

Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Xochimilco

Maestría en Economía, Gestión y Políticas de Innovación

# **Evolución de las redes de colaboración presentes en el sector biomédico**

Alumno: Ignacio Alain Andrade Avalos

Director de ICR: Marco Aurelio Jaso Sánchez

Reporte de investigación (24-11-2020)

## Contenido

1.	Introducción .....	4
1.1.	Objetivo general .....	9
1.2.	Objetivos específicos.....	9
1.2.	Pregunta de investigación.....	9
1.3.	Supuestos.....	9
2.	Marco contextual.....	11
2.1.	Definición de Ingeniería Biomédica.....	11
2.2.	Antecedentes de la ingeniería biomédica .....	12
2.2.1.	La ingeniería biomédica como disciplina .....	15
2.2.2.	Ingeniería biomédica en México.....	15
2.3.	Actualidad de la ingeniería biomédica .....	16
2.3.1.	Definición de Dispositivos Médicos .....	16
2.3.2.	Regulación de Dispositivos Médicos .....	17
2.3.3.	El sector biomédico en México.....	20
3.	Marco teórico .....	29
3.1.	Análisis de Redes .....	29
3.1.1.	Definición de Red .....	31
3.1.2.	Redes de Colaboración Científica.....	34
3.1.3.	Generación de Fortalezas .....	39
3.1.4.	Capacidades del Sector Biomédico.....	41
3.2.	Capital Social.....	44
3.3.	Teoría de Recursos y Capacidades.....	48
3.3.1.	Recursos .....	48
3.3.2.	Capacidades .....	50

3.3.3.	Combinaciones de Recursos de Red .....	55
4.	Metodología .....	59
4.1.	Diseño de la metodología .....	60
4.1.1.	Revisión de literatura .....	61
4.1.2.	Sistematización de la información .....	62
4.1.3.	Análisis de la información .....	64
4.2.	Principales resultados esperados .....	67
5.	Determinación de tecnologías relevantes en la Ingeniería Biomédica.....	67
5.1.	Campos de conocimiento presentes por periodo de tiempo .....	69
5.1.1.	Periodo 2000-2004 .....	69
5.1.2.	Periodo 2005-2009 .....	70
5.1.3.	Periodo 2010-2014 .....	71
5.1.4.	Periodo 2015-2019 .....	72
5.2.	Evolución de los campos de conocimiento y tecnologías .....	73
6.	Evolución de las Redes de Colaboración del sector biomédico en México.....	75
6.1.	Periodo inicial (entre los años 2000 y 2004).....	78
6.2.	Periodo de crecimiento de clústeres (entre los años 2005 y 2009).....	80
6.3.	Periodo de la Red de Colaboración y diversificación de tecnologías (entre los años 2010 y 2014) .....	82
6.4.	Periodo de madurez de tecnologías presentes en el sector (entre los años 2015 y 2019) 84	
6.5.	Continuidad en los grupos de investigación presentes en las redes de colaboración 88	
7.	Análisis de competencias de las redes de colaboración .....	91
7.1.	Dinámica de la productividad académica.....	92
7.1.1.	Producción por autor .....	93

7.2.	Análisis de las organizaciones.....	94
7.3.	Evolución temporal de la publicación de artículos científicos.....	97
7.4.	Identificación de convergencias y brechas con respecto a los países líderes del sector 99	
8.	Conclusiones .....	104
8.1.	Principales lecciones .....	109
9.	Bibliografía .....	113

## 1. Introducción

El análisis de la evolución de las redes de colaboración presentes en el sector biomédico en México permite reconocer y explicar campos de conocimiento y tecnologías que se encuentran en desarrollo por los grupos de investigación especializados, tanto industriales como científicos y académicos. Estas tecnologías en desarrollo son analizadas en este trabajo principalmente sobre dispositivos médicos, que como se definirá posteriormente, son cruciales en la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades, así como en la rehabilitación de un paciente (WHO, 2017). Aunado a esto, el análisis de la evolución de redes de colaboración contribuye a la detección de brechas en términos de la posición competitiva entre el sector, así como también permite ubicar áreas de oportunidad para capitalizar recursos existentes y nichos de mercado.

El sector al cual se dirige esta investigación es el biomédico, en el cual se aplican diferentes disciplinas que en conjunto ayudan a comprender, modificar o controlar los sistemas biológicos (Bronzino, 2005). Así, los ingenieros biomédicos aplican metodologías y tecnologías de las ciencias físicas y la ingeniería, como la eléctrica, química, óptica y mecánica, entre muchos otros campos de conocimiento, al problema de los sistemas vivos con énfasis en el diagnóstico, tratamiento y prevención de enfermedades en el ser humano (Sawhney, 2007). El énfasis de esta investigación se verá en la aplicación de tecnologías en seres humanos y los campos de conocimiento se encuentran estrechamente ligados con la medicina, sin llegar a considerar los campos exclusivos de los fármacos y biológicos aplicados a la agroindustria.

Los dispositivos médicos son diferentes de otros bienes o productos de consumo. Estos desempeñan un papel importante y son parte integral de la prestación de atención médica. Según la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2017), los dispositivos médicos en particular son cruciales en la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades, así como en la rehabilitación de los pacientes. La tecnología moderna está contribuyendo fuertemente a la producción de varios tipos de dispositivos médicos a un ritmo tan acelerado que el dispositivo más reciente se vuelve obsoleto en poco tiempo (WHO, 2010), por esta razón, las organizaciones que desarrollan este tipo de dispositivos deben mantenerse a la

vanguardia en términos de tecnología si es que quieren mantenerse vigentes y con una posición competitiva en el sector en el que se desenvuelven.

El análisis de tendencias tecnológicas, como herramienta, toma un papel crucial ante la necesidad de nuevas tecnologías que soporten el desarrollo de dispositivos médicos para la prestación médica. Esta herramienta funge como vínculo entre estas nuevas tecnologías y el desarrollo social (Loveridge & Cagnin, 2016). Así mismo, en el sector de ingeniería biomédica se presentan tecnologías dominantes claras y de las cuáles se han establecido estándares. El desarrollo de estas tecnologías sigue siendo rápido, pero este desarrollo aún sigue representando un efecto más enfocado al incremento de la innovación incremental, más que radical (Narula, 2004).

Las tecnologías para la salud son esenciales para un sistema de salud en funcionamiento. Estas son definidas por la Organización Mundial de la Salud (2017) como:

“La aplicación de conocimientos y habilidades organizadas en forma de dispositivos, medicamentos, vacunas, procedimientos y sistemas desarrollados para resolver un problema de salud y mejorar la calidad de vida” (WHO, 2017, pág. 6)

Los desafíos mundiales de salud se están volviendo cada vez más complejos con la dupla de los brotes de enfermedades infecciosas y la carga global de las enfermedades no transmisibles, especialmente en los países de ingresos bajos y medios (WHO, 2017). Para proporcionar servicios de atención médica de calidad, asequibles y apropiados, se necesitan sistemas de atención médica resilientes que incluyan personal de salud capacitado, sistemas de información, mecanismos de financiamiento, infraestructura, medicamentos y tecnologías.

Debido a estas necesidades, es necesario que las tecnologías para la salud sean desarrolladas de manera que sean asequibles y apropiadas a los mercados, estas tecnologías incluyen a los dispositivos médicos, ya que estos son diferentes de otros bienes o productos de consumo. Desempeñan un papel importante y son parte integral de la prestación de atención médica. La Organización Mundial de la Salud define un dispositivo médico como un artículo, instrumento, aparato o máquina que se utiliza en la prevención, diagnóstico o tratamiento de enfermedades o enfermedades, o para detectar, medir, restaurar, corregir o modificar la estructura o función del cuerpo para algún propósito de salud. Por lo general, el propósito de

un dispositivo médico no se logra por medios farmacológicos, inmunológicos o metabólicos (WHO, 2017, pág. 6).

Estas mismas necesidades requieren de soluciones integrales y multidisciplinarias. Un informe del Instituto de Tecnología de Massachusetts señala que las ciencias en física ya se han transformado con la adopción de tecnología de la información y comunicación (TIC), materiales avanzados, imágenes, nanotecnología y modelado y simulación sofisticados. Tal como cita Laal (2012), Michael A. De Miranda clasifica las mayores innovaciones médicas en 3 grupos, que son los dispositivos, tecnología y medicamentos. En apartados siguientes se profundizará en estas definiciones.

Así, los dispositivos médicos involucran todo tipo de tecnología física y formas de energía. Los dispositivos pueden ser simples (por ejemplo, termómetro, anteojos) o complejos (por ejemplo, tomografías computarizadas, rayos X). En general, los dispositivos médicos se dividen en dos categorías: Primera, dispositivos que diagnostican o detectan el cuerpo (medición y prueba, monitoreo e imagen). Segundo, dispositivos que diagnostican o detectan elementos del cuerpo o se utilizan con fines terapéuticos (restauradores, preventivos y protésicos) (De Miranda, Doggett, & Evans, 2005).

Dado que la tecnología es el motor que impulsa las economías más exitosas de las sociedades desarrolladas, diversos autores coinciden que es probable que la innovación tecnológica se caracterice por procesos de autoorganización en las empresas y otros actores innovadores presentes en una organización (Rycroft & Kash, 2004). Sin embargo, la evidencia de autoorganización es más evidente no en la evolución de empresas particulares, universidades o agencias gubernamentales, sino en el crecimiento de actividades de colaboración interorganizacionales (por ejemplo, empresas conjuntas, consorcios, alianzas estratégicas) que caracterizan cada vez más sectores tecnológicos más complejos y valiosos como la bioingeniería, la aviación o los equipos de telecomunicaciones (Rycroft & Kash, 2004). Y es precisamente el análisis de este fenómeno, lo que nos lleva a la valoración de la teoría de redes sociales como un enfoque teórico y metodológico adecuado para explorar la colaboración tecnológica en este sector.

Teniendo en cuenta un efecto de la tecnología en un plano social, la teoría de las redes sociales puede proporcionar una respuesta ante este comportamiento, dado que esta teoría

resuelve un conflicto de orden social general: cómo los individuos autónomos pueden combinarse para crear sociedades duraderas y funcionales. Según Borgatti, Mehra y Labianca (2009), la teoría de redes también proporciona explicaciones para una problemática más específica de igual orden social, desde la creatividad individual hasta la rentabilidad corporativa, lo que puede suponerse como un efecto positivo en la generación de tecnología biomédica.

Uzzi (1997), a través de Tolstoy y Agndal (2010), argumenta que el tipo y la calidad de las relaciones entre organizaciones dan forma a la red y definen qué recursos están disponibles, así como si las organizaciones pueden aprovechar estas oportunidades. La relación entre la organización y la red es, entonces, dialéctica en el sentido de que las innovaciones generadas en la organización contribuyen a dar forma a la estructura de la red (Tolstoy & Agndal, 2010). De la misma manera, Rycroft y Kash (2004) destacan que hay al menos dos niveles en los que las redes de innovación parecen ser importantes. Primero, el análisis de red puede definirse en términos de cada alianza estratégica, este es el caso si las conexiones de red directas (por ejemplo, alianzas específicas, intercambio de información, cooperación en investigación, *joint ventures*, etc.) son el punto más importante. Segundo, el análisis puede enfatizar un conjunto o grupo de colaboración. Así, todo el conjunto de actividades de colaboración se convierte en la red (Rycroft & Kash, 2004).

El enfoque de red analiza relaciones específicas y bien seleccionadas en el proceso de innovación entre actores específicos tanto en la región como más allá. Destaca los motivos para participar en colaboraciones tales como acceso a recursos y conocimiento específico, y enfatiza el papel de la confianza y el capital social para el desarrollo de redes (Tödtling, Lehner, & Kaufmann, 2009). En este sentido, la colaboración adquiere relevancia dado que los investigadores adquieren recursos a través de la red. Pero la colaboración no se da de forma espontánea, dado que los investigadores comparten un objetivo común, siendo este el de producir nuevos conocimientos científicos (Katz & Martin, 1997). Una manera para medir esta actividad colaborativa es mediante las coautorías dadas por publicaciones científicas de acuerdo con diversos investigadores respaldan esta idea (Balog, 1979; Beaver & Rosen, 1979; Hodder, 1979; Lawani, 1986; Pao, 1980; De Solla Price, 1963, 1966). Incluso exponen que una alta producción de artículos científicos se relaciona directamente con una actividad colaborativa alta en la red.



Según Barabási, entre otros autores, varios factores han contribuido a destacar la red de colaboración como un caso de estudio. Se destaca primero que se requiere de una red para la cual la evolución dinámica esté explícitamente disponible. Es decir, además de un mapa de la topología de la red, es importante saber el momento en que los nodos y enlaces se han agregado a la red, crucial para revelar la dinámica de la red. Así, Barabási (2002) destaca que este requisito reduce las bases de datos disponibles actualmente a dos sistemas: la red de actores, donde podemos seguir la dinámica registrando el momento del surgimiento de una tecnología, y la red de colaboración para la cual el momento del surgimiento nos permite rastrear la evolución con tiempo.

Una parte fundamental de las redes es el vínculo social. Koput (2010) sostiene que estos vínculos sociales forman una estructura social, que, a su vez, dan lugar al capital social debido a las relaciones entre actores sociales. James Coleman (1988) argumenta que el capital social es productivo, posibilitando la consecución de ciertos fines que en su ausencia no serían posibles. Con esto se deduce que el capital social es inherente a la estructura de las relaciones entre actores y es una característica que permite intercambiar información, reconocer recursos y combinarlos, para así mejorar la productividad de la red.

