

Gramática y teoría de lenguajes formales: presente, pasado y futuro

M. Dolores Jiménez López

Universitat Rovira i Virgili
mariadolores.jimenez@urv.cat

Resumen

Presentamos una revisión de la relación entre gramática y teoría de lenguajes formales. El objetivo de este trabajo es servir de guía a lingüistas y personas que se dediquen a la teoría de lenguajes formales. Los lingüistas encontrarán nuevos desarrollos en el área de los lenguajes formales que pueden ayudar en la tarea de describir y explicar la gramática de las lenguas naturales. Los investigadores en teoría de lenguajes formales encontrarán retos en el análisis del lenguaje natural que pueden motivar o inspirar nuevos modelos. Defendemos la interdisciplinariedad en el estudio del lenguaje como la única forma de avanzar en su descripción teórica y en su procesamiento computacional.

Palabras clave

Lingüística; teoría de lenguajes formales; gramática; interdisciplinariedad.

GRAMMAR AND FORMAL LANGUAGE THEORY: PRESENT, PAST, AND FUTURE

Abstract

We present a review of the relationship between grammar and formal language theory intended to serve as a guide for linguists and other scholars engaged in formal language theory. Linguists will find new developments in the area of formal languages that can help in the task of describing and explaining the grammar of natural languages. Researchers in the field of formal language theory will find challenges in natural language analysis that may motivate or inspire new models. The paper advocates interdisciplinarity in the study of language as the only way to advance in its theoretical understanding and its computational processing.

Keywords

Linguistics; formal language theory; grammar, interdisciplinarity.

1. Introducción

En este trabajo, nos centramos en el lenguaje. Los lenguajes pueden ser naturales (español, inglés, húngaro...) o artificiales (lenguajes de programación...). En ambos casos, un lenguaje puede definirse como un sistema de símbolos combinados por un conjunto de reglas. Aquí nos ocupamos tanto de los lenguajes naturales como de los formales. Nos centramos en la lingüística como área que investiga el lenguaje natural y en la teoría de lenguajes formales como campo donde se definen y estudian un tipo de lenguajes artificiales.

Este artículo presenta una breve revisión del papel que la teoría de lenguajes formales ha desempeñado en el área de la lingüística en general y de la gramática en particular. Nuestro objetivo es doble: por un lado, queremos que los lingüistas reflexionen sobre la importancia de utilizar los lenguajes formales para comprender, describir y explicar las lenguas naturales y su funcionamiento; por otro, queremos que los teóricos de los lenguajes formales vuelvan a considerar el lenguaje natural como una de sus motivaciones para desarrollar nuevos modelos.

El artículo se divide en tres partes. En primer lugar, se repasan los orígenes de la relación entre la teoría de lenguajes formales y la gramática y se destaca la importancia de los métodos formales del lenguaje en la lingüística durante más de tres décadas. En segundo lugar, se muestra la situación actual de la teoría de lenguajes formales en la descripción y el análisis de las lenguas naturales. En tercer lugar, se destaca el potencial de los llamados *modelos no estándar* de la teoría de lenguajes formales para la descripción y análisis de la gramática de las lenguas naturales.

2. Lenguajes formales y gramática: el pasado

Para comprender el papel de la teoría de lenguajes formales en el estudio de las lenguas naturales, tenemos que remontarnos a los orígenes de este campo. El área de los lenguajes formales nació a mediados del siglo xx. El campo surgió como un área interdisciplinar, relacionando dos disciplinas que normalmente se ven como totalmente opuestas: *matemáticas* y *lingüística*. En el área de las matemáticas, los nombres clave son Thue, Post y Turing. Thue (1906, 1912) y Post (1936) introdujeron la noción formal de sistema de reescritura, mientras que Turing (1936) introdujo la idea general de encontrar modelos de computación en los que la potencia de un modelo pudiera describirse por la complejidad del lenguaje que genera/acepta. En lingüística, el nombre es Chomsky (1956); basándose en los trabajos de Thue, Turing y Post, Chomsky inició en los años cincuenta el estudio de las gramáticas con el objetivo de ofrecer una caracterización de la estructura de las lenguas naturales. Quería definir la sintaxis de las lenguas mediante reglas matemáticas sencillas y precisas. Para alcanzar este objetivo, introdujo su jerar-

quía de gramáticas como herramienta para modelar las lenguas naturales. La teoría de lenguajes formales puede considerarse uno de los mejores ejemplos de un área activa de investigación matemática cuyos orígenes se encuentran en la lingüística.

