26]. Para lograr la implementación de sistemas colectivos, la ingeniería ha intentado traducir los mecanismos naturales de autoorganización en sistemas artificiales, con el fin de que sean capaces de modificar su estructura y su función ante cambios dinámicos en los requerimientos y el entorno sin una intervención humana directa.

Los sistemas colectivos son capaces de integrar la información local adquirida individualmente, la cual suele ser limitada y no confiable. Gracias a ello, logran recrear un conocimiento global del entorno, llevar a cabo tareas complejas de alto nivel y tomar decisiones que están más allá de las capacidades individuales de los componentes [10]. Algunos ejemplos son la clasificación de elementos, la optimización actividades y recursos o la toma decisiones colectivas (por ejemplo, mediante mecanismos de quórum). De esta manera, los sistemas colectivos logran dar respuesta a las demandas cambiantes del entorno de forma confiable, flexible, robusta y adaptable.

El proceso por el cual una entidad colectiva compuesta por agentes cognitivos y adaptables puede también exhibir capacidades cognitivas y adaptables se conoce como *adaptación sintética* [27]. Si la caracterización de las redes de suministro como sistemas colectivos tiene sentido, entonces es posible pensar que una red compuesta por múltiples agentes cognitivos y adaptativos sea capaz de exhibir comportamientos inteligentes, adaptativos y de procesamiento sofisticado de información, más allá de lo que podría lograr cada componente considerado de manera individual o de lo que se podría lograr mediante mecanismos de control centralizado.

3. Las redes de suministro como sistemas colectivos

Tradicionalmente, una organización considera “su” cadena de suministro como el conjunto de eslabones que se encuentran atrás suyo (proveedores de recursos y conocimiento) y adelante suyo (distribuidores y clientes). El objetivo de los administradores de la cadena es el de (tratar de) gestionar las relaciones con los actores que conforman tales eslabones. Cada organización, entonces, considera tantos eslabones adelante y tantos atrás como le resulte conveniente y posible, con el fin de garantizar su supervivencia en el mercado. Como resultado, la gestión de la cadena de suministro se ha orientado a la ejecución de tareas de control o monitoreo sobre una estructura horizontal, como se aprecia en la figura 1. Las organizaciones invierten cantidades importantes de dinero y tiempo en su intento de predecir, controlar y optimizar los procesos y

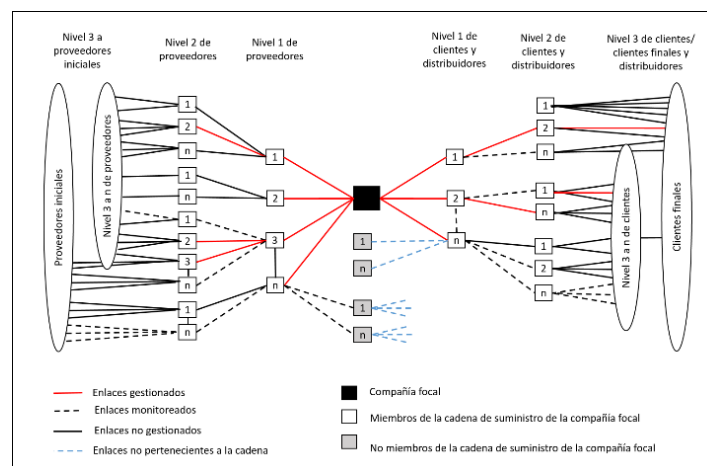


Figura 1 Estructura de la cadena de suministro

Fuente: adaptada de [2]

las relaciones dentro de su cadena de suministro [28]. Entre más eslabones sean considerados más fuentes de incertidumbre y más factores de riesgo deben ser considerados.

El tránsito conceptual de las cadenas de suministro a las redes de suministro permite la interpretación de estas últimas como *sistemas colectivos*. Una red de suministro se refiere, en consecuencia, a la interacción y, con frecuencia, a la superposición de múltiples cadenas de suministro que se influyen y se afectan mutuamente. De esta manera, el conjunto de organizaciones que se encuentran en la base de una economía conforman estructuras y dinámicas grupales que configuran diversas cadenas de suministro. Una red de suministro específica representa el entorno local para una organización. La superposición y la interacción entre los entornos locales de todas las organizaciones genera un nivel superior: una red de redes de suministro.

