

Mapa científico de un campo emergente en un país periférico: análisis de redes del campo de la biología sintética en Chile

César Cisternas-Irarrázabal¹

Universidad de La Frontera

Arturo Vallejos-Romero

Universidad de La Frontera

Michelle Chauvet

Universidad Autónoma Metropolitana

Mauricio García-Ojeda

Universidad de La Frontera

Minerva Cordovés-Sánchez

Universidad de La Frontera

Felipe Sáez-Ardura

Universidad de La Frontera

RESUMEN

La biología sintética es una disciplina emergente y altamente promisorio, aunque la investigación en el campo se concentra en países desarrollados. En este marco, la presente investigación mapea el campo de la biología sintética en Chile con el objetivo de describir las redes de colaboración, las características de los investigadores y líneas temáticas que configuran este campo en un país periférico. El trabajo ha seguido un diseño de estudio cuantitativo no-experimental descriptivo. A partir de un corpus de 89 publicaciones con autoría de investigadores afiliados a Chile, se ha construido una red de coautoría de 375 nodos y otra de coocurrencia de palabras clave compuesta por 290 nodos. Sobre tales redes se han aplicado técnicas cuantitativas y de análisis de redes sociales. Los resultados evidencian una red de baja densidad en el campo de la biología sintética en Chile, la cual se encuentra fragmentada en 48 componentes. Asimismo, se han identificado seis líneas de investigación, entre las cuales domina un énfasis productivo, aunque también existen clústeres orientados a la ciencia básica y a la dimensión social de la biología sintética.

Palabras clave: *Biología sintética – Mapa científico – Campo científico – Tecnologías emergentes – Análisis de redes.*

¹ Contacto con los autores: César Cisternas-Irarrázabal (cesar.cisternas@ufrontera.cl), Arturo Vallejos-Romero (arturo.vallejos@ufrontera.cl), Michelle Chauvet (ecs@azc.uam.mx), Mauricio García-Ojeda (mauricio.garcia@ufrontera.cl), Minerva Cordovés-Sánchez (minerva.cordoves@ufrontera.cl), Felipe Sáez-Ardura (felipe.saez@ufrontera.cl).

Scientific map of an emerging field in a peripheral country: network analysis of the field of synthetic biology in Chile

ABSTRACT

Synthetic biology is an emerging and highly promising discipline, although research in the field is concentrated in developed countries. Within this framework, the present research maps the field of synthetic biology in Chile with the aim of describing the collaboration networks, the characteristics of the researchers and the thematic lines that make up this field in a peripheral country. The work has followed a descriptive non-experimental quantitative study design. Based on a corpus of 89 publications authored by researchers affiliated to Chile, a co-authorship network of 375 nodes and another network of co-occurrence of keywords composed of 290 nodes were constructed. Scientometric and social network analysis techniques were applied to these networks. The results show a low-density network in the field of synthetic biology in Chile, which is fragmented into 48 components. Likewise, six lines of research have been identified, among which a productive emphasis dominates, although there are also clusters oriented towards basic science and the social dimension of synthetic biology.

Key words: *Synthetic biology – Scientific map – Scientific field – Emerging technologies – Network analysis.*

El presente trabajo realiza un mapeo del campo de la biología sintética en Chile con el propósito de describir las redes de colaboración, las características de los investigadores y líneas temáticas que configuran este campo en un país periférico.

La biología sintética se constituye como un campo científico interdisciplinario a partir de las contribuciones de la biotecnología, ingeniería e informática, entre otras disciplinas, con el objetivo de construir estructuradamente partes, dispositivos y sistemas biológicos que puedan resultar en una contribución en ámbitos como la producción energética, la medicina y la biología teórica (Lu, 2020). Entre sus aspiraciones últimas se encuentra la creación de organismos artificiales a partir de materia inerte para dilucidar las bases biológicas del origen de la vida (Keshava et al., 2018).

Algunas tecnologías asociadas a la biología sintética ya son empleadas en ámbitos como la medicina, farmacología, nuevos materiales, insumos agrícolas e industria alimentaria (Voigt, 2020). Ahora bien, tal como ocurre en otros campos científicos, la organización de las estructuras globales de los sistemas científico y económico lleva a que los avances científicos y tecnológicos en el ámbito de la biología sintética se concentren en el centro global, es decir, Europa, Norteamérica y las potencias emergentes de Asia-Pacífico. Así, entre los países que lideran los progresos en esta disciplina se encuentran Estados Unidos, China, Reino Unido, Alemania, Suiza, Francia, Japón, Finlandia y Australia (Shapira et al., 2017).

La investigación en el área de la biología sintética en América Latina es aún incipiente, pero se ha expandido notoriamente en los últimos cinco años. A este creciente interés científico, se suma el enorme potencial que, de acuerdo con los análisis de un conjunto de organismos supranacionales, tiene la región en el ámbito de la bioeconomía (CEPAL et al., 2017), marco en el cual la biología sintética aparece como una tecnología clave, aunque aún subexplorada (CEPAL et al., 2017; Federici et al., 2013; Gomez-Hinostroza et al., 2023; Inter-American Development Bank, 2017; Nadra et al., 2020).

Estudiar la emergencia de un campo científico interdisciplinario de vanguardia en un contexto periférico entrega la posibilidad de avanzar en la comprensión del modo en el que se configuran nuevas comunidades de investigación en estos territorios. Estos espacios tienen la particularidad de haber implementado una serie de políticas científicas orientadas a desarrollar capacidades científicas, pero no haber podido romper su condición de dependencia de los centros científicos (Kreimer & Vessuri, 2018). En este sentido, sus sistemas científicos se desarrollan tardíamente, siguiendo agendas científicas foráneas, con escasez de recursos y en un marco de dependencia teórica y técnica de las potencias científicas internacionales (Kreimer, 2023).

La estructura del campo de la biología sintética ha sido estudiada, a nivel global y de casos nacionales, desde distintas estrategias metodológicas. Muchas publicaciones describen de manera general, sin adoptar técnicas

analíticas claramente definidas, el estado del campo en países como Eslovaquia (Gasperek & Hantabal, 2022), Reino Unido (Wachter et al., 2022), Alemania (Krink et al., 2022), China (Pei et al., 2011), República Checa (Juračka et al., 2022), Argentina (Nadra et al., 2020), México (Barboza-Pérez et al., 2025) o Indonesia (Sanka et al., 2023), o regiones como Sudamérica (Gomez-Hinostroza et al., 2023) o Europa (Donati et al., 2022). Estos trabajos narran sucintamente la historia de la emergencia y evolución del campo, identificando los actores más relevantes en cuanto a la investigación y la industria.

Otros estudios realizan un análisis cuantitativo de publicaciones o patentes relacionadas al campo. La mayoría de estos trabajos presentan datos relativos a las redes de autores, instituciones, países y palabras clave, pero las analiza remitiéndose a mencionar los nodos más relevantes y los clústeres que se forman (Hu & Rousseau, 2015; Naheem et al., 2022; Naheem & Sivaraman, 2022; Oldham et al., 2012; Oldham & Hall, 2018; Shapira et al., 2017). De este modo, no consideran indicadores de los atributos estructurales de las redes, lo que limita enormemente la complejidad del análisis y la riqueza de los resultados obtenidos, puesto que son tales indicadores los que permiten describir en profundidad y con precisión las características de una red.

El mapeo efectuado en esta investigación supone una innovación teórica y metodológica respecto a trabajos anteriores, en cuanto se ha desarrollado utilizando un enfoque teórico-analítico sustentado en el análisis de redes sociales. Esta perspectiva comprende un modo de análisis sociológico y un conjunto de técnicas metodológicas orientadas a explorar los patrones subyacentes a las relaciones sociales (Scott, 2017). En consecuencia, esta aproximación puede suponer una comprensión más profunda de la estructura del campo y las relaciones sobre las que se constituye, tal como lo demuestran varias investigaciones que utilizan análisis de redes sociales para estudiar campos científicos (Barabási et al., 2002; Cancino et al., 2023; Hoffmann et al., 2016; Kaiser et al., 2023; Kim et al., 2024; Newman, 2001a, 2001b).

El documento se estructura en cinco secciones. La primera de ellas se enfoca en contextualizar el surgimiento de la biología sintética como campo científico en Chile. Posteriormente, se expone el enfoque teórico desde el cual se desarrolla la investigación. En la tercera sección se detalla la metodología empleada para el procesamiento y análisis de los datos. Mientras que, en las dos últimas secciones, se presentan los resultados y las conclusiones del trabajo, respectivamente.

DESARROLLO DE LA BIOLOGÍA SINTÉTICA EN CHILE

Chile ha experimentado un notable avance en las ciencias biológicas durante las últimas décadas. Entre 2006 y 2010, el 10,9% de las publicaciones indexadas en Scopus del país correspondieron a investigaciones en las áreas de ciencias agrícolas y biológicas, así como en química, genética y biología molecular. Este dato fue estimado en base a las publicaciones Scopus del período 2006-2010. Durante este periodo, ambas categorías se ubicaron entre los seis campos más productivos a nivel nacional.