La visión de las lenguas naturales como lenguajes formales desempeñó un papel importante en el desarrollo de la lingüística en la segunda mitad del siglo xx. De hecho, la descripción de las lenguas como conjuntos de cadenas está en la base del desarrollo temprano de la gramática generativa. Fue un periodo dominado por el interés por la sintaxis, y el formalismo introducido por Chomsky se consideró un buen enfoque matemático para resolver el problema de abordar el lenguaje natural desde un punto de vista formal.

Desde el principio, una cuestión crucial en lingüística formal fue la caracterización del nivel adecuado de potencia gramatical para dar cuenta del lenguaje natural. Un formalismo gramatical que intentara modelar la sintaxis de una lengua debía tener la misma potencia expresiva que las lenguas naturales. Pero, ¿cuánta potencia era necesaria para describir las lenguas naturales? Esta cuestión fue objeto de debate desde que la planteó Chomsky en 1957. Parecía haber poco acuerdo entre los lingüistas sobre la posición de las lenguas en la jerarquía chomskiana. Este debate —que se centró primero en si las lenguas naturales eran libres de contexto o no— dio lugar, en el campo de la lingüística formal, a una línea de investigación en la que la idea de mantener bajo control el poder generativo de las gramáticas, al tiempo que se generaban construcciones libres y no libres de contexto, condujo a la introducción en los años ochenta de las llamadas *mildly context-sensitive grammars* (Joshi 1985). Teorías como las *head grammars* (Pollard y Sag 1994), las *indexed grammars* (Aho 1968), las *generalized phrase structure grammars* (Gazdar et al. 1985) o las *categorial grammars* (Buszkowski, Marciszewski y Bentzen 1988), etc. son mecanismos formales que se introdujeron para generar lenguajes ligeramente sensibles al contexto y que pueden considerarse generalizaciones o extensiones de las gramáticas libres de contexto. Otro gran desarrollo de la lingüística formal en ese periodo fue la lexicalización de las gramáticas, que encontró su solución en la *gramática léxico funcional* propuesta por Kaplan y Bresnan en 1982. En la misma época, se hicieron varios intentos de diseñar formalismos gramaticales más adecuados que las gramáticas de reescritura de Chomsky para dar cuenta de las lenguas naturales. El mejor ejemplo en esta línea fueron las *tree adjoining grammars* (Joshi, Levy y Takahashi 1975).

Todos los modelos revisados en esta sección se desarrollaron entre los años sesenta y finales de los ochenta del siglo xx y constituyen lo que puede considerarse la primera generación de lenguajes formales. Esos modelos encajaban en la jerarquía chomskiana, se basaban principalmente en la reescritura y provocaron la generalización de los modelos de árbol para describir y explicar la gramática de las lenguas natu-

rales. Podemos decir que fue la *época dorada* de la relación entre la lingüística y la teoría de lenguajes formales. En esa época, hubo una gran actividad en la aplicación de modelos de lenguaje formal a cuestiones de lenguaje natural. El debate sobre la libertad de contexto del lenguaje natural y la propuesta de nuevos modelos formales para describir el lenguaje natural fueron el núcleo central de la lingüística en esas décadas del siglo xx. En ese periodo, los libros de lingüística matemática y formal siempre informaban de los avances en este campo incluyendo capítulos dedicados a la jerarquía chomskiana de lenguajes y gramáticas y presentando los nuevos modelos. Un ejemplo de ello puede ser la obra clásica de lingüística matemática de Partee, ter Meulen y Wall (1993).