El modelo que proponemos asume que la interacción entre componentes “simples” puede formar entidades complejas que exhiban patrones emergentes. En los sistemas vivos, por ejemplo, es común encontrar múltiples niveles de emergencia [29]: las células conforman tejidos, los tejidos órganos, los órganos sistemas y los sistemas organismos. Estos últimos conforman grupos sociales y ecosistemas. Cada nivel supone la aparición de patrones estructurales, comportamentales y funcionales que no están presentes en el(los) nivel(es) inferior(es). Una lógica semejante depende del problema que se busque resolver y del

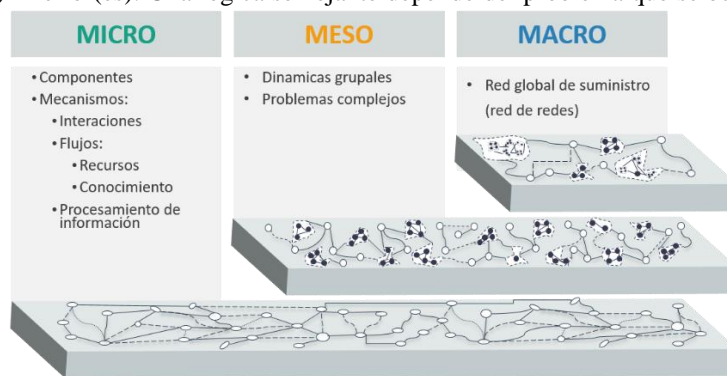


Figura 2 modelo conceptual de redes de suministro como sistemas complejos

Fuente: elaboración propia

nivel de observación elegido. Si el nivel más general estuviera constituido por la célula, los niveles anteriores serían redes de orgánulos, moléculas y átomos. Específicamente, el modelo que proponemos, y que describimos a continuación, está conformado por tres niveles: microscópico, mesoscópico y macroscópico (ver figura 2).

Una red de suministro también puede ser concebida, a la manera de un organismo, como el resultado emergente de niveles inferiores [28]. En el *nivel microscópico* se encuentran las organizaciones, cuyas relaciones intervienen en el flujo de recursos (materiales y económicos) y de conocimiento. La acción de las organizaciones en este nivel es estrictamente local. Es allí donde se crea y se recrea el día a día de las actividades logísticas. En el *nivel mesoscópico* se surgen dinámicas de grupo y se configuran entidades de orden superior como grupos empresariales, alianzas estratégicas, convenios interinstitucionales, agremiaciones y *clusters* logísticos. Es en este nivel en el que cobran vida las cadenas (en el lenguaje convencional) y las redes de suministro. Asimismo, en este nivel emergen nuevos problemas complejos de gestión que una organización difícilmente podrá enfrentar de forma individual: la sincronización, la autoregulación, la adaptabilidad, la flexibilidad, la robustez y la toma de decisiones colectiva son algunos de ellos.

Pues bien, la tesis que queremos proponer es que los patrones y los problemas que emergen en la escala mesoscópica pueden ser gestionados, dirigidos o guiados a partir del establecimiento de las condiciones por medio de las cuales el sistema opera en la escala microscópica. En el contexto de la ingeniería morfogénica, esta estrategia se denomina *metadiseño* [30]. La gestión de la generación de orden mesoscópico, por lo tanto, debe considerar las interacciones, los intercambios de información, los mecanismos de procesamiento de información y las respuestas comportamentales de las organizaciones en el nivel micro [31].