El país comenzó su incursión en el campo de la biología sintética con la participación de un equipo de estudiantes de la Pontificia Universidad Católica de Chile en la edición 2012 de la competencia Internacional Genetically Engineered Machine (iGEM). El equipo superó a otros participantes de América Latina y compitió en la final en el Massachusetts Institute of Technology (Federici et al., 2013).

El Núcleo Milenio en Genómica Funcional de Plantas se destaca como una de las plataformas científicas pioneras en el desarrollo de investigaciones relacionadas con la biología sintética en Chile (Gomez-Hinostroza et al., 2023). En 2014, este equipo dio origen al Núcleo Milenio de Biología Sintética y Biología de Sistemas Vegetales, en colaboración con la Pontificia Universidad Católica de Chile y la Universidad Adolfo Ibáñez. El enfoque de este grupo se centró en investigar cómo las condiciones ambientales influyen en las redes genéticas responsables de los procesos de crecimiento, desarrollo y respuesta adaptativa en organismos vegetales (Núcleo Milenio de Biología Sintética, 2017).

Actualmente, la investigación en este campo es liderada por el Instituto Milenio en Biología Integrativa, creado en 2017 a partir de los equipos de los Núcleos Milenio en Biología Sintética y de Sistemas Vegetales, y en Biología Integrativa Fúngica y Sintética. Este instituto agrupa a las universidades Católica de Chile, Andrés Bello, de Santiago de Chile y Mayor, y dirige sus esfuerzos hacia cuatro objetivos principales: (1) identificar los mecanismos moleculares de las respuestas de los organismos a los cambios ambientales, (2) evaluar el impacto de las señales ambientales en las interacciones entre especies, (3) diseñar y desarrollar bucles moleculares y analizar la memoria ambiental transcripcional, y (4) implementar tecnologías de código abierto y fomentar la ciencia abierta (Instituto Milenio de Biología Integrativa, 2024a, 2024b).

Este proceso de desarrollo de capacidades ha posicionado a Chile como el tercer país de América Latina en términos de cantidad de publicaciones relacionadas con la biología sintética en los últimos cinco años. Aunque se encuentra significativamente por detrás de Brasil, el líder regional en este ámbito, Chile está bien posicionado en comparación con otros países latinoamericanos con niveles intermedios de capacidades científicas, como México, Argentina y Colombia.

La combinación de un desarrollo progresivo y exitoso de capacidades científicas, junto con su posición entre los líderes regionales en la incorporación al campo de la biología sintética, demuestra el considerable potencial de Chile para avanzar en la investigación y la innovación tecnológica en esta área (Federici et al., 2013; Gomez-Hinostroza et al., 2023).

LAS REDES SOCIALES EN EL CONTEXTO DE LA ACTIVIDAD CIENTÍFICA

Comprender las dinámicas grupales de la actividad científica ha sido uno de los intereses centrales de los estudios sociales de la ciencia. Algunos de los trabajos fundacionales del campo entregan un papel fundamental a la comunidad como estructura de organización de la ciencia. Así, Kuhn (2013) plantea la idea de comunidades agrupadas bajo un paradigma y Merton (2002) identifica la comunalidad como uno de los componentes clave del ethos de la ciencia.

No obstante, ya en los sesenta, surgen nuevas líneas de investigación sobre las lógicas de articulación de la cooperación científica. En este marco, Price (1963) sugiere que los investigadores tienden a congregarse en torno a científicos altamente productivos que conforman colegios invisibles, esto es, estructuras informales de organización que facilitan la comunicación en el campo y confieren prestigio a sus miembros.

Desde entonces se ha avanzado considerablemente en la investigación respecto al modo en el que los científicos se vinculan. Varias corrientes dentro de los estudios sociales de la ciencia coinciden en que las motivaciones que mueven a estos actores van más allá de lo meramente técnico, siendo relevantes también factores personales relacionados con la generación de alianzas que mejoren su posicionamiento o le permitan acceder a determinados recursos (Bourdieu, 1975; Knorr-Cetina, 1996).

Años de investigación en redes sociales han demostrado que, con independencia del ámbito

del que se trate, los nodos de una red social tienden a vincularse entre sí principalmente debido a dos factores. El primero de ellos es la propincuidad, es decir, la proximidad geográfica o, en términos más amplios, encontrarse en el mismo lugar al mismo tiempo (Kadushin, 2012; Reagans, 2011; Rivera et al., 2010). Mientras que el segundo es la homofilia, esto es, la tendencia que tienen dos nodos a vincularse si presentan características similares (Kadushin, 2012; Kossinets & Watts, 2009; McPherson et al., 2001; Reagans, 2011).

Aplicados a un campo científico, estos principios implican que dos investigadores (o nodos de una red científica) tienen más probabilidades de colaborar si su afiliación es coincidente en cuanto a departamento, facultad, institución, ciudad o país; o si comparten características como jerarquía académica, formación disciplinar, edad, género, adscripción étnica, lengua, etc. Diversas investigaciones muestran que, en distintos campos, la proximidad geográfica efectivamente propicia la vinculación entre investigadores (Akbaritabar et al., 2020; Badar et al., 2016; Hoffmann et al., 2016; Horta et al., 2022; Kaiser et al., 2023), aunque a nivel de países la propincuidad en la colaboración científica puede variar entre distintos nodos (Kaiser et al., 2023; Xie et al., 2024). Del mismo modo, la evidencia confirma la relevancia de factores como la edad (Badar et al., 2016; Zhang et al., 2018), el género (Akbaritabar et al., 2020; Whittington et al., 2024), lengua (Horta et al., 2022; Kaiser et al., 2023), el posicionamiento de las instituciones en el campo (Tu, 2019), la formación disciplinar (Locatelli et al., 2021), la línea de investigación (Akbaritabar et al., 2020; Haupt & Lee, 2024; Horta et al., 2022; Zhang et al., 2018) y la adscripción étnica (Freeman & Huang, 2015) en la estructura que adoptan los vínculos de una red científica.

Asimismo, se ha observado la tendencia de las redes de co-autoría a seguir patrones de conexión preferencial (Akbaritabar et al., 2020; Barabási et al., 2002; Zhang et al., 2018) y transitividad (Haupt & Lee, 2024; Zhang et al., 2018). La conexión preferencial conlleva que, en estas redes, los nuevos nodos se vincularán con mayor probabilidad a nodos que presentan una alta conexión dentro de la red (Barabási & Albert, 1999; Papadopoulos et al., 2012). Mientras que la transitividad implica que si un nodo *a* está vinculado a un nodo *b* y este último está vinculado a un nodo *c*, existe una alta probabilidad de que el nodo *a* se vincule con el *c* (Holland & Leinhardt, 1971).

La evidencia recolectada desde otras perspectivas resulta coincidente con la aproximación de redes sociales. En diversos

campos científicos, la colaboración es percibida por los investigadores como una compleja dinámica atravesada por elementos científicos, sociales, políticos y éticos (Parker & Kingori, 2016). A lo largo de la última década, la investigación ha destacado la importancia que tienen en la construcción de equipos de investigación estables una serie de factores como la proximidad física que permita la interacción en persona (Hall et al., 2018; Ma & Huang, 2024), que los vínculos en el grupo sean equilibrados y justos (Hall et al., 2018; Parker & Kingori, 2016), la existencia de sujetos que articulen la red y ejerzan un liderazgo efectivo (Hall et al., 2018; Parker & Kingori, 2016) y la experiencia previa de algunos miembros en colaboración (Ceballos et al., 2018; Hall et al., 2018; Love et al., 2021; Parker & Kingori, 2016).

También se ha encontrado que pueden ser cruciales en la viabilidad y estabilidad de la colaboración variables como el impacto de los productos del trabajo desarrollado en conjunto, la consolidación de una identidad grupal (Degn et al., 2018), el poder embarcarse en temáticas novedosas e interesantes, la competencia percibida en los potenciales colaboradores y la opción de formar nuevas generaciones (Parker & Kingori, 2016). Sin embargo, además de estas condiciones, resulta prioritario que las universidades y centros de investigación mantengan una cultura institucional en la que exista un ethos que promueva la colaboración (Lee & Jabloner, 2017).

En lo que respecta a la biología sintética, diferentes trabajos han descrito, a grandes rasgos, la realidad del campo a nivel nacional y regional. Algunas de estas publicaciones abordan la realidad en países y regiones en los que este campo disciplinar está consolidado, tales como China (Pei et al., 2011), Reino Unido (Wachter et al., 2022), Alemania (Krink et al., 2022) o Europa (Donati et al., 2022). El escenario del campo en aquellos contextos destaca por contar con múltiples instituciones fuertemente involucradas en el desarrollo de investigación en biología sintética (Donati et al., 2022; Pei et al., 2011; Wachter et al., 2022), asociaciones o sociedades nacionales del área (Donati et al., 2022; Krink et al., 2022; Pei et al., 2011; Wachter et al., 2022) y por contar con políticas científicas que definen la biología sintética como un área prioritaria o que promueven su expansión (Pei et al., 2011; Wachter et al., 2022).