Estos recursos, siendo heterogéneos y estando distribuidos a lo largo de la estructura de la red, pueden generar diferentes tipos de creación de valor para la organización, así como también pueden generar diferentes tipos de tecnología mediante la colaboración individual u organizacional. Entonces, de acuerdo con Breschi, Lissone y Montobbio (2005) La producción científica se encuentra relacionada positivamente como resultado de un "efecto" de estos recursos.

El concepto de capital social, en esta investigación, es de suma importancia debido a que explica por qué ciertos actores muestran capacidades, especialmente de absorción de conocimiento visto como un recurso, capacidad que Cohen y Levinthal (1990) definieron como la capacidad de una organización para reconocer el valor de la información como un recurso nuevo y externo, asimilarlo y aplicarlo con fines comerciales. Que, a diferencia de la visión económica de estos autores, la productividad en este trabajo es medida con respecto a la producción científica de la red de colaboración.

Siguiendo dichas consideraciones, y buscando estudiar la dinámica nacional en este sector, se plantean los siguientes objetivos y preguntas para conducir la investigación.

### **1.1. Objetivo general**

Analizar la evolución de las redes de colaboración en los campos de conocimiento presentes en los grupos de investigación biomédica en México.

### **1.2. Objetivos específicos**

1. Identificar los grupos de investigación y sus posibles redes de colaboración a partir de una revisión bibliográfica con la finalidad de ubicar los campos de conocimiento del sector biomédico en México.
2. Realizar una descripción de la evolución de la red de colaboración a partir del año 2000 hasta el año 2019.
3. Determinar la posición de los campos de conocimiento de las redes mexicanas en el contexto internacional para valorar su nivel de actualidad.

De acuerdo con las condiciones presentes en el sector biomédico y tomando en consideración la revisión bibliográfica y de literatura, este trabajo plantea la siguiente interrogante para su investigación:

### **1.2. Pregunta de investigación**

¿Cómo han evolucionado las redes de colaboración y los campos de conocimiento de los grupos de investigación presentes en el sector biomédico en México?

### **1.3. Supuestos**

La percepción sugerida en este trabajo es que las redes de colaboración y las competencias que éstas presentan tienen un impacto significativo en los campos de conocimiento presentes en el sector biomédico en México. Inclusive, estas redes de colaboración son dinámicas y tienden a evolucionar, este efecto contribuye a la especialización de los grupos de investigación, así como el cambio en los recursos presentes en esta red.

Para atender estas interrogantes, la herramienta metodológica empleada es la bibliometría. Se escogió esta herramienta debido a que permite medir las coautorías (vínculos en la red) así como detecta a los investigadores (actores de la red) que se encuentran inmersos en la comunidad científica mexicana. Este análisis bibliométrico de las redes de colaboración ayuda a identificar la relación existente entre la colaboración y el crecimiento de la producción científica a través del paso del tiempo; además de que permite delimitar esta comunidad conforme al sector biomédico, siendo este el objeto de estudio. La metodología se presenta en tres partes principales, donde se realiza una revisión de la literatura identificando las bases de datos y se generan los criterios de búsqueda; se procede con la sistematización de la información donde se clasifica la base de datos en periodos de tiempo y se generan las redes de colaboración; para finalmente analizar la información obtenida, se detectan las tecnologías y campos de conocimiento presentes en el sector, se identifican comportamientos que destacan en la red como la alta producción de ciertos investigadores y la continuidad de los grupos de colaboración, así como se analiza la evolución de las redes por periodo de tiempo.

Este trabajo de investigación se compone de cinco partes principales. La primera presenta la definición del sector que se está estudiando, siendo éste el sector biomédico, se presenta antecedentes y la actualidad de manera breve para contextualizar los resultados que se obtuvieron en la investigación; como segundo apartado se tienen los fundamentos teóricos en los que este trabajo se fundamenta y mantiene como base, en los cuales se explica la teoría de redes, el capital social y la teoría de recursos y capacidades; posteriormente se presentan los resultados obtenidos, los cuales están divididos en tres secciones diferentes: primero se presentan las tecnologías y campos de conocimiento detectados por periodo de tiempo, continua en un segundo apartado destacando la evolución de las redes de colaboración del sector, y como un tercer apartado se analizan las competencias de las redes de colaboración. Finalmente se realizan las conclusiones donde se contrastan los resultados obtenidos con los objetivos y la pregunta de investigación presentados inicialmente en el trabajo, así como también se presentan los alcances y limitaciones detectados mediante los fundamentos teóricos dispuestos y las herramientas metodológicas empleadas para la obtención de resultados.

## **2. Marco contextual**

### **2.1. Definición de Ingeniería Biomédica**

Para definir la ingeniería biomédica como campo de conocimiento es pertinente comenzar con la definición y delimitación del alcance de ésta, debido a que abarca varias tecnologías o métodos de investigación diferentes y varios sectores aplicación. La ingeniería biomédica es parte de la biotecnología, la cual, según la OECD en su definición más amplia, es a aplicación de la ciencia y la tecnología a los organismos vivos, así como a sus partes, productos y modelos, para alterar materiales vivos o no vivos para la producción de conocimiento, bienes y servicios (OECD, 2005). Esta definición incluye no sólo la aplicación en seres humanos sino considera también a animales y plantas.

Partiendo de este concepto y sólo tomando en consideración al ser humano, es que podemos definir la ingeniería biomédica, la cual tiene como unión las disciplinas de la medicina y la ingeniería. Ésta tiene como objetivo aplicar las metodologías y tecnologías de las ciencias físicas y la ingeniería al problema de los sistemas vivos con énfasis en el diagnóstico, tratamiento y prevención de enfermedades en el ser humano (Sawhney, 2007). Sin embargo, según Bronzino, quien considera un concepto más completo, los ingenieros biomédicos aplican principios de ingeniería eléctrica, química, óptica y mecánica, entre muchos otros campos de conocimiento, para comprender, modificar o controlar los sistemas biológicos (Bronzino, 2005).

En la práctica, la ingeniería biomédica distingue a tres roles específicos que los ingenieros biomédicos pueden desempeñar que son definidos por Bronzino (2005):

#### **I. El ingeniero clínico en el cuidado de la salud**

El primer tipo que bien podría llamarse el "solucionador de problemas". Este ingeniero biomédico mantiene una relación tradicional con los científicos biológicos y es de suma necesidad que muestre capacidades, de aprendizaje, absorción y difusión de conocimiento (conceptos que se desarrollarán teóricamente en un apartado posterior en este documento) (Bronzino, 2005).

#### **II. El ingeniero de diseño biomédico para la industria**

Este segundo tipo, es llamado por Bronzino como "emprendedor tecnológico" debido a que asume la responsabilidad de cerrar la brecha entre la educación tecnológica del científico o médico y las tecnologías actuales presentes en el mercado. Por lo tanto, son capaces de identificar las áreas en las que la tecnología más avanzada podría ser ventajosa (Bronzino, 2005).

### III. El científico investigador.

Esta investigación se centra en analizar la actividad científica principalmente de este tipo de ingeniero biomédico, que en su mayoría se encuentra en instituciones académicas y laboratorios de investigación, está principalmente interesado en aplicar conceptos y técnicas de ingeniería a la investigación y exploración de procesos biológicos (Bronzino, 2005). Al igual que el primer tipo, el científico investigador debe mostrar capacidades de aprendizaje, absorción y difusión de conocimiento.

## **2.2. Antecedentes de la ingeniería biomédica**

Como un componente crucial de la atención médica, los dispositivos médicos serán más efectivos cuando se consideren en el contexto más amplio del paquete completo de atención médica necesario para abordar las necesidades de salud pública: prevención, atención clínica (investigación, diagnóstico, tratamiento y manejo, seguimiento y rehabilitación) y acceso a la atención médica adecuada. Por lo tanto, en lugar de centrarse solo en los problemas tecnológicos relacionados con los dispositivos médicos, es necesario enmarcar los dispositivos médicos de otra manera (WHO, 2010).

No fue sino hasta el siglo XIX que los médicos utilizaron cada vez más máquinas para el diagnóstico o la terapéutica. La química también comenzó a desempeñar un papel importante y se utilizó cada vez más en los siglos XVIII y XIX para diagnosticar padecimientos como diabetes, anemia, difteria y sífilis. La medicina cambió lentamente del uso de evidencia subjetiva provista por el paciente a evidencia objetiva obtenida por dispositivos de tecnología mecánica y química (De Miranda, Doggett, & Evans, 2005). Algunos de los primeros avances en tecnología médica fueron el termómetro, el estetoscopio, el microscopio, el oftalmoscopio, el laringoscopio y los rayos X. Estos dispositivos le permitieron al médico escuchar y ver partes del cuerpo que previamente se habían observado solo en cadáveres. En

general, el resultado del uso del dispositivo médico es considerado como el primer diagnóstico médico que adquiere información sobre los pulmones y los latidos del corazón de los pacientes. Sin embargo, los escépticos inicialmente desafiaron su mérito y efectividad. El uso de electricidad resultó en la invención de los rayos X. Roentgen, profesor de física en Baviera, descubrió por accidente una radiación que podía penetrar objetos sólidos de baja densidad. También descubrió que estos fenómenos podían verse en una pantalla fluorescente y almacenarse en una película fotográfica. La invención de los rayos X permitió a los médicos ver el interior del cuerpo sin cirugía. La medicina fue revolucionada en el siglo XIX y más allá por los avances en la química y las técnicas y equipos de laboratorio, las viejas ideas de epidemiología de enfermedades infecciosas fueron reemplazadas por bacteriología y virología (Laal, 2012).

Los avances en la tecnología médica se aceleraron a principios del siglo XX gracias a las mejoras en la ciencia básica y la intensa fertilización cruzada de los descubrimientos científicos y tecnológicos, como las técnicas de medición eléctrica, el desarrollo de sensores, la medicina nuclear y el ultrasonido de diagnóstico (De Miranda, Doggett, & Evans, 2005).

Uno de los mayores logros en la historia médica de los dispositivos fue la invención del corazón artificial. En 1964, el Instituto Nacional del Corazón, los Pulmones y la Sangre de los Estados Unidos, comenzó a patrocinar el desarrollo de dispositivos mecánicos para el soporte circulatorio a corto y largo plazo, incluido un corazón artificial total. Así, posteriormente en la década de 1980 marcó la primera implantación de un corazón artificial total neumático (Jarvik-7-100) por DeVries. Luego, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA), de este mismo país, aprobó el uso de un dispositivo de asistencia ventricular izquierda con una fuente de energía externa como puente para el trasplante en 1994 (Goldstein, Oz, & Rose, 1998).

Otro dispositivo, el catéter robótico, está diseñado para mejorar la capacidad de un médico para realizar operaciones complejas utilizando un pequeño tubo flexible llamado catéter. De acuerdo con Laal (2012), se puede usar un catéter robótico en varios sistemas, incluso para cirugía cardíaca y urología, para ayudar en los procedimientos en los que las manos no puedan llegar. Además de esto, cuando necesitamos inyectar un medicamento o algún otro líquido en el hueso, un taladro de inyector de hueso es la forma de hacerlo. La colocación de

una aguja intraósea (IO) proporciona una ruta para administrar líquidos, sangre y medicamentos. La máquina de riñón artificial o máquina de diálisis ha ayudado a muchos a esperar el trasplante de riñón. La diálisis ayuda a eliminar las toxinas del cuerpo, tal como se supone que deben hacerlo los riñones (Laal, 2012).

Laal muestra un reporte del Instituto de Tecnología de Massachusetts donde se discute la importancia de la evolución de las ciencias físicas y como han adoptado nuevas tecnologías de la información y comunicación (TICs), materiales avanzados, imágenes, nanotecnología y modelado y simulación sofisticados (Laal, 2012). En este reporte, Michael A. De Miranda clasifica las mayores innovaciones médicas en 3 grupos de la siguiente manera:

- Dispositivos: existen varios dispositivos médicos interesantes que contribuyen a tratar diferentes afecciones y enfermedades.
- Tecnología: los avances en tecnología médica nos permiten tener acceso a varias ventajas que ayudan a aumentar la capacidad de diagnosticar y tratar afecciones.
- Medicamentos: es importante tener en cuenta que algunas de las mejores innovaciones médicas han estado en el área de tratamientos y terapias con medicamentos (Laal, 2012).

La investigación en innovación biomédica y sanitaria ha avanzado rápidamente desde los primeros descubrimientos biotecnológicos de mediados de los años setenta, del siglo XX. Ha generado conocimiento, herramientas y técnicas que han mejorado enormemente el proceso de investigación de medicamentos. A pesar de los enormes avances en el conocimiento y la tecnología, muchos desarrollos siguen siendo "emergentes" en el sentido de que aún no se han traducido o integrado completamente en los sistemas de salud y la práctica médica (OECD, 2013).

Existen muchos avances tecnológicos que convergen entre sí, además, el ritmo de la innovación en dispositivos médicos se está acelerando, generando mejores resultados clínicos con procedimientos menos invasivos y tiempos de recuperación más cortos. Estos cambios impulsarán la demanda de nuevos procedimientos de diagnóstico, monitoreo y tratamiento de menor costo (Laal, 2012).