En el modelo propuesto, el *nivel macroscópico* es aquel donde se encuentra la red de suministro global. Es decir, la red de redes como sistema colectivo que, al igual que las entidades en nivel mesoscópico, exhibe patrones comportamentales, estructurales y funcionales emergentes. La dinámica, los ritmos de cambio y la complejidad (entendida como incertidumbre del entorno para una organización) de la red de suministro global revelan los límites irreducibles de los métodos control, predicción y optimización que han

caracterizado a las diferentes aproximaciones a la gestión de las cadenas (no redes) de suministro [28]. ¿Cómo comprender, gestionar y resolver los problemas que se presentan en esta visión multinivel de las redes de suministro? Diversas metáforas, modelos, mecanismos, metodologías y tecnologías bioinspiradas provenientes del estudio y la ingeniería de los sistemas colectivos nos proporcionan un conjunto –abierto aún– de posibilidades potenciales.

4. Metadiseño y bioinspiración: los ingredientes para una gestión eficiente de las redes de suministro

La aplicación de metodologías de gestión clásicas enmarcadas en una estructura de control horizontal no es aplicable en el caso de los sistemas colectivos. Es necesario redefinir el concepto de la gestión en función de la emergencia de patrones según las expectativas de los tomadores de decisiones. La gestión en sistemas colectivos consiste en el proceso en el que las entidades, en primer lugar, evalúan un espacio de posibilidades de sí mismas o de alguno de sus componentes con el fin de determinar cuál es más compatible dadas las características y situaciones problemáticas presentes en el entorno. En segundo lugar, con los resultados obtenidos de la evaluación de posibilidades se debe determinar las características fundamentales de diseño del sistema, es decir, la relación entre componentes y los mecanismos de interacción de nivel micro que generan los patrones emergentes deseados en niveles superiores. Para resolver los problemas que afronta la entidad en el nivel meso, estos se deben entender a través de la comprensión, la explicación y la predicción del nivel superior (macro) para que, con la gestión del nivel micro, sea posible generar dinámicas que den solución al problema.

El uso de herramientas bioinspiradas o que permitan utilizar mecanismos propios de la vida en contextos organizacionales, hace posible la gestión de los sistemas colectivos atendiendo las necesidades de cada nivel. Para el ejercicio de comprender es necesario hacer uso de técnicas de simulación capaces de captar cómo surge la emergencia. La simulación basada en agentes (SBA) permite establecer un vínculo entre las reglas que rigen el comportamiento en la escala local del sistema y los patrones que emergen en el nivel macroscópico, principalmente. El tránsito de lo local a lo global se logra mediante el uso de simulación computacional [26].

Aunque la SBA es formalmente especificada mediante un lenguaje computacional, esta no se reduce a los sistemas de ecuaciones resolubles de manera analítica [32]. La consecuencia que se desprende de este hecho es que la SBA permite (i) capturar fenómenos emergentes no algorítmicos y, por tanto, (ii) es más expresiva, desde el punto de vista computacional, que los modelos basados en ecuaciones de la investigación de operaciones clásica y de la dinámica de sistemas [31].

En el nivel mesoscópico, existe la necesidad de dar solución a problemas complejos que involucran varios de los niveles de emergencia, donde, como resultado de una situación problemática en un nivel particular, se presenta un comportamiento no deseado en alguno o algunos de los otros niveles. Los problemas que aquí se presentan como resultado de las dinámicas de grupo tienen cuatro características por las cuales el uso de los métodos clásicos se ve limitado: (1) los espacios de solución son extensos, lo que dificulta encontrar soluciones globales; las explosiones combinatorias son un claro ejemplo (supongamos el problema del agente viajero con 5 ciudades. En esta instancia existen 12 posibles combinaciones las cuales toman alrededor de $12 \mu s$ -suponiendo que cada combinación tarda $1 \mu s$ - en ser exploradas en su totalidad. Si el número de ciudades aumenta a 15, existen 43.000 millones de combinaciones y el tiempo esperado de exploración es de 12 horas. Para el caso de 20 ciudades, el tiempo estimado de exploración es de 1928 años [33]); (2) El entorno y la estructura del problema son dinámicos. Por tanto, es deseable tener soluciones robustas, adaptables y flexibles, más allá de la solución óptima para una configuración específica; (3) Lo usual es establecer supuestos fuertes sobre la situación real para abordar la con modelos clásicos, por ejemplo, asumir linealidad o relajaciones sobre la integralidad de las variables. Esto implica una sobresimplificación del problema a través de la omisión de restricciones. En el mundo real, sin embargo, los problemas son mucho más restringidos, dificultando la búsqueda de soluciones factibles; (4) Los problemas reales suelen responder a múltiples objetivos, los cuales, en muchos casos, son opuestos y entran en conflicto [34]. Un ejemplo de ello es minimizar el costo en un sistema de producción a la vez que se intenta maximizar la calidad de los productos resultantes. Los métodos aplicables en este tipo de problemas son procedimientos heurísticos capaces de generar soluciones de calidad en un tiempo razonable. Pese a ello, estos métodos no garantizan la resolución óptima del problema.