Pero también existen trabajos que reportan la situación de la biología sintética en contextos nacionales en los que la disciplina aún se encuentra en estado embrionario. Así, respecto al caso de Indonesia, Sanka et al. (2023) describen un campo aún en estado muy

embrionario en el que destaca la participación de estudiantes en la iGEM, el regreso de postgraduados en el extranjero, la iniciativa de emplear técnicas de biología sintética en el ámbito de la gestión de residuos de la industria del aceite de palma y el potencial de las herramientas del campo para la preservación de la biodiversidad local.

Un panorama similar tiene lugar en Eslovaquia y República Checa. En Eslovaquia se han desarrollado algunos proyectos vinculados a la biología sintética en áreas como el microambiente de los tumores y la bioproducción industrial, existiendo algunos investigadores que trabajan en colaboración estrecha con grupos internacionales consolidados (Gaspárek & Hantabal, 2022). En tanto, República Checa presenta un desarrollo algo mayor, con algunos grupos en importantes universidades del país, aunque la comunidad se encuentra dispersa y carece de organización (Juračka et al., 2022).

En Sudamérica, Brasil es quien lidera en cuando al grado de consolidación del campo de la biología sintética. Múltiples equipos han participado en la iGEM, al tiempo que ciertos grupos de investigación, y en particular el nodo constituido por la Universidad de São Paulo, generan productos de investigación que logran impacto en el campo global de la disciplina (Gomez-Hinostroza et al., 2023).

Por su parte, en Argentina, país con una importante base de capacidades científicas en el ámbito de las ciencias biológicas, a pesar de la iniciativa de algunos grupos pioneros, el campo no se ha podido consolidar a causa de la falta de presupuesto que lleva a que los investigadores transiten a otras áreas en las que el acceso a recursos es mayor (Nadra et al., 2020). En una realidad algo diferente, a lo largo de la última década, en Chile, distintos equipos han participado en las competencias iGEM (Federici et al., 2013; Gomez-Hinostroza et al., 2023) y se ha conformado un pequeño campo liderado por el grupo de la Pontificia Universidad Católica de Chile, el cual ha explorado tópicos como las herramientas de ensamblaje de ADN, el mejoramiento de microorganismos del suelo para aplicación agrícola o las herramientas de análisis de datos (Gomez-Hinostroza et al., 2023).

Mientras que, en otros países de Sudamérica, como Ecuador y Uruguay, el campo es muy pequeño, pero se han conformado algunos grupos de investigación (Gomez-Hinostroza et al., 2023).

También se han llevado a cabo trabajos de análisis cuantitativo de publicaciones o patentes vinculadas al campo de la biología sintética. La mayoría de estos estudios presenta

datos sobre redes de autores, instituciones, países y palabras clave, pero su análisis se limita a destacar los nodos más relevantes y los clústeres que emergen. En esta línea, estos trabajos destacan que la producción científica en esta área es liderada por Estados Unidos, Alemania, Japón, China, Reino Unido y Francia (Hu & Rousseau, 2015; Naheem et al., 2022; Oldham et al., 2012; Shapira et al., 2017). Asimismo, se da cuenta de un campo altamente interdisciplinario (Hu & Rousseau, 2015; Shapira et al., 2017) y con una importante colaboración internacional (Naheem et al., 2022; Oldham et al., 2012; Shapira et al., 2017).

En lo que respecta a las temáticas de investigación, Naheem et al. (2022) identifican seis clústeres de investigación, a saber, biología sintética, sintético, CRISPR, autoensamblaje, biosíntesis y ADN. Mientras que Hu & Rousseau (2015) identifican como las palabras clave de mayor impacto en el campo los términos: ingeniería de proteínas, ingeniería metabólica, diseño de proteínas, ADN, microARN, síntesis de proteínas libre de células y plegado de proteínas. Estos análisis son demasiado generales, lo que lleva a que las temáticas identificadas adolezcan de un alto grado de ambigüedad, por lo que no es posible, a partir de ellos, deducir las líneas de investigación que estructuran el campo.

Ejercicios similares se han efectuado en el ámbito de las patentes. En esta línea, Naheem & Sivaraman (2022) destacan el importante incremento que ha tenido la colaboración en la autoría de las patentes. Por su parte, Oldham & Hall (2018) dan cuenta de que la patentación relacionada a la biología sintética es liderada ampliamente por Estados Unidos y que parte importante de las patentes se concentran en las áreas de biotecnología/ingeniería genética, fermentación/enzimas usadas para la síntesis de compuestos químicos, fármacos/medicinas, medición/testeo que involucra enzimas/microorganismos, péptidos, análisis de materiales por sus propiedades químicas o físicas y azúcares/ácidos nucleicos/nucleósidos.

Ante el estado del arte de la investigación sobre la estructura del campo de la biología sintética a nivel global, regional y nacional, el análisis de redes puede suponer avances significativos para comprender las dinámicas que subyacen a la estructuración de este campo. Las técnicas analíticas de este enfoque permiten develar, en lo que respecta a los investigadores, aquellos nodos más relevantes en el campo y los grupos que se configuran, entregando luces sobre las dinámicas de influencia y colaboración en el campo. En tanto, en lo relativo a dimensión semántica, se vuelve posible caracterizar los tópicos de investigación y las líneas temáticas en torno a las cuales se desarrolla el campo.

MÉTODO

Diseño y enfoque

La presente investigación se ha desarrollado siguiendo un diseño de estudio cuantitativo no-experimental descriptivo de alcance temporal seccional (Creswell & Creswell, 2018; Edmonds & Kennedy, 2017). Este tipo de diseño permite cubrir muestras amplias, caracterizarlas (Neuman, 2014) e identificar tendencias en el conjunto de sujetos de estudio (Creswell & Creswell, 2018).

Para la construcción de las redes se ha adoptado un enfoque nominalista, es decir, las redes han sido delimitadas a partir de criterios preestablecidos en el diseño de investigación en función del objetivo del estudio (Knoke & Yang, 2020). Esto implica que dicho diseño define las condiciones que deben reunir los nodos y los vínculos para ser considerados como tales en el estudio. Los detalles respecto a los criterios definidos para delimitar la población se entregan en el próximo apartado.

Muestra y datos utilizados

Para construir las distintas redes analizadas en la investigación se han utilizado los metadatos asociados a un corpus delimitado de publicaciones científicas sobre biología sintética. Para construir este conjunto de registros se han establecido dos criterios para incluir la publicación: (1) contener, en su título, resumen o palabras clave, alguna de los términos centrales asociados al campo, identificados en el trabajo de mapeo bibliométrico del campo de la biología sintética a nivel global realizado por Shapira et al. (2017), y (2) que al menos uno de sus autores declare afiliación a alguna institución chilena. De este modo, la cadena de búsqueda quedó construida de esta manera:

```
CU= Chile AND (((TS = ("synthetic biolog*" OR "synthetic dna" OR "synthetic genom*" OR "synthetic *nucleotide" OR "synthetic promoter" OR "synthetic gene* cluster") NOT TS = ("photosynthe*")) OR (TS = ("synthetic mammalian gene*" AND "mammalian cell") NOT TS = "photosynthe*") OR (TS = "synthetic gene*" NOT TS = ("synthetic gener*" OR "photosynthe*")) OR (TS = ("artificial gene* network" OR ("artificial gene* circuit*" AND "biological system*")) NOT TS = "gener*") OR (TS = ("artificial cell") NOT TS = ("cell* telephone" OR "cell* phone" OR "cell* culture" OR "logic cell*" OR "fuel cell*" OR "battery cell*" OR "load-cell*" OR "geo-synthetic cell*" OR "memory cell*" OR "cellular network" OR "ram cell*" OR "rom cell*" OR "maximum cell*" OR "electrochemical cell*" OR "solar cell*")) OR (TS = ("synthetic cell") NOT TS = ("cell* telephone" OR "cell* phone" OR "cell* culture" OR "logic cell*" OR "fuel cell*" OR "battery cell*" OR "load-cell*" OR "geo-synthetic cell*" OR "memory cell*" OR "cellular network" OR "ram cell*" OR "rom cell*" OR "maximum cell*" OR "electrochemical cell*" OR "solar cell*" OR "photosynthe*")) OR (TS = ("artificial nucleic acid*" OR "artificial *nucleotide")) OR (TS = ("bio brick" OR "biobrick" OR "bio-brick"))))
```

Se muestra la cadena utilizada para realizar la búsqueda en Web of Science. Para Scopus se empleó la misma cadena, pero se reemplazaron los códigos de campo en función de aquellos usados por tal base de datos. Así, en lugar de "CU" se utilizó "AFFILCOUNTRY" y "TS" fue sustituido por "TITLE-ABS-KEY".

El proceso de construcción del corpus de publicaciones, tal como lo muestra el Gráfico 1, comenzó con búsquedas en Web of Science y Scopus, las cuales arrojaron 71 y 81 resultados,

respectivamente. Una vez eliminados los duplicados se obtuvo un total de 92 registros únicos. De estos, se excluyeron tres trabajos: uno por corresponder a una retracción, otro por no corresponder a un producto de investigación del campo de la biología sintética y, finalmente, se descartó un tercer registro debido a que la publicación se encontraba erróneamente indexada como afiliada a Chile, pero sus investigadores no tenían relación con instituciones chilenas. De este modo, se conformó un corpus final de 89 publicaciones.