### **2.2.1. La ingeniería biomédica como disciplina**

De acuerdo con Kohler (1982), una disciplina es una institución política que delimita un campo de conocimiento que se encuentra estructurado dada la experiencia de los académicos que trabajan en él, así como también se encuentra estructurado debido a los recursos que éste demanda. Es la infraestructura de la ciencia, que se encuentra inmersa en los departamentos universitarios, sociedades profesionales y relaciones de mercado informal entre los productores y consumidores de conocimiento (Kohler, 1982).

Entonces, la ingeniería biomédica puede ser considerada una disciplina que, sin embargo, es relativamente reciente. Si bien el ser humano ya desarrollaba técnicas y métodos rudimentarios para detectar y aliviar enfermedades desde tiempos ancestrales, no fue sino hasta que los sociólogos alemanes Joseph Ben-David y Avraham Zloczower agruparon los campos de conocimiento afines, siendo estos la química, fisiología y física, entre otros, aplicados a la medicina que se comenzaban a practicar en las universidades alemanas entre 1860 y 1880 con el fin de concebir a la ingeniería biomédica como un campo de conocimiento formal en el sector académico (Kohler, 1982).

Posteriormente, la ingeniería biomédica es considerada como una disciplina debido al apoyo de programas universitarios formales en la década de 1960. Esto considerando las consecuencias de los avances de la tecnología militar de la Segunda Guerra Mundial y los programas de investigación espacial en fisiología humana (Cadena Méndez & Leehan, 2003).

### **2.2.2. Ingeniería biomédica en México**

El primer hito en el nacimiento de la ingeniería biomédica como disciplina en México se remonta a finales de la década de 1940, debido a las colaboraciones de Arturo Rosenblueth del Instituto Nacional de Cardiología (INC) con Norbert Wiener en cibernética y con Albert Grass en instrumentación biomédica (Cadena Méndez & Leehan, 2003), lo que influye enormemente en el aumento de la investigación en estas áreas y genera la creación del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) en el año 1961.

Consecuentemente, en 1974 dos universidades iniciaron los primeros programas formales de pregrado en ingeniería biomédica. Siendo éstas la Universidad Iberoamericana (UIA) en la



Ciudad de México y la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa (UAM-I), ambas manteniendo una fuerte orientación a la investigación en instrumentación médica y aplicaciones informáticas en la medicina (Cadena Méndez & Leehan, 2003). Dado el apoyo académico al incremento de los grupos de colaboración, en 1978 es fundada la Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica (SOMIB) y posteriormente la publicación de su revista, la Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica en 1979 (Cadena Méndez & Leehan, 2003). Lo que destaca el esfuerzo de varios jóvenes investigadores y profesionales que trabajaron en los primeros programas universitarios formales de la ingeniería biomédica a principios de la década de 1970 y la formalización de ésta como disciplina en México.

### **2.3. Actualidad de la ingeniería biomédica**

#### **2.3.1. Definición de Dispositivos Médicos**

Los dispositivos médicos en particular son cruciales en la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades, así como en la rehabilitación del paciente. La Organización Mundial de la Salud (2017) reconoce que el campo de los dispositivos médicos es amplio, diverso, competitivo y altamente innovador. Para valorar el carácter de la innovación en este sector es útil contextualizarlo definiendo a la medicina como ciencia y como práctica. Por definición, la medicina es la ciencia de diagnosticar, tratar o prevenir enfermedades y daños al cuerpo o la mente (Laal, 2012).

La ciencia médica actual crea tratamientos efectivos para enfermedades y lesiones a partir de descubrimientos y conocimientos existentes. Este enfoque progresivo y centrado en la mejora es un medio útil para satisfacer las necesidades urgentes de los pacientes diagnosticados con enfermedades potencialmente mortales, que intenta transformar nuestra comprensión de la enfermedad (Laal, 2012). Debido a la naturaleza innovadora que presentan las tecnologías en dispositivos médicos es pertinente mencionar la definición de innovación. De acuerdo con Laal (2012), el término de innovación deriva de la palabra latina *innovatus*, que es la forma sustantiva de *innovare* que significa renovar o cambiar, viene de *in* "a" + *novus*- "nuevo". Aunque el término es usado ampliamente, la innovación generalmente se refiere a la creación de productos, procesos, tecnologías o ideas mejores o más eficaces que sean aceptados por los mercados, los gobiernos y la sociedad (Laal, 2012).

La definición de innovación que es más aceptada por los expertos es la proporcionada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) mediante el Manual de Oslo, el cual define a la innovación un producto o proceso nuevo o mejorado (o una combinación de los mismos) que difiere significativamente de los productos o procesos anteriores de la unidad y que ha sido puesto a disposición de los usuarios potenciales (producto) o puesto en uso por la unidad (proceso) (OECD/Eurostat, 2018). Cabe destacar que el término "innovación" puede significar tanto una actividad como el resultado de la actividad.

La innovación de dispositivos médicos se refiere no solo a la invención de nuevos dispositivos, sino también a ajustes o mejoras incrementales de los dispositivos existentes y las prácticas clínicas. También denota los esfuerzos para adaptar dispositivos diseñados para su uso en un entorno, como un hospital moderno de alta tecnología, para ser utilizados en otro entorno, como el hogar de un paciente. La OMS define la innovación como un "ciclo de proceso de tres fases principales que se alimentan entre sí: descubrimiento, desarrollo y entrega" (WHO, 2010, pág. 18).

Los dispositivos médicos involucran todo tipo de tecnología física y formas de energía (por ejemplo, mecánica, acústica, eléctrica, química, óptica, térmica, etc.). De Miranda, Dogget y Evans (2005) ofrecen una clasificación general de estos dispositivos: simples (por ejemplo, termómetro, anteojos) o complejos (por ejemplo, tomografías computarizadas, rayos X). De la misma manera se pueden clasificar en términos de disposición en dos categorías: primero, dispositivos que diagnostican o detectan el cuerpo y, segundo, dispositivos que tratan el cuerpo o se utilizan con fines terapéuticos (De Miranda, Doggett, & Evans, 2005). A su vez, los dispositivos de diagnóstico pueden clasificarse en: medición y prueba (o biometría), monitoreo e imagen. Los dispositivos de tratamiento se pueden clasificar como restauradores, preventivos y protésicos (De Miranda, Doggett, & Evans, 2005). Según la OMS (2017), los productos de tecnología médica más conocidos son, entre otros, marcapasos, instrumentos de imagen, máquinas de diálisis e implantes.

### **2.3.2. Regulación de Dispositivos Médicos**

La OMS (2003) precisa la definición formal de una norma, la cual debe adoptarse de manera general para las tecnologías en dispositivos médicos, definición propuesta por la

Organización Internacional para la Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés): las normas son acuerdos documentados que contienen especificaciones técnicas u otros criterios precisos para ser utilizados consistentemente como reglas, pautas o definiciones de características, para garantizar que los materiales, los productos, procesos y servicios son adecuados para su propósito.

Así, las normas y regulaciones para los dispositivos médicos permiten reducir los riesgos potenciales para la salud tanto como sea posible y permitir el acceso del paciente a dispositivos médicos de alta calidad, seguros y efectivos, al tiempo que restringe el acceso a aquellos productos que son inseguros o ineficaces (WHO, 2017). De la misma manera, cuando se implementa adecuadamente, la regulación de dispositivos médicos contribuye a mejores resultados de salud pública (WHO, 2017).

*Tabla 1 Normas del sistema de calidad utilizadas por diferentes autoridades. Fuente: Organización Mundial de la Salud (2003).*

<b>Normas del sistema de calidad utilizadas por diferentes autoridades</b>		
<b>País/Región</b>	<b>Normas/Regulaciones</b>	<b>Evaluación de la conformidad</b>
Australia	ISO 13485 o EN46001* ISO 13488 o EN46002*	Gobierno y terceros
Canadá	ISO 13485 o EN46001*	Terceros
Unión Europea	ISO 13485 o EN46001* ISO 13488 o EN46002*	Terceros
Japón	GMP #40 ordinance GMPI #63 ordinance QS Standard for medical devices #1128 notice	Gobierno
Estados Unidos	QS (21 CFR part 820)	Gobierno

Las regulaciones de los dispositivos médicos también deben tener en cuenta los planes nacionales de salud, las leyes existentes, los recursos disponibles y las prácticas de producción e importación. Los requisitos por norma para productos médicos varían en todo el mundo. Los fabricantes suelen tener éxito en obtener la aprobación del mercado para sus productos de las autoridades reguladoras si sus productos cumplen con los requisitos reglamentarios nacionales, sin embargo, las diferencias en los requisitos reglamentarios entre jurisdicciones significan que los esfuerzos de los fabricantes para cumplir con los requisitos de registro son complejos y requieren recursos adicionales (WHO, 2016).

Las regulaciones para los sistemas de calidad pueden cubrir los métodos, instalaciones y controles utilizados por el fabricante en el diseño, fabricación, empaque, etiquetado, almacenamiento, instalación, servicio y manejo posterior a la comercialización de dispositivos médicos. Por lo tanto, los requisitos del sistema de calidad pueden influir en todas las fases de la vida útil del dispositivo médico (WHO, 2003). El estándar aplicable a los dispositivos médicos está determinado por la clase de riesgo del dispositivo y depende del sistema regulador del país o región (WHO, 2003).

La OMS (2017) propone tres diferentes tipos de regulaciones, dependiendo del momento de desarrollo y comercialización en el que se encuentre la tecnología en cuestión:

a) Regulación previa a la comercialización

Las disposiciones legales básicas de la regulación previa a la comercialización incluirían la definición de un dispositivo médico, la clasificación del riesgo de los dispositivos médicos y los principios esenciales de seguridad y rendimiento. Proporcionan orientación a fabricantes, importadores, representantes autorizados y profesionales de la salud sobre el alcance de los productos regulados.

b) Regulación de "puesta en el mercado"

Las disposiciones legales básicas de la regulación de "comercialización" incluirían el registro de establecimientos, el listado de dispositivos médicos y los controles de importación. Estos elementos proporcionan una visión general de lo que está disponible en el mercado interno y quiénes son los actores responsables.

c) Regulación posterior a la comercialización

En uso clínico, los dispositivos médicos no siempre funcionan como se espera. Por lo tanto, es importante analizar los dispositivos médicos después de su comercialización. Un sistema mediante el cual los usuarios de dispositivos médicos pueden informar problemas, quejas o eventos adversos, especialmente cuando se trata de muerte o lesiones graves, puede incitar a la autoridad reguladora a tomar medidas (WHO, 2017).

Un beneficio secundario de la introducción de sistemas regulatorios es que los fabricantes nacionales no solo serán alentados a desarrollar y comercializar alternativas a los dispositivos importados, sino que también tendrán la oportunidad de hacer crecer su negocio mediante la

exportación de dichos productos (WHO, 2016). De la misma manera, es importante destacar que el desarrollo de tecnología médica generalmente implica pruebas exhaustivas antes de ser aceptado como práctica común. Debido a que la tecnología médica está vinculada con los seres humanos de una manera directa y compleja, crea una necesidad de precaución y cuidado adicionales con respecto a la implementación. A menudo, se requiere la aprobación del gobierno para su implementación (De Miranda, Doggett, & Evans, 2005).

El sector de ingeniería biomédica en México depende en gran medida del nivel de desarrollo del sector salud, que está integrado por clínicas y hospitales, tanto públicos como privados, ya que son los principales clientes de las empresas que integran dicha industria, así mismo también los laboratorios y centros de I+D que contribuyen a la generación de innovaciones que cubren las necesidades; además de las universidades, tanto públicas como privadas, que corresponden a las organizaciones más importantes como generadoras de conocimiento en el sector.

La política nacional que hace referencia a las tecnologías del sector salud forma parte del Plan Nacional de Salud, que surge por iniciativa del entonces presidente Luis Echeverría en la década de 1970. Este documento se conforma por el conjunto de programas de salud de todos los estados y territorios de la República Mexicana en función de la dinámica y de los programas de gobierno locales (Salud Pública de México, 1974). La agencia regulatoria o autoridad responsable de implementar y garantizar el cumplimiento de las regulaciones a la salud en México es la Comisión Federal para la protección contra riesgos sanitario (COFEPRIS) (WHO, 2017) la cual tiene como objetivo proteger a la población contra riesgos a la salud provocados por el uso y consumo de bienes y servicios principalmente, mediante el establecimiento y la implementación de políticas, programas y proyectos nacionales, en coordinación efectiva con los diferentes actores del ámbito público, privado y social, para prevenir y atender los riesgos sanitarios, contribuyendo así a la salud de la población (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, S.F.).

### **2.3.3. El sector biomédico en México**

Es bien sabido que las innovaciones más relevantes son generadas por los países líderes debido a que son los que poseen las condiciones económicas y tecnológicas para realizarlas, teniendo acceso a una mayor base de conocimiento, mejor infraestructura tecnológica y los

recursos necesarios para dichos fines. En contraste, los países seguidores como México tienen formas diferentes de acumular capacidades y recursos, mediante la importación de la tecnología que es útil o adaptable a las condiciones del contexto en el que se desenvuelven en el país seguidor. De esta manera, la tecnología es apropiada por el sector y a partir de este efecto se generan capacidades propias para producir nueva tecnología (Lall, 1993).