3. Gramática y lenguajes formales: el presente

Como hemos visto, de los años sesenta a los ochenta, la lingüística fue la aplicación central de la teoría de lenguajes formales y los lingüistas estaban muy interesados en aplicar los modelos formales del lenguaje a la formalización del lenguaje natural. Por el contrario, a partir de los años noventa, el interés de la lingüística por los lenguajes formales parece haber desaparecido y los teóricos del lenguaje formal han encontrado innumerables aplicaciones de su teoría distintas de la lingüística. La siguiente cita de Levelt (2008) resume bien la situación actual:

Almost four decades have passed since I first conceived of writing Formal Grammars. At that time it was still possible to rather comprehensively review for linguists and psycholinguists the relevant literature on the theory of formal languages and automata, on their applications in linguistic theory and in the psychology of language. Nowadays, an interested linguist or psycholinguist opening any text or handbook on formal language can no longer see the wood for the trees. Not only are linguistic applications in the small minority, but it also by no means evident which formal, mathematical tools are really required for natural language applications (Levelt 2008: vii).

Las razones que explican esta separación entre la lingüística y la teoría de lenguajes formales pueden ser muy diversas. Entre ellas destacamos las siguientes:

- ♦ Los problemas que encontraron los lingüistas al intentar describir las lenguas naturales mediante la teoría clásica de los lenguajes formales: por ejemplo, la dificultad de situar el lenguaje natural en la jerarquía de Chomsky y, por tanto, la necesidad de definir formalismos diferentes.
- ♦ El creciente interés por nuevas áreas de la lingüística —como la lingüística cognitiva— y, por tanto, la necesidad de buscar sistemas formales más naturales para dar cuenta del procesamiento del lenguaje natural. Los mé-

todos de reescritura parecían poco adecuados, desde una perspectiva cognitiva, para este propósito.

- La importancia adquirida en lingüística de ámbitos como la semántica, la pragmática o la sociolingüística. La teoría de lenguajes formales fue muy útil en lingüística cuando su principal interés era describir la sintaxis. Cuando los lingüistas intentaron abordar las partes dinámicas del lenguaje que dependen del contexto de uso, los modelos clásicos de los lenguajes formales se volvieron demasiado rígidos.

Los problemas enumerados estaban relacionados con la primera generación de lenguajes formales basados en sistemas de reescritura. Los modelos propuestos a partir de los años noventa en la teoría de los lenguajes formales pueden resolver esos problemas clásicos. Sin embargo, el divorcio entre la teoría de los lenguajes formales y la lingüística, debido a las dificultades iniciales, ha llevado a una falta de comunicación entre los investigadores de ambas disciplinas que ha impedido a los lingüistas tener acceso a los nuevos modelos propuestos en lenguajes formales. De hecho, si echamos un vistazo a libros recientes de lingüística matemática —como el publicado por Kornai (2008)— veremos que no informan sobre los modelos definidos en el campo de la teoría de los lenguajes formales a partir de los años noventa. Esos nuevos modelos, que constituyen lo que denominamos *modelos no estándar* en lenguajes formales, pueden agruparse en dos grandes bloques:

1. Modelos basados en sistemas multiagente.
2. Modelos de inspiración biológica.

Si consideramos la jerarquía de lenguajes de Chomsky como la primera generación de lenguajes formales, podemos decir que un desarrollo posterior de los lenguajes formales fue la idea de varios dispositivos colaborando para lograr un objetivo común, es decir, la teoría de los *sistemas multiagente*. En general, los sistemas multiagente ofrecen modelos sólidos para representar entornos complejos y dinámicos. Mientras que, en la teoría clásica de lenguajes formales, las gramáticas y los autómatas modelaban dispositivos clásicos en los que la computación dependía de un agente central, los nuevos formalismos se basan en la computación distribuida. La idea de varios dispositivos que colaboran para lograr un objetivo común se formalizó en los siguientes modelos:

- **Colonias.** Introducidas en Kelemen y Kelemenová (1992), se definen como modelos gramaticales de sistemas multiagente. Describen clases de lenguaje en términos de comportamiento de conjuntos de agentes muy simples, puramente reactivos y con comportamiento emergente.
- **Sistemas de gramáticas.** Proporcionan modelos sintácticos para describir sistemas multiagente a nivel simbólico (Csuha-Varjú *et al.* 1994). Son es-

estructuras compuestas por diversas gramáticas que funcionan coordinadas, conforme a un protocolo especificado, para producir un lenguaje.