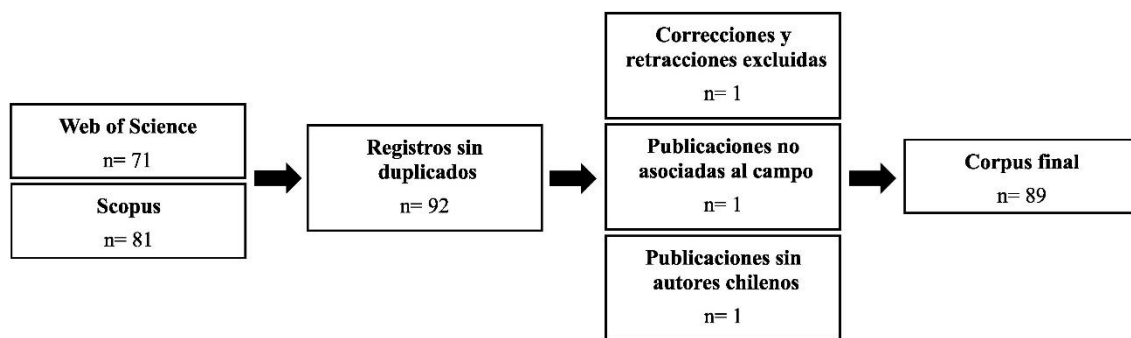


Gráfico 1. Proceso de construcción y depuración del corpus de publicaciones.

Fuente: Elaboración propia.

Los metadatos asociados a este conjunto de publicaciones han permitido elaborar dos matrices tipo I para el análisis, esto es, matrices en las cuales tanto las columnas como las filas contienen los nodos de interés para el estudio y en las que los vínculos entre tales nodos se representan con un valor 1 y la inexistencia de vínculo se registra como valor 0 (Bhambere & Hirve, 2022; Marin & Wellman, 2011).

Utilizando estas matrices se han construido dos redes sociocéntricas. La primera de ellas es una red de autores, la cual se encuentra conformada por 375 investigadores. En esta red los nodos los constituyen los autores, mientras que los vínculos representan la colaboración en una publicación científica. Se entiende por colaboración la coautoría de dos nodos en una misma publicación.

Por su parte, la segunda red es una red de palabras clave de las publicaciones conformada por 290 términos. En este caso, los nodos son palabras clave indicadas por los autores en las publicaciones, en tanto, los vínculos muestran la aparición de dos palabras clave en una misma publicación.

Técnicas de análisis y resguardos éticos

Para en análisis de las redes construidas se han utilizado los softwares UCINET (versión 6.798), el cual permite realizar análisis especializados de redes, entregando distintos indicadores estructurales y relacionales y VOSViewer (versión 1.6.15), enfocado en los análisis cuantitativos.

La red de autores fue analizada en función de sus atributos estructurales y composicionales, ya que tal como lo indica Robins (2015) la investigación de redes sociales debe poner atención tanto a la estructura del sistema, como a los individuos que se encuentran vinculados en la red. Se estudiaron, así, sus características estructurales como red, en base a su densidad (proporción de relaciones posibles que efectivamente tienen lugar), componentes (grupos de nodos vinculados) y los índices de centralidad de grado (número de vínculos con los que se vincula un nodo), de intermediación (cantidad de caminos más cortos que pasan por el nodo) y cercanía (cercanía del nodo respecto a todos los demás) de los nodos que la integran. Pero, también, variables que representan atributos de los nodos, a saber, el país e institución de afiliación, el género y la cantidad de publicaciones. En esta red, las características

de los nodos representan tres variables: número de publicaciones científicas (tamaño), afiliación chilena o extranjera (forma) y género (color).

Por otra parte, la red de palabras clave fue analizada en base a sus atributos estructurales. De este modo, en el caso de esta red, los análisis se concentraron en identificar clústeres temáticos a partir de las relaciones existentes entre los nodos. Para identificar estos clústeres se utilizó el algoritmo del software VOSViewer, el cual, a partir de una matriz de similitud (construida en base a la medida denominada *fuerza de asociación*), genera un grafo clusterizado en el que los clústeres están conformados por nodos directamente relacionados y nodos considerados similares por el algoritmo (Van Eck & Waltman, 2010). Ahora bien, VOSViewer ofrece la ventaja de permitir al analista realizar pequeños ajustes a la clústerización mediante el parámetro de *resolución*. Mientras mayor valor se asigne a este parámetro, mayor será la cantidad de clústeres que el software identificará (Waltman et al., 2010).

En el caso de esta red, las características de los nodos retratarán dos propiedades de estos, a saber: frecuencia de aparición de la palabra clave en los artículos (tamaño) y clúster al que pertenece (color).

Cabe apuntar que, con la finalidad de respetar los protocolos éticos de la investigación en ciencias sociales, la red de autores se presenta de manera anonimizada, ya que, si bien los datos utilizados son de acceso público, las relaciones identificadas mediante los análisis pueden constituir información sensible. En consecuencia, en la red de investigadores, los nodos son etiquetados con un código. Este código está integrado por dos elementos separados por un punto: (1) una C seguida del número del componente y (2) el número del nodo dentro de ese componente. Los números asignados a cada clúster y nodo son aleatorios.

RESULTADOS

El Gráfico 2 representa la red configurada por los 375 investigadores que forman parte del campo de la biología sintética en Chile. Los análisis evidencian que la densidad de la red es considerablemente baja, llegando solo a 0.020. Esto implica que, del total de vínculos teóricamente posibles entre los nodos de la red, únicamente se han generado, en la realidad, un 2% de ellos.

La baja densidad de la red se evidencia, también, en la alta fragmentación en subgrupos que caracteriza al campo. Se han identificado 48 componentes, de los cuales 22, es decir, un 45,8% está formado por cinco o menos investigadores. Entre los componentes más amplios, se encuentran once que reúnen a diez o más investigadores.

Para establecer los liderazgos internos de los clústeres se analizaron tres variables. La primera de ellas es la cantidad de publicaciones, asumiéndose que, a mayor cantidad de publicaciones en el corpus, mayor relevancia del nodo en el clúster. La segunda fue la posición del nodo en la red, evaluada mediante las centralidades de grado, intermediación y cercanía. Finalmente, en aquellos casos en los que no fuese posible determinar con claridad un líder del clúster a partir de las dos variables anteriores, se observó la posición de los nodos en la lista de autorías de cada artículo, considerándose más relevantes aquellos nodos que figuraran en una mayor cantidad de publicaciones como autor de correspondencia o último autor.

De esta manera, es posible señalar que cinco de los once grupos más importantes son liderados por científicos afiliados a alguna institución chilena, a saber, aquellos cuyos nodos principales son C12.13 (39 investigadores), C1.1/C1.15 (26 investigadores), C14.14/C14.17 (21 investigadores), C8.6 (16 investigadores) y C33.8 (15 investigadores). Al tiempo que seis de ellos son comandados por un investigador no relacionado a Chile, correspondiendo a los equipos de C10.19 (20 investigadores), C4.10 (14 investigadores), C3.3/C3.12 (13 investigadores), C26.1 (13 investigadores), C7.3 (11 investigadores) y C15.5 (10 investigadores). Es preciso apuntar que solo existe un investigador con afiliación chilena en cada uno de estos seis clústeres y que estos se configuran a partir de la colaboración de los autores en una única publicación.

Al considerar los atributos composicionales de la red se aprecia que la biología sintética en Chile es un campo dominado por hombres (en celeste). Si bien existe una importante presencia de investigadoras (en naranja), las posiciones de liderazgo son ocupadas, en su mayoría, por hombres. Esto resulta evidente si se observa la cantidad de publicaciones de cada autor. En el Gráfico 2, la producción de los distintos nodos está representada por su tamaño. De este modo, se aprecia que los autores con mayor producción son hombres situados en los componentes más amplios de la red.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, cabe destacar la importante vinculación que los investigadores nacionales (cuadrados) mantienen con pares en el extranjero (triángulos invertidos). En prácticamente todos los componentes más amplios se puede observar una importante presencia de nodos afiliados a instituciones foráneas. En tanto, a nivel de la red general, el

Entre los países con los que los investigadores chilenos mantienen una mayor cantidad de vínculos destacan Estados Unidos, países latinoamericanos, como Argentina, Brasil, Colombia y México, y europeos, como Alemania, Francia, España y Reino Unido.

Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales

Tabla 1*Afiliación de los nodos de los componentes de liderazgo chileno más relevantes*

Componente	Líder	Nodos	Nodos extranjeros	Mujeres	Instituciones Nacionales	Regiones origen nodos nacionales
C12	C12.13	39	14 (35,9%)	5 (12,8%)	4	1
C1	C1.1/C1.15	26	6 (23,1%)	11 (42,3%)	3	1
C14	C14.14/C14.17	21	0 (0%)	8 (38,1%)	6	1
C8	C8.6	16	4 (25%)	6 (37,5%)	1	1
C33	C33.8	15	11 (73,3%)	5 (33,3%)	1	1
Red global	-	375	203 (54,1%)	117 (31,2%)	31	10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2*Nodos con mayor centralidad de grado*

Nodo	Centralidad de grado	Líder de su componente	Afiliación Chile	Género
C12.13	38	C12.13	Sí	Masculino
C12.23	29	C12.13	Sí	Femenino
C12.26	29	C12.13	Sí	Masculino
C12.31	28	C12.13	Sí	Masculino
C10.1	19	C10.19	No	Masculino
C10.2	19	C10.19	No	Masculino
C10.3	19	C10.19	Sí	Femenino
C10.4	19	C10.19	No	Femenino
C10.5	19	C10.19	Sí	Masculino
C10.6	19	C10.19	No	Femenino
C10.7	19	C10.19	No	Masculino
C10.8	19	C10.19	No	Femenino
C10.9	19	C10.19	No	Femenino
C10.10	19	C10.19	No	Femenino
C10.11	19	C10.19	No	Femenino
C10.12	19	C10.19	No	Masculino
C10.13	19	C10.19	No	Femenino
C10.14	19	C10.19	No	Masculino
C10.15	19	C10.19	No	Femenino
C10.16	19	C10.19	No	Masculino
C10.17	19	C10.19	No	Femenino
C10.18	19	C10.19	No	Masculino
C10.19	19	C10.19	No	Femenino
C10.20	19	C10.19	No	Masculino

Fuente: Elaboración propia.

Las Tablas 3 y 4 muestran, respectivamente, los nodos con mayor centralidad de intermediación y centralidad de cercanía. Esto es, aquellos nodos que se encuentran en la mayor cantidad de rutas más cortas entre pares de nodos (distancia geodésica) y los que presentan una distancia promedio menor a los demás nodos. Ambos indicadores reflejan la fluidez con la que circula la información en la red. En este caso, al tratarse de una red de baja densidad, altamente fragmentada y constituida por múltiples componentes, las magnitudes de las centralidades de intermediación y cercanía de los nodos tenderá a ser baja.

Ahora bien, algunos nodos adquieren un rol más relevante en sus componentes y, por consiguiente, se vuelven actores importantes en el campo de la biología sintética en Chile. Así, entre los nodos con mayor protagonismo en la articulación de vínculos en función de su posición como intermediario más próximo entre distintos pares de investigadores se encuentran varios nodos pertenecientes a los componentes liderados por C12.13 (C12.13, C12.16, C12.18, C12.23, C12.26 y C12.31), C1.1/C1.15 (C1.1, C1.12, C1.15, C1.17 y C1.23), C14.14/C14.17

(C14.3, C14.13, C14.14, C14.17 y C14.21), C8.6 (C8.3, C8.6 y C8.10), además de C33.8.

De los nodos con mayor centralidad de intermediación, solo dos son extranjeros y cuatro son mujeres. Mientras que, entre aquellos con mayor centralidad de cercanía solo cinco son extranjeros y dos son mujeres. Esto da cuenta de la relevancia en el campo local que tienen los grupos de investigación liderados por científicos afiliados a instituciones chilenas y refuerza la idea de que las posiciones claves en dicho campo son ocupadas por hombres.

En tanto, al considerar la distancia promedio con respecto a otros nodos de la red (centralidad de cercanía), destacan ampliamente los investigadores pertenecientes al grupo liderado por C12.13. Todos estos nodos presentan una centralidad de cercanía mayor a 0,265.

En su conjunto, estos datos confirman la relegación que afecta a las investigadoras chilenas en el campo, puesto que solo cinco (C12.23, C12.24, C14.13, C1.12 y C1.17) han logrado alcanzar posiciones medianamente estratégicas en la red.

Tabla 3

Nodos con mayor centralidad de intermediación (CI)

Nodo	CI	CI normalizada	Líder de su componente	Afiliación Chile	Género
C12.13	275,483	0,389	C12.13	Sí	Masculino
C1.1	161,667	0,228	C1.1/C1.15	Sí	Masculino
C1.15	160,000	0,226	C1.1/C1.15	Sí	Masculino
C12.31	85,714	0.123	C12.13	Sí	Masculino
C14.17	75,000	0.108	C14.14/C14.17	Sí	Masculino
C12.26	73,531	0.105	C12.13	Sí	Masculino
C12.23	73,531	0.105	C12.13	Sí	Femenino
C33.8	56,000	0.080	C33.8	Sí	Masculino
C14.13	41,750	0.060	C14.14/C14.17	Sí	Femenino
C14.14	41,750	0.060	C14.14/C14.17	Sí	Masculino
C8.6	25,500	0.037	C8.6	Sí	Masculino
C12.16	18,250	0.026	C12.13	No	Masculino
C8.3	11,500	0.016	C8.6	Sí	Masculino
C1.12	10,000	0.014	C1.1/C1.15	Sí	Femenino
C8.10	8,250	0.012	C8.6	Sí	Masculino
C1.23	7,667	0.011	C1.1/C1.15	Sí	Masculino
C1.17	7,667	0.011	C1.1/C1.15	Sí	Femenino
C12.18	7,400	0.011	C12.13	No	Masculino
C14.21	6,750	0.010	C14.14/C14.17	Sí	Masculino
C14.3	6,750	0.010	C14.14/C14.17	Sí	Masculino

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4*Nodos con mayor centralidad de cercanía*

Nodo	Centralidad de cercanía	Líder de su componente	Afiliación Chile	Género
C12.13	0,271	C12.13	Sí	Masculino
C12.23	0,269	C12.13	Sí	Femenino
C12.26	0,269	C12.13	Sí	Masculino
C12.31	0,269	C12.13	Sí	Masculino
C12.16	0,266	C12.13	No	Masculino
C12.18	0,266	C12.13	No	Masculino
C12.24	0,266	C12.13	Sí	Femenino
C12.30	0,266	C12.13	Sí	Masculino
C12.35	0,266	C12.13	Sí	Masculino
C12.38	0,266	C12.13	Sí	Masculino
C12.1	0,265	C12.13	Sí	Masculino
C12.2	0,265	C12.13	No	Masculino
C12.3	0,265	C12.13	No	Masculino
C12.4	0,265	C12.13	Sí	Masculino
C12.5	0,265	C12.13	No	Masculino

Fuente: Elaboración propia.

El Gráfico 3 presenta la visualización de la red que se configura a partir de las 290 palabras claves que aparecen en las publicaciones incluidas en el análisis. Para el procesamiento de la red mediante el software VOSViewer se fijó el tamaño mínimo de los clústeres en quince nodos –esto es, ~5% de los nodos de la red–, con el fin de asegurar cierta densidad temática de estos. Asimismo, se utilizó una resolución de 1.10, modificándose, así, el valor 1.0 que el software usa por defecto con el fin de afinar la precisión temática de los clústeres. De este modo, fue posible individualizar 29 clústeres.

Ahora bien, considerando los resultados anteriores que indican una muy baja densidad en la red de autores del campo de la biología sintética en Chile, es esperable una alta dispersión temática de las publicaciones. En este sentido, la mayor parte de estos 29 clústeres conformados a partir de las palabras clave de las 89 publicaciones analizadas carece de la amplitud necesaria para considerarse relevantes. En efecto, muchos de estos clústeres corresponden a conjuntos de palabras clave configurados a partir de solo dos o tres publicaciones.

En tales circunstancias, el análisis de los clústeres ha evidenciado que solo seis de ellos se pueden considerar suficientemente abarcadores como para asociarlos a líneas de investigación que vayan más allá de un par de publicaciones.

La Tabla 5 presenta el nombre asignado a estos clústeres, el color en el que son representados en el Gráfico 3, la cantidad de nodos que lo componen y sus nodos principales.

El primer clúster es el que mayor cantidad de nodos incluye, con un total de 70, lo cual lo convierte en la línea de investigación más importante del campo de la biología sintética en Chile. Se ha denominado bioproducción basada en biología sintética a esta línea, atendiendo a la aparición de nodos que refieren, entre otros, a la biofabricación, la biotecnología industrial de próxima generación y la agricultura celular.

El segundo clúster, compuesto por 27 nodos, guarda relación con el modelamiento y diseño de secuencias genéticas. Dentro de esta línea de investigación cobran relevancia el diseño apoyado por computadores, el modelamiento y las herramientas de automatización y la automatización del diseño genético.

El tercer clúster corresponde al diseño e ingeniería de rutas metabólicas en hongos. Un total de 26 nodos quedan incluidos en este clúster. De ellos, los más relevantes hacen referencia a la ingeniería metabólica, el diseño de rutas metabólicas y el análisis de tales rutas.

En el cuarto clúster, denominado actinomycetotas y protocélulas, los tópicos más relevantes, entre sus 23 nodos, se vinculan al problema de las células mínimas. Así, en esta

línea de trabajo son recurrentes conceptos como protocélula, funciones biológicas, cognición mínima, autonomía biológica, proto-metabolismo y membranas primitivas.

El quinto clúster, consistente en 17 nodos, se vincula a la dimensión social de la biología sintética, abarcando temáticas como sus implicancias éticas, legales y sociales, así como la confianza en estas tecnologías.

Mientras que el último de los clústeres considerados relevantes en el análisis guarda relación con los productos bioterapéuticos vivos, siendo centrales en él términos como bioterapia viva, probióticos, probióticos de próxima generación, prebióticos y sinbióticos.