La apropiación del conocimiento puede ser crucial para el éxito económico de las empresas y para la innovación y el crecimiento de las regiones geográficas. Sin embargo, este efecto no es fácil. Aunque las ideas son de naturaleza intangible, pueden ser extremadamente difíciles de transmitir a través de fronteras regionales o entre las organizaciones. Singh (2004) propone dos patrones de difusión del conocimiento. Primero, los flujos de conocimiento están geográficamente localizados, es decir, los países geográficamente cercanos tienden a colaborar más, en contraste con los países en lejanía. En segundo lugar, el conocimiento se difunde más fácilmente dentro de una organización que entre diferentes organizaciones (Singh, 2004).

Los países en desarrollo, al importar tecnologías extranjeras, tienen ventaja en términos de costos, ya que a medida que aumenta el nivel general de acumulación de capital (y habilidades), las tecnologías más intensivas en capital (o complejas) se vuelven económicas. Además, las tecnologías provenientes del exterior suelen llegar en etapa de madurez (Lall, 1993), es decir, en una etapa en la que ya están listas para ser implementadas y poder explotar sus beneficios sin requerir de grandes esfuerzos de inversión y con bajos grados de incertidumbre, debido a que fueron antes probadas por los países en los que fueron desarrollados y tuvieron resultados satisfactorios. Hay que mencionar también, que los países en vías de desarrollo, al no ser pioneros en la generación de nuevas y mejores tecnologías, generan un efecto de rezago tecnológico con respecto a los países desarrollados.

Es pertinente mencionar que México es un país en vías de desarrollo y que basa su economía principalmente en la realización de actividades tradicionales como la manufactura y no en actividades que requieran de producción de alta tecnología. Entonces, en su mayoría, el país importa mucha más tecnología que la que genera de forma doméstica. Esto se debe, entre otros factores, a la falta de políticas que fomenten y propicien las condiciones para hacerlo, hacen falta apoyos de tipo gubernamental, así como incentivos y estímulos de tipo económico

para apoyar la realización de actividades relacionadas con Ciencia y Tecnología, como lo son la producción de recursos humanos altamente calificados y aptos para producir el cambio tecnológico en las industrias locales y los programas de estímulos para que empresas locales realicen actividades de I+D; además de la falta de interacción de la industria con las universidades. Más adelante en este documento se denota el papel importante que juegan las Instituciones de Educación Superior (IES), en comparación con las empresas, para la generación de conocimiento del sector.

Así, las competencias de esta industria en el país están determinadas por tres factores principales: 1) la capacidad que tiene México para formar capital humano altamente competitivo, lo que se ve reflejado en la existencia de alrededor de 230 IES que ofrecen programas relacionados con la biotecnología y el efecto positivo en la generación de conocimiento por parte de estas organizaciones a nivel nacional; 2) Costos competitivos relacionados con la manufactura de instrumental médico, así como de plásticos y componentes metálicos en comparación con Estados Unidos y 3) plataforma de exportación debido a su ubicación geográfica que permite ahorros en términos de logística y monitoreo cercano del proceso manufacturero (ProMéxico, 2016).

#### *2.3.3.1. Legislación promotora de la producción científica en biomédica*

La legislación mexicana es la herramienta empleada por el Gobierno mexicano con la cuál impulsa, fortalece y desarrolla la investigación científica y tecnológica en el país. En ésta se fijan las formas en las que estas actividades se llevan a cabo, así como también coordinan las dependencias involucradas, desde el sector académico, sector industrial y las instituciones involucradas en el desarrollo científico y tecnológico del país. Existen tres principales legislaciones relacionadas al sector biomédico mexicano, las cuales son la Ley de Ciencia y Tecnología, la Ley General de Salud y la Ley de Institutos Nacionales de Salud.

##### I. Ley de Ciencia y Tecnología

Esta ley coordina la relación de vinculación y participación de la comunidad científica y académica de las instituciones de educación superior, de los sectores público, social y privado para la generación y formulación de políticas de promoción, difusión, desarrollo y aplicación de la ciencia y la tecnología, y la formación de profesionales de la ciencia y la tecnología, y vincular la investigación científica y tecnológica con la educación. De esta ley se desprende

el Programa Especial de Ciencia y Tecnología, que representa un ente rector para la planeación, integración y coordinación de acciones para impulsar la actividad científica y tecnológica (Diario Oficial de la Federación, 2002)

## II. Ley General de Salud

La ley General de Salud (2019) le otorga a la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) la responsabilidad de evaluar riesgos de salud para la población, además de proponer políticas para la protección contra riesgos sanitarios y de su instrumentación en cualquier materia que tenga que ver los productos relacionados con salud humana (Diario Oficial de la Federación, 2019). Además, da seguimiento y aprueba la ejecución de bioprocesos y elaboración de bioproductos mediante estudios, estos siendo realizados por el Comité de Moléculas Nuevas y el Subcomité de Evaluación de Productos Biotecnológicos, que se dedica específicamente a la aprobación de productos de esta actividad y que está integrado por especialistas y científicos de biotecnología farmacéutica (Diario Oficial de la Federación, 2019).

## III. Ley de Institutos Nacionales de Salud

La ley que promueve la producción científica de la biotecnología, de la que parte la ingeniería biomédica como campo de conocimiento, es la Ley de Institutos Nacionales de Salud. En esta se regula la organización y funcionamiento de los Institutos Nacionales de Salud (INS), donde se incluye el Instituto Nacional de Medicina Genómica (INMEGEN) que promueve, fomenta y practica la investigación y aplicación del acervo de conocimientos sobre genoma humano en beneficio de la salud humana del país (Diario Oficial de la Federación, 2000).

### 2.3.3.2. Centros de investigación biomédica

Los profesionales de la ciencia y la tecnología mencionados en las legislaciones anteriores se encuentran relacionados en su mayoría con centros de investigación, ya sean privados o públicos. En México, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) es uno de los organismos que mantiene el vínculo entre estos centros de investigación y el Gobierno Federal, siendo este un organismo descentralizado y no sectorizado, que goza de autonomía técnica, operativa y administrativa (Diario Oficial de la Federación, 2020).



CONACyT mantiene un total de cinco coordinaciones de acuerdo con el campo de conocimiento en los que se enfocan, siendo la coordinación de Medio Ambiente, Salud y Alimentación la responsable de atender al sector biomédico en México (CONACyT, 2020). Dentro de esta coordinación se tienen ocho centros de investigación relacionados a la biotecnología:

- Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD)
- Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ)
- Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR)
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)
- Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. (CICY)
- El colegio de la Frontera Sur (ECOSUR)
- Instituto de Ecología (INECOL)
- Instituto Potosino de Investigación Científica (IPICYT)

Dentro de los centros de investigación científica también se encuentran los laboratorios. Estos son unidades de investigación especializada para el desarrollo científico e innovación en diversos campos de conocimiento. Sus principales funciones son la investigación, formar recursos humanos y prestar servicios relacionados con el conocimiento que se produce y desarrolla en ellos, y que además con estos los laboratorios obtienen recursos para desempeñar sus actividades. CONACyT mantiene un programa de soporte para laboratorios de diversos campos de conocimiento, los enfocados a la ingeniería biomédica son los siguientes (ver Tabla 2):

*Tabla 2 Laboratorios nacionales que realizan investigación en ingeniería biomédica registrados en el padrón de CONACyT. Fuente: (CONACyT, 2019)*

<b>Laboratorio</b>	<b>Institución</b>
Centro Nacional de Investigación en Imagenología e Instrumentación Médica	Universidad Autónoma Metropolitana / Unidad Iztapalapa
Laboratorio de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN)	Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
Laboratorio de Micro arreglos para Genómica Funcional e Identificación de Organismos	Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C.
Laboratorio de Visualización Científica Avanzada	Universidad Nacional Autónoma de México / Instituto de Neurobiología

Laboratorio Nacional de Análisis Físicos, Químico y Biológicos	Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Laboratorio Nacional de Apoyo Tecnológico a las Ciencias Genómicas	Universidad Nacional Autónoma de México / Instituto de Biotecnología
Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental	Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
Laboratorio Nacional de Citometría de Flujo	Universidad Nacional Autónoma de México / Instituto de Investigaciones Biomédicas
Laboratorio Nacional de Estructura de Macromoléculas Interés Biomédico y Biotecnológico	Universidad Autónoma del Estado de Morelos / Centro de Investigaciones en Química
Laboratorio Nacional de Investigación en Imagenología e Instrumentación Médica	Universidad Autónoma Metropolitana / Unidad Iztapalapa
Laboratorio Nacional de Medicina de Sistemas (para Enfermedades Crónico-Degenerativas)	Instituto Tecnológico Y De Estudios Superiores De Monterrey
Laboratorio Nacional de Medicina Personalizada (Establecimiento)	Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C.
Laboratorio Nacional de Microscopía Avanzada	Universidad Nacional Autónoma de México / Instituto de Biotecnología
Laboratorio Nacional de Recursos Genómicos	Universidad Nacional Autónoma de México
Laboratorio Nacional de Recursos Genómicos (Establecimiento)	Universidad Nacional Autónoma de México / Instituto de Investigaciones Biomédicas
Laboratorio Nacional de Soluciones Biomiméticas para Diagnóstico y Terapia	Universidad Nacional Autónoma de México / Facultad de Ciencias
Laboratorio Nacional en Salud: Diagnóstico Molecular y Efecto Ambiental en Enfermedades Crónico-Degenerativas	Universidad Nacional Autónoma de México / Facultad de Estudios Superiores Iztacala
Laboratorio Nacional Enfocado en Imagenología por Resonancia Magnética	Universidad Nacional Autónoma de México / Instituto de Neurobiología
Servicios Especializados de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+I) para Farmoquímicos y Biotecnológicos	Instituto Politécnico Nacional

*2.3.3.3. Instituciones que desarrollan investigación científica y tecnológica y tienen oferta académica en biotecnología*

El organismo ProMéxico, que, hasta el inicio del año 2019, se había encargado de coordinar las estrategias dirigidas al fortalecimiento de la participación de México en la economía internacional, apoyando el proceso exportador de empresas establecidas en nuestro país y coordinando acciones encaminadas a la atracción de inversión extranjera. Este organismo publicó en el año 2017 un reporte de la industria biotecnológica en México donde incluye varios campos de conocimiento que incluyen a la ingeniería biomédica.

En México existe una amplia red de instituciones que ofrecen formación académica en biotecnología y que además cuentan con especialistas e infraestructura para desarrollar

investigación y desarrollo tecnológico, gran parte de estas instituciones ofrecen programas relacionados a la Ingeniería biomédica, sin embargo, también lo hacen con respecto a otros campos, como el alimenticio, veterinario, agrónomo, entre otros. Muchas de estas instituciones prestan servicios a la industria y cada vez es más común el desarrollo de investigación conjunta y la cultura de transferencia tecnológica se ha hecho más fuerte (ProMéxico, 2017).

- Universidad Nacional Autónoma de México:
  - Instituto de Biotecnología UNAM-Morelos
  - Centro de Ciencias Genómicas-Morelos
  - Instituto de Investigaciones Biomédicas
  - Facultad de Química
  - Instituto de Ingeniería
  - Facultad de Medicina
- CINVESTAV (IPN):
  - Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad (Langebio)
- Instituto Politécnico Nacional (Red Biotecnología):
  - CIBA (Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada)-Tlaxcala
  - UPIBI (Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología)
  - CBG (Centro de Biotecnología Genómica)
  - ENCB (Escuela Nacional de Ciencias Biológicas)
  - CIIDIR (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional)-Sinaloa y Durango
  - ESM (Escuela Superior de Medicina)
  - ENMH (Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía)
  - CEPROBI (Centro de Desarrollo de Productos Bióticos)
- Universidad Autónoma Metropolitana
  - Unidad Iztapalapa
  - Unidad Cuajimalpa
- Colegio de Postgraduados (Biotecnología Microbiana, Vegetal y Animal)
- Universidad Autónoma Chapingo (Biotecnología Agrícola: recursos genéticos, ingeniería genética y mejoramiento asistido)

Universidades Privadas:

- ITESM (Líneas de Investigación: Biotecnología de alimentos, Ingeniería en bioprocesos, Biotecnología farmacéutica y médica, Química biológica)
- Universidad Iberoamericana Cd. de México (Maestría en Ciencias en Ingeniería Química)
- Universidad de las Américas Puebla (Maestría en Biotecnología, Maestría en Biomedicina Clínica, Maestría en Ciencias de los Alimentos)
- Universidad de La Salle
  - Facultad de Ciencias Agropecuarias (Especialización en Biotecnología de la Reproducción)

Además del INMEGEN, comentado anteriormente en la Ley de Institutos Nacionales de Salud, el reporte Panorama Actual de la Industria Biotecnológica en México (2017) considera otros institutos nacionales que promueven, fomentan y practican también la investigación sobre biotecnología e ingeniería biomédica aplicada a la salud:

- Instituto Nacional de Medicina Genómica (INMEGEN)
- Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER)
- Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológica (InDRE)
- Instituto Nacional del Petróleo (IMP)
- Instituto Nacional de Medicina Genómica (INMEGEN)
- Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán (INNSZ)
- Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER)
- Instituto Nacional de Perinatología (INP)
- Laboratorios de Biológicos y Reactivos de México (BIRMEX) (ProMéxico, 2017).