Según la clasificación presentada por Talbi [35], dentro de los algoritmos heurísticos se encuentran los métodos metaheurísticos, particularmente aquellos bioinspirados, con los cuales es posible atacar problemas complejos de gran tamaño en tiempos razonables. Una metaheurística es una estrategia de alto nivel que guía un procedimiento heurístico subyacente para que resuelva un problema determinado [36].

Dentro del amplio rango de metaheurísticas bioinspiradas se encuentran aquellas de la computación evolutiva, la inteligencia de enjambres, la computación neuronal y la computación inmune [37]. Estos métodos permiten resolver muchos de los problemas que se presentan en la escala mesoscópica relacionados con búsqueda, optimización, identificación de patrones, clasificación, aprendizaje, entre otras propiedades.

Una tercera vía, que opera en el nivel microscópico, permite intervenir, mediante autoorganización guiada [38], la estructura, el comportamiento y la funcionalidad del nivel mesoscópico. De esta manera, es posible lograr que las redes de suministro y sus subsistemas exhiban propiedades colectivas deseables como la sincronización, la flexibilidad, la robustez o la adaptabilidad. Todas estas propiedades son imposibles de diseñar de forma directa en la escala meso. Empleando mecanismos de autoorganización extraídos de los sistemas naturales es posible configurar los componentes y las interacciones en el nivel micro para que, mediante un proceso autoorganizado, generen de forma espontánea las propiedades mencionadas. Nótese que, en este caso, el proceso ingenieril no corresponde a un proceso de diseño convencional, sino que se trata de un proceso de *diseño indirecto*. A este proceso se le denomina metadiseño [30].

Dos vías de trabajo se vienen desarrollando desde la perspectiva de la autoorganización guiada. Por un lado, se han extraído distintos patrones de diseño que consisten en mecanismos de autoorganización encontrados en los sistemas vivos [39]. Mecanismos de vuelo en bandada, forrageo, *quorum sensing*, quimiotaxis, morfogénesis, evaporación, difusión, entre otros tantos, han sido considerados. La otra vía consiste no en emplear mecanismos que han resultado de la evolución biológica, sino en crear mecanismos por medio de procesos artificiales análogos a la selección natural. Es la selección natural la que establece, en este caso, el (meta)mecanismo por medio del cual son favorecidos los mecanismos de procesamiento de información que han hecho viable y posible el fenómeno de la vida. Por lo tanto, variantes de la computación evolutiva destinadas a extraer los mecanismos por medio de los cuales es posible generar patrones colectivos específicos es la frontera última de la gestión de la complejidad.

5. Consideraciones finales

La gestión exitosa de las redes de suministros requiere un cambio en los modelos mentales usados por los tomadores de decisiones. El acercamiento clásico a este problema se centra en el uso de métodos que abordan aspectos como el control, la optimización y la predicción. Aunque estas herramientas pueden proveer información valiosa sobre el fenómeno de interés, las soluciones proporcionadas no son enteramente plausibles, pues parten de una sobresimplificación de las características colectivas de las redes de suministro. La necesidad, entonces, es hacer una transición metodológica hacia el uso de técnicas que se centren en aspectos como la robustez, la flexibilidad, sincronización y la adaptación. Es decir, el énfasis metodológico tiene que desplazarse de las acciones locales en la microescala hacia la gestión de las autopropiedades en la mesoescala. Para ello, es necesaria una comprensión cada vez más realista de la macroescala.