- **Eco-sistemas de gramáticas.** Introducidos en Csuha-Varjú *et al.* (1996), se definen como sistemas multiagente en que los distintos componentes, además de interactuar entre sí, interactúan con un componente especial denominado *entorno*.

Otra gran fuente de inspiración de los recientes modelos de lenguajes formales ha sido la *biología*. La computación natural ha dado lugar al desarrollo de nuevos modelos de lenguajes formales entre los que destacamos los siguientes:

- **Splicing systems.** Introducidos por Tom Head (1987), pueden considerarse como un desarrollo de la teoría de lenguajes formales que proporciona nuevos dispositivos que permiten simular los procesos de recombinación molecular mediante los procesos generativos que actúan sobre cadenas.
- **Sistemas de membranas.** Introducidos por Păun (2000), son un modelo de computación inspirado en las características de las membranas biológicas. Consisten en conjuntos de objetos que se colocan en los compartimentos definidos por la estructura de la membrana.
- **Redes de procesadores evolutivos (NEP).** Son un mecanismo inspirado en el comportamiento de las poblaciones celulares. Introducidas en Castellanos *et al.* (2003), son sistemas formados por varios dispositivos cuya comunicación está regulada por un grafo. Se describen mediante un conjunto de palabras que evolucionan por mutaciones.

Otros dos modelos en lenguajes formales no estándar que se introdujeron en los años sesenta y que no se han tenido en cuenta en lingüística son:

- **Gramáticas contextuales.** Introducidas por Marcus (1969), son un mecanismo que produce un lenguaje partiendo de un conjunto finito de palabras y añadiendo iterativamente contextos a las palabras generadas.
- **Sistemas de Lindenmayer.** Fueron introducidos en 1968 por Lindenmayer con el objetivo de definir un marco teórico para modelar el desarrollo de organismos filamentosos compuestos por células. Mientras que en las gramáticas chomskyanas las reglas se aplican secuencialmente, en los sistemas de Lindenmayer se aplican en paralelo.

Resumiendo, la situación actual de la relación entre la lingüística y la teoría de lenguajes formales es que no existe relación alguna. La lingüística trabaja en teorías no formales del lenguaje natural. El procesamiento del lenguaje natural prefiere los métodos estadísticos a los modelos formales. Finalmente, la teoría de lenguajes formales tiene un amplio abanico de aplicaciones, y la lingüística queda fuera de sus intereses.

4. Futuro de los lenguajes formales en lingüística

La lingüística sigue teniendo el reto de comprender, explicar y describir las lenguas naturales. La formalización es clave en este reto. Sin embargo, encontrar el modelo formal adecuado suele ser muy difícil (Kornai 2008). Teniendo en cuenta los logros de la teoría de lenguajes formales, su motivación lingüística inicial y su importante papel en la computación, consideramos que no es adecuado prescindir de esta área de investigación en el estudio de las lenguas naturales. Las capacidades multiagente de algunos modelos los convierten en una herramienta adecuada para simular los procesos de generación y reconocimiento del lenguaje natural. La inspiración biológica de estos dispositivos puede ser muy útil en el campo del lenguaje natural, ya que proporcionan herramientas sencillas, flexibles e intuitivas para describir las lenguas, facilitando su implementación en sistemas de procesamiento del lenguaje natural.

Al observar los lenguajes formales no estándar descritos en la sección anterior, vemos que estos modelos pueden aplicarse a problemas distintos de la sintaxis, que es el ámbito clásico en el que se han utilizado los modelos formales. Los modelos no estándar en lenguajes formales pueden abarcar desde la fonología hasta la pragmática. He aquí algunos ejemplos de esas posibles aplicaciones:

- ♦ **Arquitectura de la gramática.** Los *sistemas de gramáticas* pueden ofrecer herramientas útiles para dar cuenta de la disposición y la interacción de las diversas dimensiones de la gramática de las lenguas naturales (Jiménez López 2006).
- ♦ **Fonología y morfología.** Las *gramáticas contextuales* pueden formalizar procesos fonológicos y morfológicos. El proceso generativo en una gramática contextual se basa en dos operaciones lingüísticas: la inserción de una cadena en un contexto dado y la adición de un contexto a una cadena dada. Teniendo en cuenta estas dos operaciones lingüísticas, la fonología y la morfología podrían ser buenas candidatas para ser formalizadas mediante gramáticas contextuales, ya que ambas seleccionan unidades lingüísticas (fonemas o morfemas) en función del contexto.
- ♦ **Sintaxis.** Los *splicing systems* y las NEP pueden ser buenas soluciones para la sintaxis. La aplicación de métodos de computación molecular a la sintaxis del lenguaje natural da lugar a la *sintaxis molecular* (Bel Enguix y Jiménez López 2005a). Por su parte, las NEP ofrecen sistemas especializados, modulares, que funcionan en paralelo y que pueden dar cuenta de la sintaxis del lenguaje natural (Bel Enguix *et al.* 2009).
- ♦ **Semántica y pragmática.** Los *sistemas de membranas* pueden resolver problemas en semántica y pragmática porque, por definición, son sistemas que

evolucionan, en el mismo sentido en que consideramos que el significado es una entidad dinámica (Bel Enguix y Jiménez López 2005b).

- ♦ **Diálogo y evolución del lenguaje.** Los *eco-sistemas de gramáticas* pueden modelar la estructura del diálogo (Bel Enguix y Jiménez López 2008) y explicar la evolución del lenguaje (Jiménez López 2012).

Además de esas aplicaciones generales, hay muchos retos en la lingüística contemporánea a los que la teoría de lenguajes formales puede ayudar a encontrar una solución. Destacamos los siguientes:

- ♦ **Formalización del contexto.** Aunque la mayoría de los estudiosos aceptarían que la noción de *contexto* es fundamental para la lingüística, en general se carece de teorías sólidas del contexto. Las gramáticas contextuales, los eco-sistemas de gramáticas, los sistemas de membranas o las NEP son buenos candidatos para la formalización del contexto en lingüística. Esos marcos proporcionan modelos en los que el contexto ya está formalizado y pueden ofrecer a la lingüística las herramientas teóricas necesarias.
- ♦ **Modelos para la interacción/interfaces entre módulos en una gramática.** Las interfaces entre componentes de la gramática constituyen una importante área de investigación en lingüística. La formalización de interfaces es un problema para los modelos lingüísticos jerárquicos y secuenciales. Sin embargo, no plantea ningún problema en los modelos que formalizan las ideas de paralelismo, interacción, distribución y cooperación. Los sistemas de gramáticas pueden ofrecer una buena solución para dar cuenta de las interfaces lingüísticas.
- ♦ **Formalización de la noción de evolución.** Un problema importante en la formalización del lenguaje natural es su dinamicidad, su naturaleza cambiante. En esta búsqueda de modelos matemáticos/formales para captar la dinámica del lenguaje natural pueden ser útiles los modelos bioinspirados en el lenguaje formal. Las NEP, por ejemplo, ofrecen suficiente flexibilidad para modelar cualquier cambio en cualquier momento en cualquier parte del sistema, siendo capaces de formalizar la evolución.
- ♦ **Modelos para distintos niveles de gramaticalidad.** La lingüística ha presentado la noción de gramaticalidad de forma discreta. A pesar de esas ideas, parece claro que los humanos no procesamos el lenguaje en términos discretos, sino gradualmente. En general, los modelos que defienden la idea de gramaticalidad difusa no proporcionan una definición formal del concepto. Los modelos no estándar de lenguajes formales pueden ayudar en esta cuestión lingüística.

Los temas anteriores son solo algunos de los retos actuales de la lingüística que podrían resolverse utilizando una teoría de lenguajes formales no estándar. El pleno desarrollo de teorías formales que aborden las cuestiones anteriores puede ayudar a una mejor descripción y formalización del lenguaje natural, y este avance tendrá gran importancia en el campo de la inteligencia artificial.

5. Conclusiones

Como sistema complejo que es, la explicación, formalización y simulación del lenguaje natural presenta importantes dificultades. Si nos ocupamos del lenguaje, necesitamos conectar e integrar varias disciplinas académicas para encontrar una solución. Por tanto, la interdisciplinariedad debe ser un rasgo esencial de la investigación sobre el lenguaje. En este entorno interdisciplinar, la lingüística y los lenguajes formales deben colaborar en la descripción y explicación del lenguaje.