#### 2.3.3.4. Asociaciones inmersas en el sector biomédico

Existen algunas asociaciones referentes que integran tanto a científicos, investigadores, instituciones y empresas privadas que realizan investigación biomédica en México. De entre éstas, la más relevante es la Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica A.C (SOMIB), la cual es una asociación civil con intereses profesionales, académicos y científicos constituida desde 1978 en la Ciudad de México, afiliada a la *International Federation of Medical and Biological Engineering* (IFMBE) y al Consejo Regional de Ingeniería Biomédica para

América Latina (CORAL) pionera en actividades científicas del sector de ingeniería biomédica en México debido a que es la primera asociación de profesionales de ingeniería Biomédica en México y actualmente es la sociedad que congrega al gremio más grande de ingenieros Biomédicos en este país, además es la agrupación con mayor tradición y reconocimiento tanto nacional como internacional (SOMIB, 2019).

La SOMIB tiene vínculos con el Colegio Mexicano de Profesionales en Esterilización A.C., dedicada a la Educación, Difusión, Generación de conocimientos, así como la Promoción de Buenas Prácticas relacionadas con la Esterilización y Desinfección en el Ámbito de la Salud (Colegio Mexicano de Profesionales en Esterilización A.C., 2016).

De manera similar a la SOMIB, la Asociación Mexicana de Industrias Innovadoras de Dispositivos Médicos (AMID) tiene liderazgo en el sector industrial biomédico. Esta asociación realiza investigación científica sobre 75 especialidades médicas y sirve a instituciones de salud públicas y privadas, hospitales, laboratorios y clínicas; así como a instituciones de investigación y al público en general (AMID, S.F.). La AMID tiene como socios a algunas de las principales empresas del sector de dispositivos médicos a nivel internacional, como son *3M, Baxter, BD, Siemens Healthineers, GE Healthcare, Johnson & Johnson, Medtronic y Phillips healthcare*.

Considerando el sector industrial privado, el estado de Jalisco integra el Clúster en Ingeniería Biomédica, el cuál es la iniciativa que integra los esfuerzos de la industria de ingeniería biomédica, tecnologías y dispositivos médicos en la entidad con el objetivo de incrementar la competitividad del sector a través de la colaboración entre sus actores, principalmente empresas y laboratorios de I+D (Clúster Ingeniería biomédica, 2020).

Por su parte, el Colegio de Ingenieros biomédicos del Estado de Jalisco A.C. es una asociación sin fines de lucro que surge de la necesidad de promover la unificación gremial, e impulsar el desempeño y reconocimiento del Ingeniero Biomédico en el Estado de Jalisco (CIBEJ, S.F.). De manera similar, pero en el estado de Baja California está presente el *Medical Health* Clúster, asociación civil que agrupa a colegios y asociaciones de profesionales de la salud, profesionistas independientes y empresas con intereses comunes a los objetivos del Clúster, en el estado de Baja California (Medical+Health Cluster A.C., 2019).

La representación institucional del sector industrial ante las autoridades mexicanas se da mediante la Cámara Nacional de la Industria Farmacéutica (CANIFARMA), establecida en 1946 bajo la Ley de Cámaras y Organismos Empresariales. En principio, se fundó con el nombre de Cámara Nacional de Laboratorios Químico Farmacéuticos, y estaba integrada por 87 compañías fabricantes de medicamentos de uso humano. Al paso de los años cambió de nombre al actual y fue ganando prestigio y afiliados, tanto que hoy en día cuenta con 186 miembros (CANIFARMA, 2020). Actualmente CANIFARMA se integra por las especialidades: Medicamentos de uso humano, Medicamentos de uso veterinario y Dispositivos médicos.

### **3. Marco teórico**

Este capítulo presenta el marco teórico que sustenta la investigación, se trata de exponer los argumentos teóricos con los cuales se contrasta la evidencia empírica y se desarrollan las conclusiones. Este capítulo se encuentra dividido en tres partes, de las cuales el análisis de redes sociales es fundamental debido a la relevancia que tiene con respecto a los hallazgos en las redes de colaboración encontradas en esta investigación. Primero se expone la definición de red empleando diferentes autores que permiten contrastar estas definiciones desde diferentes enfoques; se continua con una revisión específica de los trabajos de redes y colaboración científica, principalmente realizados por Newman.

En un segundo apartado, a manera de enlace se describe el concepto de capital social que ayuda a interpretar la identificación de los mejores recursos presentes en la red en función de los resultados óptimos, en específico de innovación y de generación de conocimiento.

Finalmente, se define a detalle la teoría de Recursos y Capacidades (RBV, *Resource Based View*, por sus siglas en inglés) de Barney (1991), la cual muestra que estos recursos generan ventaja competitiva dentro de las empresas y cómo esa ventaja podría mantenerse a lo largo del tiempo.

#### **3.1. Análisis de Redes**

Uno de los principales enfoques de la investigación de redes en las ciencias sociales ha sido sobre el efecto de las redes en los campos de conocimiento y producción científica de los

grupos de colaboración. Quizás la propuesta más importante en la investigación de redes sociales es que la posición de un nodo en una red determina en parte las oportunidades y limitaciones que encuentra, y de esta manera juega un papel importante en los resultados de un nodo (Borgatti, Mehra, Brass y Labianca, 2009).

Newman, Barabási y Watts (2006) afirman que, mientras que en el pasado el análisis de redes sociales ha tendido a tratar las redes como estructuras estáticas, recientemente se ha reconocido que las redes evolucionan con el tiempo. Muchas redes son producto de procesos dinámicos que agregan o eliminan vértices o bordes. Newman, et al. (2006) agregan que los enfoques tradicionales de las redes han tendido a pasar por alto o simplificar demasiado la relación entre las propiedades que conforman el sistema en red y su comportamiento. Sin embargo, gran parte de los trabajos recientes en redes adoptan una vista dinámica de sistemas según la cual los vértices de un gráfico representan entidades dinámicas discretas, con sus propias reglas de comportamiento, y los bordes representan acoplamientos entre actores (Newman, Barabási y Watts, 2006).

Wasserman y Faust (1994) en Marin y Wellman (2010) mencionan que el análisis de redes sociales parte de la idea de que la vida social se crea principalmente por las relaciones y los patrones formados por estas relaciones. Las redes sociales se definen formalmente como un conjunto de nodos (o miembros de la red) que están vinculados por uno o más tipos de relaciones. Debido a que los analistas de redes toman estas redes como los bloques de construcción principales del mundo social, no solo recopilan tipos únicos de datos, sino que comienzan sus análisis desde una perspectiva fundamentalmente diferente a la adoptada por la ciencia social individualista o basada en atributos (Marin & Wellman, 2010).

El patrón de conexiones entre organizaciones en el que cada organización está vinculada a través de sus empleados a varias otras organizaciones permite que cada una recurra a diversas fuentes de conocimiento. Dado que la combinación de ideas previamente desconectadas es el corazón de la innovación y una estrategia útil para resolver problemas (Marin & Wellman, 2010) este patrón de conexiones, no solo el capital humano de los actores individuales conduce a actividades de innovación a ritmo acelerado en los sectores y regiones donde ocurre.

De esta manera, la teoría de las redes sociales proporciona una explicación a cuestiones que se han generado a la filosofía social desde la época de Platón, esto es, el problema del orden social: cómo los individuos autónomos pueden combinarse para crear sociedades duraderas y funcionales. Así, la teoría de redes también proporciona explicaciones para una mirada de fenómenos sociales, desde la creatividad individual hasta la rentabilidad corporativa. (Borgatti, Mehra, Brass, & Labianca, 2009).

### **3.1.1. Definición de Red**

Se retoman diferentes autores para definir una red social, desde diferentes enfoques. Retomando a Marin y Wellman (2010), una red social es un conjunto de nodos socialmente relevantes conectados por una o más relaciones. Los nodos, o miembros de la red, son las unidades que están conectadas por las relaciones cuyos patrones estudiamos. Estas unidades son más comúnmente personas u organizaciones, pero en principio cualquier unidad que pueda conectarse a otras unidades puede estudiarse como nodos.

Por otro lado, Butts (2008) propone que una red social, como usaremos aquí el término, consiste en un conjunto de "actores", junto con una "relación" en esas entidades. Suponemos que los actores que forman nuestra red son distintos entre sí, pueden identificarse de manera única y son finitas en número. Además, exigimos que las relaciones se definan en pares de actores, y que admitan, al menos, una distinción cualitativa dicotómica entre las relaciones que están presentes y las que están ausentes. Una red social se define por un conjunto de actores, junto con una relación social en esos actores. Entonces, una red está limitada por el conjunto de actores en las que se define (Butts, 2008).

Newman (2000) argumenta que una red social es una colección de personas, cada una de las cuales conoce un subconjunto de las otras. Dicha red puede representarse como un conjunto de puntos (o vértices) que denotan personas, unidas en parejas por líneas (o bordes) que comparten conocimiento, que bien puede pertenecer al mismo campo o puede ser complementario y multidisciplinario. Bajo este concepto, entonces, se permite reconocer entonces las especialidades y campos de conocimiento desarrollados por la red.

Sin embargo, Tolstoy y Agnal incluyen en el concepto de "red" no solo a aquellos actores directamente conectados a un agente económico específico, como sus clientes y proveedores, sino que también comprende relaciones conectadas indirectamente, como los clientes de



clientes y proveedores que existen en el mercado global (Tolstoy & Agndal, 2010). Por lo tanto, las empresas pueden aprovechar los recursos no solo a través de relaciones conectadas directamente, sino también a través de relaciones conectadas indirectamente.

Es preciso mencionar que el tipo y la calidad de las relaciones entre organizaciones dan forma a la red y definen qué oportunidades están disponibles, así como si las organizaciones pueden aprovechar estas oportunidades (Tolstoy & Agndal, 2010). Entonces, la relación que existe entre la organización y la red es dialéctica en el sentido de que la generación de conocimiento de las organizaciones contribuye a dar forma a la estructura de la red, mientras que la estructura de la red limita y define las oportunidades disponibles de absorción de conocimiento de la organización. Tolstoy et al. (2010) rescatan la idea propuesta por Schumpeter (1934) en la que ante un emprendedor que perturba la estabilidad estructural, las organizaciones deben ser proactivas para explotar los recursos en la red, lo que implica que deben trabajar para cambiar las combinaciones existentes de recursos de la red.

Rycroft y Kash (2004) proponen dos niveles en los que las redes de innovación son importantes. El primero es que el análisis de red puede definirse en términos de cada alianza estratégica. Este es el caso si las conexiones de red directas son el foco. El segundo nivel es el análisis que puede enfatizar un conjunto o grupo de alianzas. Así es como todo el conjunto de actividades de colaboración se convierte en la red. Este enfoque de red ayuda a analizar relaciones específicas y bien seleccionadas en el proceso de innovación entre actores específicos tanto en la región como más allá (Tödtling, Lehner, & Kaufmann, 2009). Retomando el segundo nivel de importancia de Rycroft y Kash (2004), Tödtling et al. (2009) destacan los motivos para participar en cooperaciones tales como complementariedades tecnológicas o acceso a recursos y conocimiento específico, y enfatiza el papel de la confianza y el capital social para el desarrollo de redes.

Desde un enfoque de análisis de nodos, la centralidad toma un papel fundamental, ya que de acuerdo con Borgatti (2009), una familia de propiedades de nivel de nodos relacionadas con la importancia estructural o la prominencia de un nodo en la red. De la misma manera, Borgatti menciona que la posición de un nodo en una red determina en parte las oportunidades y limitaciones que encuentra, y de esta manera juega un papel importante en los resultados de un nodo. Esta característica de la red es la que está detrás del concepto

popular de capital social, que en una formulación plantea que la tasa de rendimiento de la inversión de un actor en su capital humano (es decir, sus conocimientos, habilidades y capacidades) está determinada por su capital social (es decir, su ubicación de red) (Borgatti, Mehra, Brass y Labianca, 2009).

Borgatti (2009) propone diferentes tipos de mecanismos para explicar las variables y los recursos presentes en la red y cómo afectan a cada nodo, estos mecanismos se explican como sigue:

- El mecanismo de adaptación establece que los nodos se vuelven homogéneos como resultado de experimentar y adaptarse a entornos sociales similares.
- El mecanismo de unión es cuando los lazos sociales pueden unir nodos de manera que se construya una nueva entidad cuyas propiedades pueden ser diferentes de las de sus elementos constitutivos
- La unión es uno de los mecanismos detrás de la noción popular de los beneficios de rendimiento de los "agujeros estructurales". Dada una red de ego (el conjunto de nodos con lazos directos a un nodo focal, llamado "ego", junto con el conjunto de lazos entre los miembros de la red de ego), un agujero estructural es la ausencia de un lazo entre un par de nodos en la red del ego.
- El mecanismo de exclusión se refiere a situaciones competitivas en las que un nodo, al formar una relación con otro, excluye un tercer nodo (Borgatti, Mehra, Brass, & Labianca, 2009).

De manera similar, Butts (2008) propone diferentes índices para analizar los nodos. Con esto se analizan las propiedades de las posiciones individuales. Por otro lado, se puede analizar el entorno social que enfrenta un individuo determinado, midiendo características como la medida en que su entorno local es socialmente cohesionado o la diversidad de sus contactos personales.

Los índices descriptivos más antiguos y mejor conocidos dentro del análisis de red son aquellos diseñados para capturar el grado en que un vértice ocupa una posición más central que otro (en cualquiera de los diversos sentidos). Estos son los llamados índices de centralidad. Butts (2008) muestra tres de los tratados más utilizados en el famoso artículo de Freeman (1979) sobre índices de centralidad:

1. El índice de centralidad más básico es el grado, definido en el caso no dirigido como el tamaño de la vecindad del vértice focal
2. El segundo de los tres índices "clásicos" de Freeman (1979) se conoce como intermediación. Como su nombre lo indica, la intermediación cuantifica el grado en que el vértice focal se encuentra en una gran cantidad de caminos más cortos entre varios terceros; por lo tanto, las personas de alto rango intermedio tienden a actuar como "divisores de límites", uniendo grupos que de otro modo están conectados de forma distante, si es que lo hacen.
3. La tercera medida de centralidad "clásica" es la cercanía, que captura la medida en que el vértice focal tiene caminos cortos hacia todos los demás vértices dentro del gráfico (Butts, 2008).