Como se mencionó anteriormente, diferentes métodos pueden dar cuenta de las posibilidades de aproximación, dependiendo del nivel: la simulación basada en agentes es ideal para el estudio de las redes de suministro a nivel macroscópico. De la misma forma, herramientas como las metaheurísticas o, en general, la computación bioinspirada pueden aportar a la resolución de los problemas que emergen en el nivel mesoscópico. Finalmente, la intervención desde el nivel microscópico se puede lograr por medio de técnicas de autoorganización guiada.

Una forma de cambiar los modelos mentales de los tomadores de decisiones es pensar en términos de bioinspiración. El uso de nuevas técnicas para la comprensión de los tres niveles de la red de suministro puede hacerse más frecuente o generalizarse si se reconoce que, implícita o explícitamente, podemos abordar los problemas en la red de suministro de la misma manera en que los sistemas vivos abordan los problemas que les imponen sus entornos cambiantes (constructivamente, desde el nivel molecular, hasta el de ecosistema). Bajo el uso de colonias de hormigas para resolver problemas de ruteo o la comprensión de la red en términos de ecosistema subyace un mismo supuesto: que la vida es, quizá, el más paradigmático caso de éxito de solución de problemas colectivos.

Lo interesante en este caso es que el estudio y la intervención de la red de suministro bajo el paradigma de la bioinspiración pueden estar mediados por desarrollos previos en el área de ingeniería de sistemas complejos [40]. Subdisciplinas de las ciencias artificiales, como la ingeniería morfogénica, la computación bioinspirada, la inteligencia computacional y la vida artificial, han ayudado a materializar durante las últimas décadas las estrategias y mecanismos empleados por la vida para resolver problemas en diferentes niveles de comportamiento colectivo. Nuestra apuesta es clara: las técnicas de autoorganización

guiada y otras tecnologías computacionales bioinspiradas que se vienen desarrollando de forma acelerada, pueden adaptarse fácilmente para la intervención de la red de redes desde el micronivel.