En este artículo hemos repasado la historia de la relación entre la teoría de lenguajes formales y la lingüística. Ha sido una historia con altibajos. Fueron disciplinas cercanas desde los años sesenta hasta los ochenta. Actualmente, son dos áreas diferentes con problemas independientes, y su futuro podría ser muy prometedor si vuelven a colaborar. De hecho, el objetivo de este artículo ha sido destacar el papel clave que pueden desempeñar los modelos formales no estándar en la explicación de la evolución, la adquisición y el procesamiento del lenguaje natural.

Hemos centrado nuestra atención en el papel de la teoría de lenguajes formales en la lingüística. Sin embargo, la interdisciplinariedad de la que hablamos es bidireccional; es decir, pensamos que los modelos de la teoría de lenguajes formales también pueden beneficiarse de las teorías lingüísticas. Por lo tanto, nos gustaría llamar la atención de los investigadores que trabajan en la teoría de lenguajes formales sobre las posibilidades que ofrecen las lenguas naturales como motivación o inspiración para nuevos modelos en el campo de los lenguajes formales. Como subraya la siguiente cita, la teoría de lenguajes formales puede beneficiarse de volver a sus orígenes y tener de nuevo el lenguaje natural como modelo:

Besides improving our understanding of natural language, a worthy goal in itself, the formalization opened the door to the modern theory of computer languages and their compilers. This is not to say that every advance in formalizing linguistic theory is likely to have a similarly spectacular payoff, but clearly the informal theory remains a treasure-house inasmuch as it captures important insights about natural language (Kornai 2008).

En resumen, promover la relación entre la lingüística y la teoría de lenguajes formales puede ser fructífero para ambas áreas de investigación. La lingüística encon-

traría en la teoría de lenguajes formales las herramientas matemáticas para presentar sus teorías de forma rigurosa contribuyendo a una mejor comprensión del lenguaje natural. La teoría de lenguajes formales encontraría en la lingüística una inspiración *natural* para definir nuevos modelos que podrían convertirse en la base teórica de futuros sistemas computacionales.

Bibliografía

- AHO, A. V. (1968). "Indexed grammars-an extension of context-free grammars", *Journal of the Association for Computing Machinery*, 15(4), 647-671.
- BARTLETT, M. y KAZAKOV, D. (2004). "The role of environment structure in multi-agent simulations of language evolution". En *Proceedings of the Fourth Symposium on Adaptive Agents and Multi-Agent Systems* (pp. 2-9). Leeds: The Society for the Study of Artificial Intelligence and the Simulation of Behaviour.
- BEL-ENGUIG, G. y JIMÉNEZ-LÓPEZ, M. D. (2005). "Byosyntax. An overview", *Fundamenta Informaticae*, 64, 1-12.
- BEL-ENGUIG, G. y JIMÉNEZ-LÓPEZ, M. D. (2005). "Linguistic membrane systems and applications". En Gh. CIOBANU, Gh. PAUN y M. J. PÉREZ-JIMÉNEZ (eds.). *Applications of Membrane Computing* (pp. 347-388). Berlin: Springer.
- BEL-ENGUIG, G. y JIMÉNEZ-LÓPEZ, M. D. (2008). "Modelling dialogue as inter-action", *International Journal of Speech Technology*, 11(3/4), 209-221.
- BEL-ENGUIG, G., JIMÉNEZ-LÓPEZ, M. D., MERCAS, R. y PEREKRESTENKO, A. (2009). "Networks of evolutionary processors as natural language parsers". En *Proceedings of the First International Conference on Agents and Artificial Intelligence* (pp. 619-625). Oporto: INSTICC.
- BUSZKOWSKI, W., MARCISZEWSKI, W. y VAN BENTHEN, J. (eds.) (1988). *Categorical Grammar*. Amsterdam: John Benjamins.
- CASTELLANOS, J., MARTÍN-VIDE, C., MITRANA, V. y SEMPERE, J. M. (2003). "Networks of evolutionary processors". *Acta Informatica*, 39, 517-529.
- CHOMSKY, N. (1956). "Three models for the description of language", *IRE Transactions on Information Theory*, 2(3), 113-124.
- (1957). *Syntactic Structures*. The Hague: Mouton.
- CSUHAJ-VARJÚ, E., DASSOW, J., KELEMEN, J. y PÄUN, Gh. (1994). *Grammar Systems: A Grammatical Approach to Distribution and Cooperation*. London: Gordon and Breach.
- CSUHAJ-VARJÚ, E., KELEMEN, J., KELEMENOVÁ, A. y PÄUN, Gh. (1996). "Eco-grammar systems: A grammatical framework for life-like interactions", *Artificial Life*, 3(1), 1-28.
- GAZDAR, G., KLEIN, E., PULLUM, G. y SAG, I. (1985). *Generalized Phrase Structure Grammar*. Oxford: Blackwell.
- HEAD, T. (1987). "Formal language theory and DNA: An analysis of the generative capacity of specific recombination behaviors", *Bulletin of Mathematical Biology*, 49, 737-759.
- JIMÉNEZ-LÓPEZ, M. D. (2006). "A grammar systems approach to natural language grammar", *Linguistics and Philosophy*, 29, 419-454.