### **3.1.2. Redes de Colaboración Científica**

En primera instancia, es pertinente retomar la definición de Katz y Martin (1997) que le dan a la colaboración, la cual sugiere el trabajo conjunto de individuos para lograr un objetivo común, siendo este el de producir nuevos conocimientos científicos. Además, ellos sugieren ciertos criterios que identifican mejor a un "colaborador" de otros investigadores, los cuales son:

- a) aquellos que trabajen juntos en el proyecto de investigación durante su duración o gran parte de él, o que realicen contribuciones frecuentes o sustanciales;
- b) aquellos cuyos nombres o cargos aparezcan en la propuesta de investigación original;
- c) los responsables de uno o más de los elementos principales de la investigación (por ejemplo, el diseño experimental, la construcción de equipos de investigación, la ejecución del experimento, el análisis y la interpretación de los datos o la redacción de los resultados en un documento) (Katz & Martin, 1997).

Durante décadas, la unidad básica de medida que se usó para medir la actividad colaborativa fueron las coautorías dadas por las publicaciones científicas. Katz y Martin (1997) destacan el trabajo de Smith (1958) debido a que fue uno de los primeros investigadores en observar un aumento en la incidencia de artículos de varios autores y en sugerir que dichos artículos podrían usarse como una medida indirecta para la colaboración entre grupos de investigadores.

Los efectos de la colaboración entre científicos e investigadores tienen efectos positivos en la comunidad científica. Lotka en 1926 identificó que el número de autores que producen “n” artículos es proporcional a  $1/n^2$  (Katz & Martin, 1997). Entonces, el número de investigadores que producen solo un artículo científico en un período de tiempo determinado es dos órdenes de magnitud mayor que el número de investigadores que producen 10 artículos al mismo tiempo y cuatro órdenes de magnitud mayor que el número que produce 100 artículos (Katz & Martin, 1997).

De la misma manera, diversos investigadores respaldan esta misma idea, en la cual se expone que la alta productividad (en términos de producción científica publicada) se correlaciona al hecho con los altos niveles de colaboración (Balog, 1979; Beaver & Rosen, 1979; Hodder, 1979; Lawani, 1986; Pao, 1980; De Solla Price, 1963, 1966; en Katz & Martin, 1997). Sin embargo, la naturaleza del efecto sobre la productividad depende del tipo de vínculos; mientras que la colaboración con científicos de alta productividad tiende a aumentar la productividad personal, la colaboración con científicos de baja productividad generalmente la disminuye. Además, estos autores argumentan que los autores más prolíficos parecen colaborar con mayor frecuencia y los autores de todos los niveles de productividad tienden a colaborar más con autores altamente productivos que con autores de menor productividad (Katz & Martin, 1997).

Desde un enfoque de redes de colaboración científica, de acuerdo con Melín y Persson (1996) la mayoría de las fases del proceso de investigación están asociadas con una gran cantidad de actividades de comunicación: científicos hablando entre sí, escribiendo, y a su vez, leyendo artículos y cartas. Pero los científicos no solo comunican los resultados de la investigación y la información entre sí, sino que también coproducen y co-informan los resultados de la investigación; en resumen, ambos se comunican y colaboran.

Los datos de coautoría de artículos científicos siempre han sido una herramienta poderosa para el análisis empírico en la sociología de la ciencia, y más recientemente han demostrado ser útiles para probar las teorías del "mundo pequeño" sobre la relación positiva entre el tamaño de las redes sociales y la cercanía de individuos en el mismo (Breschi & Lissoni, 2005).

La colaboración es una forma intensa de interacción, que permite una comunicación eficaz, así como el intercambio de competencias y otros recursos. Existe un incremento sustancial de la producción de artículos científicos realizados en colaboración, en comparación con los realizados de manera individual, entonces es de suponerse que la colaboración se ha convertido en un requisito previo para la ciencia moderna (Melin & Persson, *Study Collaboration in Research Using Co-Authories*, 1996). Si más de la mitad de los artículos publicados por los científicos de una universidad determinada son co-autorías con científicos de otras universidades o instituciones de investigación, ya no tiene sentido hablar de la universidad como única productora de conocimiento, este efecto más bien se debe a la red de colaboración de científicos que interactúan en ciertas líneas de investigación (Melin & Persson, *Study Collaboration in Research Using Co-Authories*, 1996).

Un documento científico tiene coautorías si tiene más de un autor. Es coautor institucional si los autores provienen de varias instituciones, departamentos u otro tipo de organizaciones. Cuando se utilizan las coautorías como indicador de colaboración científica, hay una serie de cuestiones de validez que se deben considerar, es necesario darse cuenta de que la colaboración no conduce necesariamente a artículos de coautoría, la colaboración puede conducir a otros resultados, como patentes, profundizar el contacto personal o nada en absoluto. Puede haber otras causas de coautoría además de la colaboración en investigación (Melin & Persson, *Study Collaboration in Research Using Co-Authories*, 1996).

La coautoría de artículos científicos requiere un entendimiento mutuo o al menos una complementariedad de conocimientos entre los científicos. Es de suponerse que los coautores se conocen tan bien que pueden intercambiar de manera eficaz cierto conocimiento específico, especialmente si son directamente relevantes para el contenido de sus publicaciones. Cada vez que dos científicos trabajan en un artículo en conjunto, podemos tratarlos de forma segura como dos nodos de una red social conectados por un enlace bidireccional. Al considerar a todos los científicos dentro de una disciplina dada, podemos construir la red social completa para esa disciplina y proceder a explorar sus propiedades estructurales (Breschi, Lissoni, & Montobbio, 2005).

De acuerdo con Ramasco, Dorogovtsev y Pastor-Satorras (2004), las redes de colaboración se pueden representar como gráficos constituidos por dos partes. Por un lado, tenemos los

actos de colaboración (p. Ej., Coautorías de trabajos, pertenecientes a la misma empresa, academia, etc.), que pueden representarse como un tipo especial de vértices. Por otro lado, tenemos a los actores (vértices normales), que están vinculados a los actos de colaboración en los que participan (Ramasco, Dorogovtsev, & Pastor-Satorras, 2004).

Newman es un importante autor sobre trabajos de redes de colaboración científica, en este documento se recatan diferentes trabajos de su autoría. Él estudió redes de científicos en las que dos científicos se consideran conectados si han sido coautores de un artículo. De la misma manera, Newman (2000) menciona que la mayoría de las personas que han escrito un artículo juntas se conocerán bastante bien. Esto ha sido gracias a que ha construido gráficos de colaboración para científicos de diferentes campos de investigación. Su trabajo fue realizado por medio del análisis de datos que provienen de cuatro bases de datos: MEDLINE (investigación biomédica), Los Alamos e-Print Archive (investigación en física teórica), SPIERS (trabajos en física de alta energía) y NCSTRL (trabajos en informática) (Newman M. E., 2000).

Desde hace tiempo se ha dado cuenta de que la coautoría de artículos en revistas científicas proporciona una ventana a los patrones de colaboración dentro de la comunidad académica. Se puede pensar que la coautoría de un documento documenta una colaboración entre dos o más autores, y estas colaboraciones forman una "red de coautoría", en la que los nodos de la red representan autores, y dos autores están conectados por una línea si han sido coautores de uno o más trabajos (Newman M. E., 2004).

En la propuesta de Newman (2000), en contraste con la proposición de esta investigación, los nodos en una red de citas son artículos, no autores, y los enlaces entre ellos son citas, no coautoría. La red de coautoría es tanto una red que representa a la sociedad académica como una red que representa la estructura de nuestro conocimiento (Newman M. E., 2004). Las redes de coautoría proporcionan un registro abundante y meticulosamente documentado de las redes sociales y profesionales de científicos (Newman M. E., 2004).

De acuerdo con Barabási (2002), con respecto a las redes grandes, tres características importantes parecen surgir: la primera es que la mayoría de las redes tienen la llamada propiedad del mundo pequeño, lo que significa que la separación promedio entre los nodos es bastante pequeña. En segundo lugar, las redes reales muestran un grado de agrupación más

alto de lo esperado para las redes aleatorias. Y finalmente, se ha encontrado que la distribución de grados contiene información importante sobre la naturaleza de la red, para muchas redes grandes que siguen una distribución de ley de potencia sin escala, inspirando el estudio de redes sin escala (Barabási, y otros, 2002).

Estas redes son en su mayoría verdaderas redes de conocimiento, ya que según Newman (2001) es probable que un par de científicos que hayan escrito un artículo juntos estén personalmente familiarizados. Y dado que el registro de publicación de los científicos está bien documentado en una variedad de bases de datos electrónicas que se encuentran disponibles al público, la construcción de redes grandes y relativamente completas es posible por medios automatizados. Estas redes proporcionan una fuente prometedora de datos del mundo real para alimentar el aumento actual del interés de la investigación en la estructura de las redes sociales dentro de la comunidad física (Newman M. E., 2001).

Al igual que Newman (2000, 2001, 2004), existen diversos estudios que prestan atención a comprender cómo las redes afectan el desempeño organizacional en los estudios de innovación (Ahuja, 2000; Balconi, Breschi, & Lissoni, 2004; Breschi & Catalini, 2009; Lee & Bozeman, 2005; McMillan, Narin, & Deeds, 2000; Tolstoy & Agndal, 2010; y Gay & Dousset, 2005; Schilling y Phelps, 2007; Boschma & Ter Wal en Balland, 2002). Este interés ha contribuido con un mejor conocimiento de la actividad innovadora y los procesos de agrupación en las redes de colaboración (Balland, 2012). Así, al utilizar indicadores de red, como centralidad, accesibilidad, intermediación o características estructurales como variables independientes, la atención se ha centrado en el desempeño organizacional. Según Balland (2012), esto ha contribuido en gran medida a considerar la red como una caja negra, similar a los derrames de conocimiento localizados en la geografía de la innovación (Breschi & Lissoni, 2001 en Balland, 2012). De hecho, la red se ve como una variable independiente con una estructura determinada y posiciones de actores determinadas, pero se presta poca atención a los efectos que provienen de la evolución de la propia red (Balland, 2012).

De manera semejante a lo presentado en el apartado correspondiente a la proximidad de análisis tanto de recursos como de capacidades en la organización (Barney, 1991; Eisenhardt & Martin, 2000; Tolstoy & Agndal, 2010; Cohen & Levinthal, 1990; McMillan, Narin, & Deeds, 2000; Sorenson, Rivkin, & Fleming, 2006; Griliches, 1957), Balland (2012)

retomando a Boschma (2005), realizan una distinción analítica bajo cinco dimensiones, las cuales son, en primera instancia, la proximidad entre organizaciones que puede relacionarse con su área espacial (geográfica), sus bases de conocimiento (cognitivas), su grupo empresarial (organizacional), su forma institucional (institucional) y, finalmente, su red social (social).

### **3.1.3. Generación de Fortalezas**

Si una organización con una ventaja competitiva comprende el vínculo entre los recursos, la gestión de estos y sus ventajas, otras empresas también pueden aprender sobre ese vínculo, adquirir los recursos necesarios e implementar estrategias relevantes (Barney, 1991) con el fin de desarrollar tecnología específica y que requiere alto desarrollo.

Los principales desafíos de las organizaciones incluyen la construcción de relaciones con agentes clave dentro y fuera de la organización, la movilización y la alineación de actividades en apoyo de una innovación de unidades con intereses divergentes, y la construcción de una infraestructura que legitime, habilite y limite la innovación (Van de Ven & Engleman, 2004).

Mowery y col. (1998), en Lin y col. (2012) mostraron que las empresas con similitudes en las capacidades tecnológicas, representadas por citas cruzadas de patentes y citas comunes de patentes, tienen más probabilidades de formar una alianza debido a que se genera una misma base de conocimiento. Del mismo modo, Lane y Lubatkin (1998) demostraron que las empresas farmacéuticas y de biotecnología que se basan en la misma base de conocimiento y lógicas dominantes tienen más probabilidades de asociarse y generar un mejor rendimiento, mientras que Ahuja (2000) descubrió que una mayor similitud tecnológica entre los socios de colaboración aumenta las patentes posteriores de la empresa (Lin, Wu, Chang, Wang, & Lee, 2012).

Así, las alianzas en I+D entre organizaciones es propuesta para generar nuevas tecnologías. Sin embargo, la mayoría de las alianzas de I+D no sirven como canales para la difusión de los conocimientos y recursos existentes, sino que permiten la combinación de dichos elementos para crear nuevos conocimientos (Lin, Wu, Chang, Wang, & Lee, 2012). Por lo tanto, una mayor proporción de alianzas de I + D en la cartera de alianzas de una empresa brinda una mayor exposición al conocimiento externo y conduce a una mayor experiencia en



la adquisición de conocimiento, por lo que se espera un mayor nivel de producción de innovación (Lin, Wu, Chang, Wang, & Lee, 2012).