6. Referencias

- [1] DHL Trend Research Team. *Key Logistics Trends in Life Sciences 2020+: A DHL perspective on how to prepare for future growth*. White paper. DHL; 2013. Retrieved December 9, 2017, from: http://www.dhl.com/content/dam/downloads/g0/about_us/innovation/lsh_whitepaper.pdf.
- [2] Min H, Zhou G. Supply chain modeling: past, present and future. *Comput Ind Eng* 2002;**43**:231–49.
- [3] Kaplinsky R, Morris M, A handbook for value chain research, vol. 113. IDRC Ottawa, 2001.
- [4] Christopher M. *Logistics and Supply Chain Management*. New York: FT Press; 2016.
- [5] Porter M, Kramer M. Creating shared value. In: Lenssen G, Smith C, editors. *Managing Sustainable Business: An Executive Education Case and Textbook*. Dordrecht: Springer; 2019, p. 327–350.
- [6] Bell J, McMullen R. Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem. *Adv Eng Inform* 2004;**18**: 41–8.
- [7] Pan Q, Tasgetiren F, Liang C. A discrete particle swarm optimization algorithm for the no-wait flowshop scheduling problem. *Comput Oper Res* 2008;**35**:2807–39.
- [8] Alon U. Biological networks: the tinkerer as an engineer. *Science* 2003;**301**:1866–7.
- [9] Helbing D. Biologistics and the struggle for efficiency: Concepts and perspectives. *Adv Complex Syst* 2009;**12**:533–548.
- [10] Moussaid M, Garnier S, Theraulaz G, Helbing D. Collective information processing and pattern formation in swarms, flocks and crowds. *Top Cogn Sci* 2009;**1**:469–97.
- [11] Reid C, Latty T. Collective behaviour and swarm intelligence in slime moulds. *FEMS Microbiol Rev* 2016;**40**:798–806.
- [12] Ben-Jacob E. From snowflake formation to growth of bacterial colonies: Part I. Diffusive patterning in azoic systems. *Contemp Phys* 1993;**34**:247-73.
- [13] Madore B, Freedman W. Computer simulations of the Belousov-Zhabotinsky reaction. *Science* 1983;**222**:615–6.
- [14] Dorigo M, Stützle T. *Ant Colony Optimization*. Cambridge, MA: MIT Press; 2004.
- [15] Hopfield J J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1982;**79**:2554–8.
- [16] Ben-Jacob E. Social behavior of bacteria: from physics to complex organization. *EPJ B* 2008;**65**:315–22.
- [17] Gordon D. (2016). Collective wisdom of ants. *Sci Am* 2016;314:44–7.
- [18] Sumpter D. The principles of collective animal behaviour. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 2006;**361**:5–22.
- [19] Namatame A. *Adaptation and Evolution in Collective Systems*. Singapore: World Scientific; 2006.
- [20] Camazine S, Deneubourg J, Franks N, Sneyd J, Theraulaz G, Bonabeau E. *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton: Princeton University Press; 2001.
- [21] Sumpter D. *Collective Animal Behavior*. Princeton: Princeton University Press; 2010.
- [22] Serugendo G, Gleizes M, Karageorgos A. *Self-organising Software: From Natural to Artificial Adaptation*. Berlin: Springer; 2011.
- [23] Gómez-Cruz N A. *Vida Artificial: Ciencia e Ingeniería de Sistemas Complejos*. Bogotá: Universidad del Rosario; 2013.
- [24] Kernbach S, editor. *Handbook of Collective Robotics: Fundamentals and Challenges*. Boca Raton: CRC Press; 2013.
- [25] Wilensky U, Rand W. *An Introduction to Agent-based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo*. Cambridge, MA: MIT Press; 2015.
- [26] Gómez-Cruz N A. Simulación basada en agentes: Una metodología para el estudio de sistemas complejos. In: Eschenhagen M, Vélez G, Maldonado C, Guerrero G, editors. *Construcción de Problemas de Investigación: Diálogos entre el Interior y el Exterior*. Medellín: Universidad de Antioquía; 2018, p. 230–66.
- [27] Carley K. Computational organization science: A new frontier. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2002;**99**:7257–62.
- [28] Choi T, Dooley K, Rungtusanatham M. Supply networks and complex adaptive systems: control versus emergence. *J Oper Manag* 2001;**19**:351–66.
- [29] Noble D. *The music of life: Biology beyond genes*. Oxford: Oxford University Press; 2006.
- [30] Doursat R. Organically grown architectures: creating decentralized, autonomous systems by embryomorphic engineering. In: Würtz R, editor. *Organic Computing*. Berlin: Springer; 2008, p. 167–99.
- [31] Bouffanais R. *Design and Control of Swarm Dynamics*. Berlin: Springer; 2015.
- [32] Größler A, Schieritz N. Of stocks, flows, agents and rules — “strategic” simulations in supply chain research. In: Kotzab H, Seuring S, Müller M, Reiner G, editors. *Research Methodologies in Supply Chain Management*, Berlin: Springer; 2005, p. 445–60.
- [33] Abdoun O, Abouchabaka J, Tajani C, “Analyzing the performance of mutation operators to solve the travelling salesman problem. *International Journal of Emerging Sciences* 2012;**2**:61–77.
- [34] Michalewicz Z, Schmidt M, Michalewicz M, Chiriach C. *Adaptive business Intelligence*. Berlin: Springer; 2007.
- [35] Talbi E. *Metaheuristics: From Design to Implementation*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2009.
- [36] Voss S. Metaheuristics. In: Floudas C, Pardalos P, editors. *Encyclopedia of optimization*. 2nd ed, New York: Springer; 2008, p. 2061–75.
- [37] Floreano D, Mattiussi, C. *Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, and Technologies*. Cambridge, MA: MIT Press; 2008.
- [38] Prokopenko M, editor. *Guided Self-Organization: Inception*. Berlin: Springer; 2014.
- [39] Fernandez-Marquez J, Di Marzo G, Montagna S, Viroli M, Arcos J. Description and composition of bio-inspired design patterns: a complete overview. *Nat Comp* 2013;**12**:43–67.
- [40] Braha D, Minai A A, Bar-Yam, Y. *Complex Engineered Systems: Science Meets Technology*. Berlin: Springer; 2006.