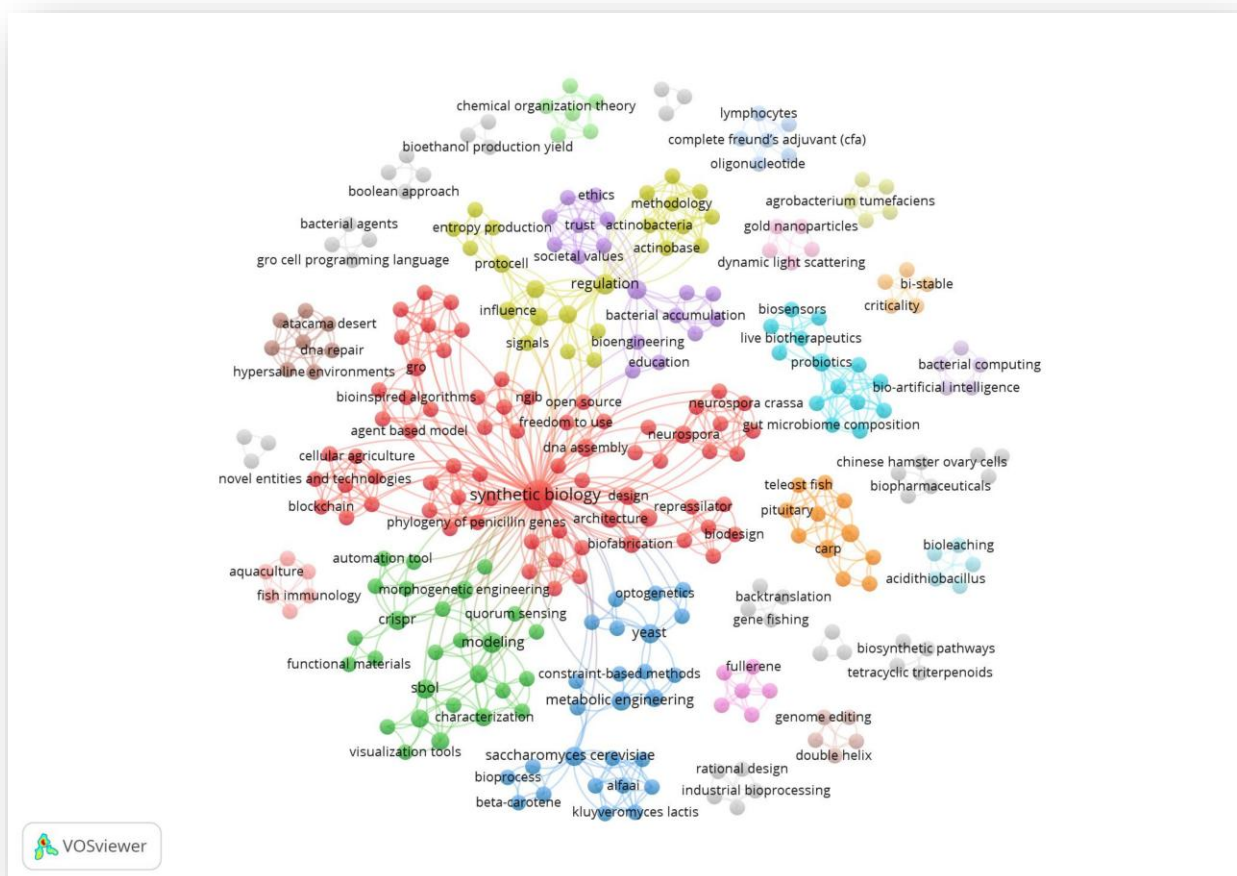


Gráfico 3. Red de palabras clave de publicaciones sobre biología sintética en Chile

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5*Nodos principales asociados a cada clúster*

Clúster	Color en figura	Nodos totales	Nodos principales*
Bioproducción basada en biología sintética	Rojo	70	Synthetic biology, dna assembly, design, architecture, biomaterial, biofabrication, cell-free protein synthesis, ngib (next generation industrial biotechnology), gro, cellular agriculture, global environmental benefits, sustainable development, antibiotic resistance, multidrug resistance.
Modelamiento y diseño de secuencias genéticas	Verde oscuro	27	Modeling, sbol, genetic network, morphogenetic engineering, genetic design automation, computer-aided design, data management, web application, crispr, genbank, automation tool, genetic assembly, genetic components.
Diseño e ingeniería de rutas metabólicas en hongos	Azul	26	Metabolic engineering, pathway design, pathway analysis, saccharomyces cerevisiae, yeast, optogenetics, optogenetic switch, fungal photoreceptor, cell communication, bioprocess.
Actinomycetotas y protocélulas	Amarillo	23	Regulation, protocell, biological functions, organisation, minimal cognition, biological autonomy, stability, proto-metabolism, primitive membranes, actinobacteria, actinobase, streptomyces, specialised metabolites.
Dimensión social de la biología sintética	Morado	17	Biotechnology, social aspects, ethics, values, trust, legal issues, society, societal values, education, industry, bioengineering, engineering, vaccine.
Productos bio-terapéuticos vivos	Celeste	14	Probiotics, live biotherapeutics, live bio-therapeutic products, synbiotics, biosensors, cross-feeding, engineered probiotics, gut microbiome, gut microbiome composition, inflammatory bowel disease, intestinal inflammation, microbial consortium, next-generation probiotics, prebiotics.

* Importancia evaluada en función de la frecuencia de aparición y relevancia temática del término.

Fuente: Elaboración propia.

En su conjunto, el contenido temático de estos seis clústeres revela el fuerte énfasis productivo que tiene el campo de la biología sintética en Chile. A este respecto, se aprecia que tanto el clúster 1 (*bioproducción basada en biología sintética*) y el 6 (*productos bio-terapéuticos vivos*) tienen una orientación considerable hacia la investigación aplicada destinada a la elaboración de distintos productos obtenidos mediante técnicas que involucran la biología sintética.

Ahora bien, también se aprecia un protagonismo no menor de las líneas de investigación de un carácter más básico y disciplinar. En este sentido, los clústeres 2 (*modelamiento y diseño*

de secuencias genéticas), 3 (*diseño e ingeniería de rutas metabólicas en hongos*) y 4 (*actinomycetotas y protocélulas*) están profundamente vinculados a problemas como optimizar el diseño de secuencias genéticas y rutas metabólicas, estudiar la interacción intercelular y avanzar en la comprensión de la célula mínima.

Asimismo, se aprecia una incipiente línea que aborda la interacción biología sintética-sociedad. De esto da cuenta el clúster 5 (*dimensión social de la biología sintética*), el cual apunta a los impactos sociales de la biología sintética, la confianza del público en sus tecnologías y sus implicancias éticas y legales.

CONCLUSIONES

El análisis del campo de la biología sintética en Chile mediante una combinación de estrategias de bibliometría y análisis de redes sociales devela una estructura emergente y con un alto grado de fragmentación. Esto se puede apreciar especialmente en el elevado número de componentes en la red de investigadores y la existencia de varios clústeres de palabras clave que abarcan muy pocos nodos.

De los once grupos de investigación más importantes identificados en el análisis, solo cinco son liderados por académicos afiliados a una institución chilena. Tales grupos constituyen los principales motores de la investigación en el área en el país. En estos componentes se aprecia, en general, una importante tendencia a la propincuidad, consistiendo, la mayoría de ellos en investigadores de una sola región y de pocas instituciones. Esta dinámica resulta concordante con lo observado por la investigación sobre redes sociales en general (Kadushin, 2012; Reagans, 2011; Rivera et al., 2010), y sobre redes científicas en particular (Akbaritabar et al., 2020; Badar et al., 2016; Hoffmann et al., 2016; Horta et al., 2022; Kaiser et al., 2023).

En paralelo, se han identificado seis líneas temáticas que presentan un nivel de desarrollo interesante. Estas corresponden a: (1) bioproducción basada en biología sintética, (2) modelamiento y diseño de secuencias genéticas, (3) diseño e ingeniería de rutas metabólicas en hongos, (4) actinomycetotas y protocélulas, (5) dimensión social de la biología sintética, y (6) productos bio-terapéuticos vivos.

La realidad del campo de la biología sintética en Chile mantiene grandes paralelos con el escenario descrito por trabajos que reportan el estado de la disciplina en otros países en vías de desarrollo. En efecto, al igual que lo reportado para Eslovaquia (Gasperek & Hantabal, 2022), República Checa (Juračka et al., 2022), Indonesia (Sanka et al., 2023), Argentina (Nadra et al., 2020) y Sudamérica (Gomez-Hinostroza et al., 2023), la investigación en biología sintética en Chile es liderada por grupos más bien acotados, afiliados a unas pocas instituciones, aunque con una importante vinculación con entidades extranjeras. El trabajo de estos grupos se concentra en unas cuantas líneas de investigación.

A pesar de que el campo en Chile presenta una mayor estabilidad que otros países de la región, como Argentina (Nadra et al., 2020), y ha logrado convertirse en un líder regional en biología sintética (Gomez-Hinostroza et al., 2023), aún existe una enorme brecha respecto a los países que han logrado consolidar la

investigación en el área. Entre tales diferencias resaltan las políticas científicas u hojas de ruta que promueven la expansión del campo (Pei et al., 2011; Wachter et al., 2022), las asociaciones nacionales o regionales de biología sintética (Donati et al., 2022; Krink et al., 2022; Pei et al., 2011; Wachter et al., 2022) y la presencia de múltiples grupos de investigación y el protagonismo destacado de un amplio número de instituciones (Donati et al., 2022; Pei et al., 2011; Wachter et al., 2022).