De acuerdo con Rycroft y Kash (2004), cualquier red involucrada en la innovación de alta tecnología tiene al menos tres conjuntos de recursos: capacidades centrales (o competencias) existentes; activos complementarios ya interiorizados; y aprendizaje organizacional completo. De estos, según Rycroft y Kash, el aprendizaje es la clave, debido a que es el proceso mediante el cual las nuevas capacidades y activos se identifican, adquieren, comparten entre los participantes de la red y se actualizan o descartan continuamente para dar a la red como un liderazgo competitivo completo en un sector tecnológico particular.

Entonces, bajo este mismo enfoque, el aprendizaje en red tiene un efecto directo en las interacciones que se encuentran en evolución entre los actores de las capacidades básicas y los activos complementarios que son una parte continua de la autoorganización y evolución de la red. El aprendizaje que es esencial para desarrollar capacidades básicas y vincularlos con activos complementarios implica al menos tres actividades de colaboración: primero, buscar nuevos conocimientos y procedimientos para resolver problemas; segundo, experimentar y redefinir los problemas; y tercero, modificar la vía o trayectoria tecnológica (Rycroft y Kash, 2004).

El uso más amplio de las alianzas ha beneficiado a las organizaciones porque, en general, las grandes organizaciones buscan asociarse con organizaciones más pequeñas para explotar su flexibilidad e innovación, según Narula (2004). Siguiendo con esta idea, March (1991) a través de Van de Ven y Engleman (2004), establece que las organizaciones dividen su atención entre dos actividades principales, explotar las capacidades existentes y explorar las capacidades potenciales.

Es importante mencionar que la empresa puede crear nuevos conocimientos a través de intercambios en su red de relaciones interconectadas. La creación de conocimiento es el resultado de la confrontación entre el conocimiento del productor y el conocimiento del usuario (Johanson & Vahlne, 2009). Por otro lado, el proceso de creación de conocimiento no está separado de las otras actividades en las relaciones comerciales; más bien es inherente a ellos. El conocimiento no solo se obtiene de las actividades propias de la organización, sino también de las actividades de los socios con los que tienen alianzas o convenios de

colaboración, y dado que esos socios también tienen otros socios de relación con quienes se coordinan sus actividades, la organización focal se involucra indirectamente en un proceso de creación de conocimiento que se extiende mucho más allá de su propia red (Johanson y Vahlne, 2009).

#### **3.1.4. Capacidades del Sector Biomédico**

Una vez revisados los principales enfoques y conceptos bajo los cuales interesa analizar la evolución de las redes de colaboración tecnológica en la ingeniería biomédica mexicana, se ofrece en esta sección un breve contexto que nos ayude a valorar la construcción de capacidades y redes para la innovación en el campo sanitario, y particularmente en el sector biomédico.

De acuerdo con Miyazaki e Islam (2007), las nuevas tendencias tecnológicas se centran en la exploración de oportunidades en nanotecnología. Esto es debido a que los científicos e investigadores de las disciplinas científicas se involucraron agresivamente en la investigación relevante como una forma paralela de impulsar la competitividad de la nanotecnología a través de la investigación académica.

Las innovaciones se ven cada vez más como el resultado de un proceso interactivo de generación, difusión y aplicación de conocimiento. Las innovaciones, por lo tanto, están ocurriendo dentro de una compleja red de relaciones formales e informales, así como estáticas y dinámicas (Tödtling, Lehner, & Kaufmann, 2009). Siguiendo este enfoque, el proceso de innovación se define como el desarrollo e implementación de nuevas ideas por parte de personas que con el tiempo entablan relaciones con otros dentro de un contexto institucional. Esta definición de innovación incluye cuatro conceptos clave: nuevas ideas, personas, relaciones y contexto institucional (Van de Ven & Engleman, 2004).

Según la OMS (2010), la innovación en los dispositivos médicos se refiere no solo a la invención de nuevos dispositivos sino también a ajustes o mejoras incrementales de los dispositivos existentes y las prácticas clínicas. También se demuestran los esfuerzos para adaptar dispositivos diseñados para su uso en un entorno, como un hospital moderno de alta tecnología, para ser utilizados en otro entorno, como el hogar de un paciente (WHO, 2010).

Los desafíos sanitarios mundiales se están volviendo cada vez más complejos con la dualidad de los brotes de enfermedades infecciosas y la carga global de las enfermedades no transmisibles, especialmente en los países de ingresos bajos y medianos (OMS, 2017). Para proporcionar servicios de atención médica de calidad, asequibles y apropiados, se necesitan sistemas de atención médica resilientes que incluyan personal de salud capacitado, sistemas de información, mecanismos de financiamiento, infraestructura, medicamentos y tecnologías.

Debido a estas necesidades, es necesario que las tecnologías sanitarias se desarrollen de manera asequible y apropiada para los mercados, estas tecnologías incluyen dispositivos médicos, ya que son diferentes de otros bienes o productos de consumo. Desempeñan un papel importante y son parte integral de la provisión de atención médica.

Así, el desarrollo tecnológico en el cuidado de la salud difiere del desarrollo tecnológico en otros sectores. Entre otras cosas, en el contexto de la atención médica, el desarrollo tecnológico puede estar influenciado por los factores emocionales asociados a la salud y la enfermedad, así como por un amplio compromiso político para proporcionar a las personas las últimas tecnologías médicas (OMS, 2010).

Una de las razones para esta investigación en el comportamiento de la red de colaboración del sector biomédico es determinar la relación existente entre la colaboración y el crecimiento de la producción científica. La mayoría de los estudios de colaboración incluyen del supuesto que la actividad colaborativa aumenta la productividad de la investigación (Lotka, 1926; Price & Beaver, 1966; Zuckerman, 1967 en Bozeman & Lee, 2003).

Bozeman y Lee (2003) retoman los trabajos realizados por Lotka (1926) sobre la productividad de los científicos en los que esta se relaciona fuertemente con la colaboración entre actores. Trabajos posteriores confirmaron esta propuesta, un ejemplo de esto es lo realizado por De Solla y Beaver (1996), donde al analizar 592 publicaciones científicas y actividades colaborativas, se encontró que “existe una buena correlación entre las productividades y la cantidad de colaboración de los autores. El investigador más prolífico es también, con mucho, el que más colabora, y tres de los cuatro siguientes más prolíficos también se encuentran entre los siguientes que colaboran con más frecuencia” (Bozeman & Lee, 2003). Diana Crane (1972) explicó la dinámica de la colaboración en términos de

“universidades invisibles” y argumentó que estas dinámicas institucionales fueron responsables del crecimiento exponencial de la publicación científica.

De la misma manera, el estudio de Zuckerman (1967) realizado sobre 41 premios Nobel mostró una fuerte relación entre colaboración y productividad. En general, los galardonados publicaron más y fueron más propensos a colaborar que una muestra igualada de científicos (Bozeman & Lee, 2003).

La biotecnología es una nueva industria basada en el conocimiento y compuesta predominantemente por nuevas pequeñas empresas con estrechos vínculos con los científicos universitarios (Audretsch & Stephan, 1996 en McMillan, Narin, & Deeds, 2000). Más importante aún, una investigación reciente ha encontrado que las empresas de biotecnología desempeñan un papel clave en la transferencia de conocimiento de los laboratorios universitarios al mercado (McMillan, Narin, & Deeds, 2000). Desde este punto de vista, Liebeskind (1996) exploró las empresas de biotecnología desde la perspectiva de las redes sociales. Descubrieron que las empresas que realizaban investigaciones y publicaciones conjuntas con instituciones académicas eran más eficaces en la obtención de nuevos conocimientos científicos que aquellas que no tenían actividades conjuntas. En definitiva, ser parte de la red social era importante (McMillan, Narin, & Deeds, 2000).

Es de suponerse que el sector biomédico debe incrementar su producción científica tomando en consideración las nuevas tendencias tecnológicas que demuestran los expertos, fomentando la colaboración entre actores, no solo el académico sino también el sector industrial, para así aumentar la capacidad de producción científica en el sector. Uno de los objetivos de esta investigación se centra en la identificación de las redes de colaboración con la finalidad de ubicar los temas de especialización, y así reconocer si el sector biomédico mexicano se encuentra trabajando en las nuevas tendencias tecnológicas desarrolladas por los países líderes.

Se sugiere que la lógica de la investigación científica no se adhiere a la misma lógica que rige el desarrollo de nuevas tecnologías en el sector, y que estas lógicas conflictivas generan problemas potenciales para la innovación basada en la ciencia. Esto es debido a que los grupos de colaboración en los que circulan las ideas científicas y las lógicas por las que estas se seleccionan tanto en la comunidad científica, como en la industria, son diferentes

(Gittelman & Kogut, 2003). La innovación se basa en el conocimiento hecho en la ciencia, pero la ciencia que es "buena" para la innovación está impulsada por una lógica diferente a la empleada por una comunidad científica para determinar la ciencia "valiosa" o "importante" (Gittelman & Kogut, 2003). Entonces bajo esta idea, la ciencia se "fabrica" en laboratorios en los que los científicos buscan poder y alianzas para persuadirse unos a otros de que ocupan posiciones importantes (Knorr Cetina 1999, Latour y Woolgar 1979 en Gittelman & Kogut, 2003). En este contexto, un artículo publicado es una herramienta legítima de persuasión y un símbolo de logro.

Desde el punto de vista de la organización, el papel de la red de colaboración visto como canal de información y facilitador del intercambio de conocimiento entre organizaciones puede ser significativo en el contexto tecnológico (Ahuja, 2000). La innovación es a menudo una actividad intensiva en información en términos de recopilación y procesamiento de información. Las organizaciones individuales pueden perseguir solo un número limitado de tecnologías y líneas de investigación, pero la red puede aumentar el área de captación de información de una empresa y proporcionar beneficios de dos formas (Ahuja, 2000).

Por último, es importante destacar que tanto la distancia geográfica como la cognitiva son importantes en la medida en que contribuyen a reducir un tipo más fundamental de distancia entre los ámbitos académico e industrial, siendo esta la distancia social. Dentro del ámbito geográfico, se suele sugerir que tanto el conocimiento científico como el técnico son en gran medida "tácitos" y "no codificables", y requieren medios de transmisión sensibles a la distancia, como frecuentes debates de aclaración cara a cara y demostraciones in situ (Balconi, Breschi, & Lissoni, 2004). Así, el intercambio de conocimiento tácito entre investigadores universitarios y corporativos requiere que los dos grupos sociales compartan tanto conocimiento como códigos de comportamiento que sean recíprocos y equitativos, tomando en consideración las transacciones de mercado realizadas principalmente por la industria (Balconi, Breschi, & Lissoni, 2004).

### **3.2. Capital Social**

Anteriormente se comentó que la posición de un actor en la red determina en gran parte las oportunidades y limitaciones en cuanto a los recursos que encuentra, y que a partir de esta

posición se reflejan los resultados que el actor genera. Borgatti, Mehra, Brass, & Labianca (2009) mencionan que esta característica es definida como capital social, concepto que plantea que la tasa de rendimiento de la inversión de un actor en su capital humano (es decir, sus conocimientos, habilidades y capacidades) está determinada por su capital social (es decir, su ubicación de red).

Una parte fundamental de las redes es el vínculo social. Se dice que existe una relación o vínculo cuando hay una incidencia de contacto continuo y repetido entre dos partes. Cuando un vínculo es distinto de cualquier organización formal, se denomina vínculo social o relación social (Koput, 2010). Estos vínculos sociales forman una estructura social, que, a su vez, dan lugar al capital social debido a las relaciones entre actores sociales (Koput, 2010). James Coleman (1988) definió este concepto dentro de un contexto económico, dado que el capital es un recurso productivo que se puede invertir para producir valor, tal como el capital financiero o capital humano por mencionar algunos.

Entonces, de manera similar a como el capital físico se crea mediante cambios en los materiales para formar herramientas que faciliten la producción o el capital humano se crea mediante cambios en las personas que generan capacidades que les permiten actuar de nuevas formas, el capital social surge mediante los cambios entre las personas que facilitan la acción. Así como el capital físico y el capital humano facilitan la actividad productiva, el capital social también lo hace (Coleman, 1988).

Como otras formas de capital, el capital social es productivo, posibilitando la consecución de ciertos fines que en su ausencia no serían posibles. Sin embargo, a diferencia de otras formas de capital, el capital social es inherente a la estructura de las relaciones entre actores. Además, debido a que las mismas organizaciones pueden ser actores en la red (actores corporativos) al igual que las personas, las relaciones entre los actores corporativos también pueden constituir capital social para ellos (Coleman, 1988), esto se debe a que las organizaciones son capaces de intercambiar información y reconocer recursos de la red.

Burt (2000) reúne argumentos de diferentes autores (Coleman, 1990; Bourdieu y Wacquant, 1992; Burt 1992; Putnam, 1993) para explicar por qué el capital social es una metáfora sobre la ventaja. Esto es debido a que las personas a las que les va mejor están de alguna manera mejor conectadas. Ciertas personas o ciertos grupos están conectados con otros, confiando

en otros, obligados a mantener a otros, dependientes del intercambio con otros. Mantener una determinada posición en la estructura de estos intercambios puede ser una ventaja en sí misma (Burt, 2000).

Desde este mismo punto de vista, Burt (1992) coincide en que el capital social es distinto al capital humano o financiero. Sin embargo, Coleman menciona que el capital social emplea recursos de la red para el mejoramiento de un colectivo, que por el contrario Burt argumenta que los individuos pueden usar su capital social para superar a otros dentro de una organización o grupo, permitiéndoles hacer el mejor uso de los recursos a los que tiene acceso (Koput, 2010).