- JIMÉNEZ-LÓPEZ, M. D. (2012). "A grammar-based multi-agent system for language evolution". En J. BAJO PÉREZ et al. (eds.). *Highlights on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems* (pp. 45-52). Berlin: Springer.
- JOSHI, A. K. (1985). "How much context-sensitivity is required to provide reasonable structural descriptions: Tree adjoining grammars". En D. DOWTY, L. KARTTUNEN y A. ZWICKY (eds.). *Natural Language Parsing: Psychological, Computational and Theoretical Perspectives* (pp. 206-250). New York: Cambridge University Press.
- JOSHI, A., LEVY, L. y TAKAHASHI, M. (1975). "Tree adjunct grammars", *Journal of the Computer and System Sciences*, 10(1), 136-163.
- KAPLAN, R. M. y BRESNAN, J. (1982). "Lexical-functional grammar: A formal systems for grammatical representations". En J. BRESNAN (ed.). *The Mental Representation of Grammatical Relation* (pp. 173-281). Cambridge: MIT Press.
- KELEMEN, J. y KELEMENOVÁ, A. (1992). "A grammar-theoretic treatment of multiagent systems", *Cybernetics and Systems*, 23, 621-633.
- KORNAI, A. (2008). *Mathematical Linguistics*. London: Springer.
- LEVELT, W. (2008). *Formal Grammars in Linguistics and Psycholinguistics*. Amsterdam: John Benjamins.
- LINDENMAYER, A. (1968). "Mathematical models for cellular interaction in development", *Journal of Theoretical Biology*, 18, 280-315.
- MARCUS, S. (1969). «Contextual grammars» *Revue Romaine des Mathématiques Pures et Appliquées*, 14, 1525-1534.
- PARTEE, B. H., TER MEULEN, A. y WALL, R.E. (1993). *Mathematical Methods in Linguistics*. Dordrecht: Kluwer.
- PÄUN, Gh. (2000). "Computing with membranes", *Journal of Computer and System Sciences*, 61, 108-143.
- (2002). *Membrane Computing. An Introduction*. Berlin: Springer.
- POLLARD, C. y SAG, I. (1994). *Head-Driven Phrase Structure Grammar*. Chicago: Chicago University Press.
- POST, E. (1936). "Finite combinatory processes-formulation", *Journal of Symbolic Logic*, 1, 103-105.
- ROZENBERG, G. y SALOMAA, A. (eds.) (1997). *Handbook of Formal Languages*. Berlin: Springer.
- THUE, A. (1906). Über unendliche Zeichenreihen, *Norske Vid. Selsk. Skr., I Mat. Nat. Kl., Kristiania*, 7, 1-22.
- (1912). "Über die gegenseitige Lage gleicher Teile gewisser Zeichenreihen", *Norske Vid. Selsk. Skr., I Mat. Nat. Kl., Kristiania*, 1, 1-67.
- TURING, A. M. (1936). "On computable numbers with an application to the Entscheidungsproblem", *Proceedings London Mathematical Society*, 2/42, 230-265.