La investigación realizada demuestra que la combinación de las técnicas bibliométricas y el análisis de redes pueden contribuir significativamente a la comprensión de las características y el desarrollo de un campo científico emergente como la biología sintética. En efecto, este enfoque teórico-metodológico ha permitido develar el modo en el que se vinculan los investigadores pioneros en el campo, los clústeres de mayor importancia y aquellos que se han limitado a una incursión ocasional en el campo, los nodos que se encuentran en posiciones clave de la red, las características de los nodos que la articulan y las líneas de investigación que predominan en el campo a nivel local. De esta manera, la perspectiva empleada, incluso en un nivel descriptivo, entrega una mucho mejor visión de un campo científico emergente en un determinado territorio que los reportes de carácter narrativo usuales en el estudio de la constitución de la biología sintética en distintos países.

En un nivel aplicado, este estudio puede ofrecer a los diseñadores de políticas científicas una mirada valiosa respecto a cómo se ha ido configurando en el país un campo de vanguardia, que promete ser clave en los planos científico y productivo durante las próximas décadas. Al develar las dinámicas relacionales, fortalezas y brechas estructurales, y las temáticas predominantes de la biología sintética en Chile, esta investigación puede convertirse en un insumo para la toma de decisiones y el diseño estrategias para consolidar el desarrollo del campo a nivel nacional.

Ahora bien, es preciso indicar que esta aproximación analítica tiene limitaciones. En primer lugar, el comando de búsqueda utilizado siempre es perfectible, ya que podría dejar fuera algunos trabajos relacionados al campo que no hagan referencia a los conceptos incluidos. Además, al adoptar un enfoque nominalista, centrado únicamente en los vínculos de coautoría, el análisis puede perder de vista las relaciones que tienen lugar en el mundo real en otros espacios. Dado que las relaciones sociales y científicas son multidimensionales, es posible que existan relaciones entre investigadores del campo en modalidades diferentes a la coautoría

en publicaciones científicas (amistad, cooperación en actividades como organización de congresos o seminarios, formar parte del comité editorial de una revista, etc.). Asimismo, el análisis de redes con datos secundarios solo puede acceder a un limitado número de variables para la caracterización composicional de la red y es incapaz, por ejemplo, de develar los motivos que han llevado a los investigadores a colaborar con sus coautores.

REFERENCIAS

- Akbaritabar, A., Traag, V. A., Caimo, A., & Squazzoni, F. (2020).** Italian sociologists: A community of disconnected groups. *Scientometrics*, 124(3), 2361-2382. <https://doi.org/10.1007/s11192-020-03555-w>
- Badar, K., Frantz, T. L., & Jabeen, M. (2016).** Research performance and degree centrality in co-authorship networks: The moderating role of homophily. *Aslib Journal of Information Management*, 68(6), 756-771. <https://doi.org/10.1108/AJIM-07-2016-0103>
- Barabási, A., & Albert, R. (1999).** Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, 286(5439), 509-512. <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>
- Barabási, A., Jeong, H., Néda, Z., Ravasz, E., Schubert, A., & Vicsek, T. (2002).** Evolution of the social network of scientific collaborations. *Physica A*, 311, 590-614. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)00736-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)00736-7)
- Barboza-Pérez, U. E., Pérez-Zavala, M. D. L., & Barboza-Corona, J. E. (2025).** Synthetic biology in Mexico: Brief history, current landscape, and perspectives towards a bio-based economy. *Engineering Biology*, enb2.12037. <https://doi.org/10.1049/enb2.12037>
- Bhambere, A., & Hirve, S. (2022).** Overview of Social Network Analysis and Different Graph File Formats. En M. G. Galety, C. A. Atroshi, B. Balabantaray, & S. Mohanty (Eds.), *Social Network Analysis. Theory and Applications* (pp. 1-18). Wiley.
- Bourdieu, P. (1975).** The specificity of the scientific field and the social conditions of the progress of reason. *Social Science Information*, 14(6), 19-47. <https://doi.org/10.1177/053901847501400602>
- Cancino, R., García, M., Bustos, F., Coloma, J., & Orozco, L. (2023).** El análisis de redes sociales en los estudios de la ciencia, tecnología e innovación en América Latina. En F. Ortiz & A. Espinosa-Rada (Eds.), *Redes sociales: Teoría, métodos y aplicaciones en América Latina* (pp. 271-303). Centro de Investigaciones Sociológicas.
- Ceballos, H. G., Garza, S. E., & Cantu, F. J. (2018).** Factors influencing the formation of intra-institutional formal research groups: Group prediction from collaboration, organisational, and topical networks. *Scientometrics*, 114(1), 181-216. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2561-1>
- CEPAL, FAO, & IICA. (2017).** *La bioeconomía: Oportunidades y desafíos para el desarrollo rural, agrícola y agroindustrial en América Latina y el Caribe*. CEPAL/FAO/IICA.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018).** *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (5ta ed.). SAGE.
- Degn, L., Franssen, T., Sørensen, M. P., & De Rijcke, S. (2018).** Research groups as communities of practice—A case study of four high-performing research groups. *Higher Education*, 76(2), 231-246. <https://doi.org/10.1007/s10734-017-0205-2>
- Donati, S., Barbier, I., García-Soriano, D. A., Grasso, S., Handal-Marquez, P., Malcı, K., Marlow, L., Westmann, C., & Amara, A. (2022).** Synthetic biology in Europe: Current community landscape and future perspectives. *Biotechnology Notes*, 3, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2022.07.003>
- Edmonds, W. A., & Kennedy, T. D. (2017).** *An applied guide to research designs: Quantitative, qualitative, and mixed methods* (2da ed.). SAGE.
- Federici, F., Rudge, T., Pollak, B., Haseloff, J., & Gutiérrez, R. (2013).** Synthetic Biology: Opportunities for Chilean bioindustry and education. *Biological Research*, 46(4), 383-393. <https://doi.org/10.4067/S0716-97602013000400010>
- Freeman, R. B., & Huang, W. (2015).** Collaborating with People Like Me: Ethnic Coauthorship within the United States. *Journal of Labor Economics*, 33(S1), S289-S318. <https://doi.org/10.1086/678973>
- Gasperek, M., & Hantabal, J. (2022).** De novo synthesis of synthetic biology ecosystem in Slovakia: Challenges and opportunities. *Biotechnology Notes*, 3, 45-49. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2022.06.001>
- Gomez-Hinostroza, E. S., Gurdo, N., Alvan Vargas, M. V. G., Nikel, P. I., Guazzaroni, M.-E., Guaman, L. P., Castillo Cornejo, D. J., Platero, R., & Barba-Ostria, C. (2023).** Current landscape and future directions of synthetic biology in South America. *Frontiers in*

Bioengineering and Biotechnology, 11, 1069628. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1069628>

Hall, K. L., Vogel, A. L., Huang, G. C., Serrano, K. J., Rice, E. L., Tsakraklides, S. P., & Fiore, S. M. (2018). The science of team science: A review of the empirical evidence and research gaps on collaboration in science. *American Psychologist*, 73(4), 532-548. <https://doi.org/10.1037/amp0000319>

Haupt, J. P., & Lee, J. J. (2024). Scientific collaboration formation: Network mechanisms, bonding social capital, and particularized trust in US-China collaboration on COVID-19-related research. *Higher Education*, 87(6), 1921-1936. <https://doi.org/10.1007/s10734-023-01098-6>

Hoffmann, C. P., Lutz, C., & Meckel, M. (2016). A relational altmetric? Network centrality on ResearchGate as an indicator of scientific impact. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 67(4), 765-775. <https://doi.org/10.1002/asi.23423>

Holland, P. W., & Leinhardt, S. (1971). Transitivity in Structural Models of Small Groups. *Comparative Group Studies*, 2(2), 107-124. <https://doi.org/10.1177/104649647100200201>

Horta, H., Feng, S., & Santos, J. M. (2022). Homophily in higher education research: A perspective based on co-authorships. *Scientometrics*, 127(1), 523-543. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-04227-z>

Hu, X., & Rousseau, R. (2015). From a word to a world: The current situation in the interdisciplinary field of synthetic biology. *PeerJ*, 3, e728. <https://doi.org/10.7717/peerj.728>

Instituto Milenio de Biología Integrativa. (2024a). *Historia*. <https://www.ibio.cl/nosotros/quienes-somos/>

Instituto Milenio de Biología Integrativa. (2024b). *Líneas de investigación*. <https://www.ibio.cl/investigacion/lineas-de-investigacion/>

Inter-American Development Bank. (2017). *Tecnolatinas. Latin America riding the technology tsunami*. <https://publications.iadb.org/publications/english/viewer/Tecnolatinas-Latin-America-Riding-the-Technology-Tsunami.pdf>

Juračka, S., Hrnčířová, B., Burýšková, B., Georgiev, D., & Dvořák, P. (2022). Building the SynBio community in the Czech Republic from the bottom up: You get what you give. *Biotechnology Notes*, 3, 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2022.11.002>

Kadushin, C. (2012). *Understanding social networks: Theories, concepts, and findings*. Oxford University Press.

Kaiser, T., Tóth, T., & Demeter, M. (2023). Publishing Trends in Political Science: How Publishing Houses, Geographical Positions, and International Collaboration Shapes Academic Knowledge Production. *Publishing Research Quarterly*, 39(3), 201-218. <https://doi.org/10.1007/s12109-023-09957-x>

Keshava, R., Mitra, R., Gope, M., & Gope, R. (2018). Synthetic Biology. En D. Barh & V. Azevedo (Eds.), *Omics technologies and bioengineering. Towards improving quality of life* (pp. 63-93). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804659-3.00004-X>

Kim, K., Kogler, D. F., & Maliphol, S. (2024). Identifying interdisciplinary emergence in the science of science: Combination of network analysis and BERTopic. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1), 603. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03044-y>

Knoke, D., & Yang, S. (2020). *Social Network Analysis* (3ra ed.). SAGE.

Knorr-Cetina, K. (1996). ¿Comunidades científicas o arenas transepistémicas de investigación? Una crítica de los modelos cuasi-económicos de la ciencia. *REDES*, 3(7), Article 7.

Kossinets, G., & Watts, D. J. (2009). Origins of Homophily in an Evolving Social Network. *American Journal of Sociology*, 115(2), 405-450. <https://doi.org/10.1086/599247>

Kreimer, P. (2023). Techno-Scientific Promises, Disciplinary Fields, and Social Issues in Peripheral Contexts. *Science as Culture*, 32(1), 83-108. <https://doi.org/10.1080/09505431.2022.2101918>

Kreimer, P., & Vessuri, H. (2018). Latin American science, technology, and society: A historical and reflexive approach. *Tapuya: Latin American Science, Technology and Society*, 1(1), 17-37. <https://doi.org/10.1080/25729861.2017.1368622>

Krink, N., Löchner, A., Cooper, H., Beisel, C., & Di Ventura, B. (2022). Synthetic biology landscape and community in Germany. *Biotechnology Notes*, 3, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2021.12.001>

Kuhn, T. (2013). *La estructura de las revoluciones científicas* (4ta ed.). Fondo de Cultura Económica.

Lee, S. S.-J., & Jabloner, A. (2017). Institutional culture is the key to team science. *Nature Biotechnology*, 35(12), 1212-1214. <https://doi.org/10.1038/nbt.4026>

Locatelli, B., Vallet, A., Tassin, J., Gautier, D., Chamaret, A., & Sist, P. (2021). Collective and individual interdisciplinarity in a sustainability research group: A social network analysis. *Sustainability Science*, 16(1), 37-52. <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00860-4>

Love, H. B., Cross, J. E., Fosdick, B., Crooks, K. R., VandeWoude, S., & Fisher, E. R. (2021). Interpersonal relationships drive successful team science: An exemplary case-based study. *Humanities and Social Sciences Communications*, 8(1), 106. <https://doi.org/10.1057/s41599-021-00789-8>

Lu, Y. (2020). *Cell-Free Synthetic Biology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1171-0>

Ma, X., & Huang, T. (2024). Proximity still matters in research collaboration! Evidence from the introduction of new airline routes and high-speed railways in China. *Scientometrics*, 129(4), 2227-2253. <https://doi.org/10.1007/s11192-023-04910-3>

Marin, A., & Wellman, B. (2011). Social Network Analysis: An Introduction. En J. Scott & P. Carrington (Eds.), *The SAGE Handbook of Social Network Analysis* (pp. 11-25). SAGE.

McPherson, M., Smith-Lovin, L., & Cook, J. M. (2001). Birds of a Feather: Homophily in Social Networks. *Annual Review of Sociology*, 27(1), 415-444. <https://doi.org/10.1146/annurev.soc.27.1.415>

Merton, R. (2002). *Teoría y estructuras sociales* (4ta ed.). Fondo de Cultura Económica.

Nadra, A., Rodríguez, P., Grunberg, R., Olalde, L., & Sánchez, I. (2020). Developing synthetic biology in Argentina: The Latin American TECNOx community as an alternative way for growth of the field. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40(3), 357-364. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1712322>

Naheem, K., & Sivaraman, P. (2022). Authorship Pattern and Research Collaboration in the Field of Synthetic Biology. *Qualitative and Quantitative Methods in Libraries*, 11(4), 647-668.

Naheem, K., Sivaraman, P., & Saravanan, G. (2022). A Scientometric Analysis of Global Synthetic Biology Literature. *Qualitative and Quantitative Methods in Libraries*, 11(3), 455-471.

Neuman, W. L. (2014). *Social Research Methods: Qualitative and Quantitative Approaches* (7ma ed.). Pearson Education.

Newman, M. E. J. (2001a). Scientific collaboration networks. I. Network construction and fundamental results. *Physical Review E*, 64(1), 016131. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.016131>

Newman, M. E. J. (2001b). Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality. *Physical Review E*, 64(1), 016132. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.016132>

Núcleo Milenio de Biología Sintética. (2017). *Nuestro objetivo*. <http://www.genomicavegetal.cl/>

Oldham, P., & Hall, S. (2018). *Synthetic Biology—Mapping the Patent Landscape*. <https://doi.org/10.1101/483826>

Oldham, P., Hall, S., & Burton, G. (2012). Synthetic Biology: Mapping the Scientific Landscape. *PLoS ONE*, 7(4), e34368. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034368>

Papadopoulos, F., Kitsak, M., Serrano, M. Á., Boguñá, M., & Krioukov, D. (2012). Popularity versus similarity in growing networks. *Nature*, 489(7417), 537-540. <https://doi.org/10.1038/nature11459>

Parker, M., & Kingori, P. (2016). Good and Bad Research Collaborations: Researchers' Views on Science and Ethics in Global Health Research. *PLoS ONE*, 11(10), e0163579. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163579>

Pei, L., Schmidt, M., & Wei, W. (2011). Synthetic biology: An emerging research field in China. *Biotechnology Advances*, 29(6), 804-814. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.06.008>

Price, D. (1963). *Little Science, Big Science*. Columbia University Press.

Reagans, R. (2011). Close Encounters: Analyzing How Social Similarity and Proximity Contribute to Strong Network Connections. *Organization Science*, 22(4), 835-849. <https://doi.org/10.1287/orsc.1100.0587>

Rivera, M. T., Soderstrom, S. B., & Uzzi, B. (2010). Dynamics of Dyads in Social Networks: Assortative, Relational, and Proximity Mechanisms. *Annual Review of Sociology*, 36(1), 91-115. <https://doi.org/10.1146/annurev.soc.34.040507.134743>

Robins, G. (2015). *Doing Social Network Research: Network-based Research Design for Social Scientists*. SAGE.

Sanka, I., Kusuma, A. B., Martha, F., Hendrawan, A., Pramanda, I. T., Wicaksono, A., Jati, A. P., Mazaya, M., Dwijayanti, A., Izzati, N., Maulana, M. F., & Widyaningrum, A. R. (2023). Synthetic biology in Indonesia: Potential and projection in a country with mega biodiversity. *Biotechnology Notes*, 4, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2023.02.002>

Scott, J. (2017). *Social network analysis* (4ta ed.). SAGE.

Shapira, P., Kwon, S., & Youtie, J. (2017). Tracking the emergence of synthetic biology. *Scientometrics*, 112(3), 1439-1469. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2452-5>

Tu, J. (2019). What connections lead to good scientific performance? *Scientometrics*, 118(2), 587-604. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-02997-7>

Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), Article 2. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>

Voigt, C. (2020). Synthetic biology 2020–2030: Six commercially-available products that are changing our world. *Nature Communications*, 11(1), 6379. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20122-2>

Wachter, G. K. A., Gallup, O., Bayne, J., & Horsfall, L. (2022). Synthetic biology

landscape in the UK. *Biotechnology Notes*, 3, 70-74.

<https://doi.org/10.1016/j.biotno.2022.07.002>

Waltman, L., Van Eck, N. J., & Noyons, E. C. M. (2010). A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of Informetrics*, 4(4), 629-635. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.07.002>

Whittington, K., King, M. M., & Cingolani, I. (2024). Structure, status, and span: Gender differences in co-authorship networks across 16 region-subject pairs (2009–2013). *Scientometrics*, 129(1), 147-179. <https://doi.org/10.1007/s11192-023-04885-1>

Xie, C., Liu, C., Liu, D., & Jim, C. Y. (2024). Charting the Research Terrain for Large Old Trees: Findings from a Quantitative Bibliometric Examination in the Twenty-First Century. *Forests*, 15(2), 373. <https://doi.org/10.3390/f15020373>

Zhang, C., Bu, Y., Ding, Y., & Xu, J. (2018). Understanding scientific collaboration: Homophily, transitivity, and preferential attachment. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 69(1), 72-86. <https://doi.org/10.1002/asi.23916>

Remitido: 28-01-2025

Corregido: 24-03-2025

Aceptado: 24-04-2025



© Los autores