Una visión diferente es presentada por Obstfeld (2005), quien señala el beneficio potencial de presentar a otros que de otro modo no estarían directamente conectados. El beneficio se encuentra al vincular a dos actores que anteriormente no estaban vinculados, donde esto puede permitirles combinar sus recursos de manera productiva, lo que lleva a la creación de valor. Sin embargo, este nuevo vínculo entre dos actores no se da de forma espontánea, según Obstfeld (2005), la persona que presenta a dos actores en la red es definida como *tertius iungens*, que se traduce del latín como el "tercero que se une". El énfasis en el *tertius iungens* es dado principalmente por los casos que resultan en innovación, que es una forma de creación de valor por medio del empleo y combinación de recursos complementarios.

Entonces, el *tertius iungens*, que conoce el conjunto de información y recursos que posee un grupo de actores de una red tiene una ventaja especial en la identificación de los actores cuya vinculación podría generar una innovación (Koput, 2010). Obstfeld (2005) describe al *tertius iungens* como una estrategia en la cual actores vinculados producen combinaciones y recombinaciones novedosas de recursos de otros actores y, por lo tanto, generan nuevos recursos y capacidades. (Koput, 2010).

De acuerdo con la perspectiva de Schumpeter sobre la combinación, la literatura organizacional y estratégica ha enfatizado la combinación y recombinación del conocimiento como un recurso. En este sentido, la innovación adquiere relevancia en esta investigación debido a que requiere de una combinación novedosa de recursos. Koput (2010) menciona que los actores que tienen acceso a ciertos recursos o información pueden no ser capaces de

identificar que otros recursos deben ser combinados para producir un resultado valioso, ya sea una innovación o la generación de nuevo conocimiento.

Partiendo de esta idea, la capacidad de una empresa para integrar conocimientos representa una ventaja competitiva fundamental (Kogut y Zander, 1992; Grant, 1996; Spender, 1996; Nahapiet y Ghoshal, 1998; Okhuysen y Eisenhardt, 2002; Hargadon, 2003 en Obstfeld, 2005). Los stocks de conocimiento vistos como recursos de los actores, por lo tanto, son críticas para el proceso combinatorio de innovación. Sin embargo, si bien la teoría de redes sociales reconoce la importancia de los vínculos entre actores porque son la vía en que el conocimiento fluye en la red, esta teoría no explora la relación potencialmente compleja entre la red social y el conocimiento individual visto como un recurso (Rodan y Galunic, 2004 en Obstfeld, 2005).

Las teorías de redes sociales que se focalizan en las ventajas de los agujeros estructurales de la red o el efecto de *tertius iungens* tienen a enfatizar el flujo de conocimientos en la red, pero omiten la acumulación individual de recursos que genera innovación o nuevo conocimiento. El concepto de capital social ayuda a entender esta capacidad del actor de la red mediante la absorción, capacidad que Cohen y Levinthal (1990) definieron como la capacidad de una organización para reconocer el valor de la información como un recurso nuevo y externo, asimilarlo y aplicarlo con fines comerciales, concepto que se verá desarrollado en este documento de manera más profunda en el apartado de Teoría de Recursos y Capacidades posterior.

Cohen y Levinthal argumentaron que tal capacidad es una función del nivel de conocimiento previo relacionado de una empresa. Ellos realizaron su investigación la cual sugirió que el aprendizaje individual es acumulativo y que una profundidad y diversidad de conocimientos permite al individuo asimilar y aplicar el conocimiento de un amplio número de áreas (Cohen & Levinthal, 1990). Entonces, un stock de conocimientos del actor de la red es importante para la innovación y generación de nuevo conocimiento como recurso al que recurrir directamente y como base para la asimilación de nuevos conocimientos (Obstfeld, 2005).

El concepto de capacidad de absorción enfatiza la importancia del conocimiento técnico previo relacionado como base para la innovación, la investigación y el desarrollo exitosos. Si bien el conocimiento técnico es esencial para cualquier esfuerzo de innovación, las



organizaciones complejas y técnicamente orientadas exigen a sus participantes profundidad y familiaridad con las nuevas tecnologías y prácticas en su área funcional de experiencia, y las teorías situadas del conocimiento sugieren que el conocimiento se produce en relaciones técnicas y sociales entrelazadas (Lave y Wenger, 1991 en Obstfeld, 2005).

### **3.3. Teoría de Recursos y Capacidades**

El marco teórico presentado en los apartados anteriores soporta la actividad social en las redes de colaboración, tomando en consideración las coautorías de manera formal como vía de medición de colaboración, así como de la interacción social entre investigadores. Sin embargo, la producción de artículos científicos en ciertos campos de conocimiento no se sustenta de la misma manera dado que su naturaleza es tecnológica.

Si bien los objetivos de esta investigación se centran en el análisis de la evolución de las redes de colaboración y la identificación de los campos de conocimiento del sector biomédico, es pertinente retomar un marco conceptual propio el cual ayude a contextualizar estas redes de naturaleza tecnológica debido a los campos de conocimiento que se desarrollan en ellas. Estos conceptos son vistos en esta investigación como herramientas interpretativas dados los resultados encontrados en las redes de colaboración, no se tiene como objetivo el profundizar o explicar mediante estos el comportamiento de las redes de colaboración presentes en el sector.

La visión de la empresa basada en los recursos (RBV) es un marco teórico influyente para comprender cómo se logra la ventaja competitiva dentro de las empresas y cómo esa ventaja podría mantenerse a lo largo del tiempo (Johanson & Vahlne, 2009), principalmente se retoma la teoría de Barney (1991) y el paquete de recursos del que disponen las organizaciones (Eisenhardt & Martin, 2000; Tolstoy & Agndal, 2010), los cuales se propone que se distribuyen de manera heterogénea entre las empresas y que las diferencias de recursos persisten en el tiempo (Eisenhardt & Martin, 2000).

#### **3.3.1. Recursos**

Partiendo de la propuesta de Barney (1991), la visión de la empresa basada en los recursos sustituye dos supuestos alternativos al analizar las fuentes de ventaja competitiva. El primer supuesto es que este modelo supone que las empresas dentro de una industria (o grupo de

investigación) pueden ser heterogéneas con respecto a los recursos estratégicos que controla. El segundo supuesto es referente a que este modelo supone que estos recursos pueden no ser perfectamente móviles entre las empresas, y por lo tanto la heterogeneidad puede ser duradera.

Usando una lista de diferentes atributos, Barney (1991) propone una clasificación que brinda a las empresas la oportunidad de generar e implementar estrategias de creación de valor, estos atributos han sido generados por una variedad de autores. La clasificación es la siguiente:

1. Recursos de capital físico, que incluyen la tecnología física utilizada en una empresa, la planta y el equipo de una empresa, su ubicación geográfica y su acceso a las materias primas.
2. Recursos de capital humano, que incluyen capacitación, experiencia, juicio, inteligencia, relaciones e información de gerentes y trabajadores individuales en una empresa.
3. Recursos de capital organizacional, que incluyen la estructura formal de informes de una empresa, sus sistemas formales e informales de planificación, control y coordinación, así como las relaciones informales entre grupos dentro de una empresa y entre una empresa y aquellos en sus entornos, desde un enfoque de redes (Barney, 1991).

Estos recursos, siendo heterogéneos y estando distribuidos a lo largo de una estructura sectorial, pueden generar diferentes tipos de creación de valor para la organización, así como también pueden generar diferentes tipos de tecnología mediante la colaboración individual u organizacional.

Los recursos anteriores también están presentes en organizaciones no lucrativas como centros de investigación y universidades públicas, y aunque tienen una razón de ser diferente, presentan la necesidad de complementar conocimientos, habilidades y otros recursos, y por lo tanto de vincularse y construir capital social. En este sentido, la producción científica se encuentra relacionada positivamente como resultado de un "efecto de recursos" (Breschi, Lissoni, & Montobbio, 2005). Esto sugiere que el investigador individual dirige su investigación (o parte de ella) a objetivos relevantes para los derechos de propiedad individual (DPI) para acceder a recursos adicionales (Breschi, Lissoni, & Montobbio, 2005).

La historia de las relaciones entre la ciencia y la tecnología está marcada por los esfuerzos cooperativos entre los científicos y la industria, que han proporcionado a los científicos no solo recursos financieros y acceso gratuito a costosos instrumentos científicos, sino también a líneas de investigación "focalizadas", datos y experiencia técnica (siendo estos recursos cognitivos). Las respuestas a las preguntas de investigación planteadas por la tecnología pueden ser al mismo tiempo económicamente valiosas y científicamente relevantes, hasta el punto de abrir nuevas líneas y áreas de investigación: en la medida en que el historial de patentes de un científico académico sea un buen indicador de la participación del científico en la industria en proyectos con alto contenido científico, deberíamos esperar una asociación positiva entre patentes y publicaciones, tanto en cantidad como en calidad (Breschi, Lissoni, & Montobbio, *The Scientific Productivity of Academic Inventors: New Evidence from Italian Data*, 2005).

En relación con esto, investigaciones recientes han llevado a la importante idea de que la construcción de redes con un gran número de vínculos indirectos puede ser una forma efectiva para que los actores disfruten de los beneficios del tamaño de la red sin pagar los costos de mantenimiento de la red asociados con los vínculos directos (Burt, *Structural Holes: The Social Structure of Competition*, 1992). Aunque esta estrategia es indudablemente atractiva desde el punto de vista conceptual, parece probable que su valor en una circunstancia dada dependa de varios factores. Específicamente, el valor relativo de los vínculos directos frente a los indirectos probablemente dependa del grado en que los beneficios proporcionados por los vínculos directos e indirectos sean similares en magnitud y contenido (Ahuja, 2000).

### **3.3.2. Capacidades**

Sobre este mismo marco analítico, mucho se ha escrito en los últimos años sobre cuánto dependen las organizaciones del conocimiento externo para mejorar sus esfuerzos internos de innovación. La gran mayoría de estos estudios se centran en el modelo de "capacidad de absorción", propuesto por Cohen y Levinthal (1990) como una herramienta fundamental para este proceso (McMillan, Narin, & Deeds, 2000). Cohen y Levinthal (1990) definen la capacidad de absorción como la capacidad de una organización para reconocer nueva información, asimilarla y aplicarla con fines comerciales, principalmente. Esta definición

puede ser trasladada al contexto organizacional de centros de I+D, academia y laboratorios, cuya finalidad está centrada en la producción de conocimiento científico y ciencia básica.

Además, Cohen y Levithal (1990) argumentan que los procesos de innovación de una organización se componen de elementos tanto internos como externos; por lo tanto, la explotación de los descubrimientos científicos básicos requiere que una organización aprenda continuamente más allá de sus fronteras (McMillan, Narin, & Deeds, 2000).

McMillan, Narin y Deeds (2000) destacan una investigación publicada por Narin en 1997, en la cual se demuestra que, en la industria estadounidense, la dependencia de fuentes externas de conocimiento se ha centrado en la ciencia pública. La ciencia pública se define como la investigación científica realizada y apoyada por instituciones de investigación gubernamentales, académicas y sin fines de lucro. En este estudio, realizado entre los años 1993 y 1994, se muestra que el 73% de los artículos científicos citados por las patentes industriales de los Estados Unidos provenían de fuentes científicas públicas, mientras que sólo el 27% eran de científicos industriales. En un contexto mexicano, es de suponerse que estas cifras de producción de artículos científicos en comparación con la producción por parte de la industria privada sean mayores, en comparación con el estadounidense, incluso, este estudio respalda el continuo apoyo de la investigación básica por parte de las diversas organizaciones públicas.

De acuerdo con Singh (2004), desde un punto de vista económico, la adquisición de conocimiento puede ser crucial para el éxito económico de las empresas y para la innovación y el crecimiento de las regiones geográficas. Sin embargo, la adquisición de conocimientos no es fácil. Aunque las ideas son de naturaleza intangible, pueden ser difíciles de transmitir a través de fronteras regionales o establecidas desde dentro de la organización. Siguiendo con Singh, este autor propone dos patrones de difusión del conocimiento, resultado de una investigación realizada en 2004. Primero, los flujos de conocimiento están geográficamente localizados. En segundo lugar, el conocimiento se difunde más fácilmente dentro de una empresa que entre empresas (Kogut & Zander, 1992).

Partiendo de la capacidad de absorción, se tiene el efecto del flujo de conocimiento en una organización, como una capacidad para dispersar el conocimiento tanto dentro como fuera de la organización. Sorenson, Rivkin y Fleming (2006) sugieren que recibir y construir sobre

el conocimiento con frecuencia requiere que el receptor se involucre en la búsqueda para llenar los vacíos y corregir los errores de transmisión en el conocimiento transmitido entre individuos de una organización, cuyo costo y dificultad aumentan con la complejidad del conocimiento.

De esta manera, una extensa literatura ha enfatizado que la difusión del conocimiento tiende a estar restringida por fronteras regionales y organizacionales. Confirmando este efecto, Singh (2004) encuentra mediante sus estudios que las redes interpersonales son bastante importantes para determinar patrones de flujo de conocimiento entre organizaciones y en la propia organización internamente, aunque su impacto total puede ser difícil de medir ya que las colaboraciones en materia de publicaciones científicas y patentes representan solo una pequeña porción del conjunto general de relaciones sociales (Singh, 2004).

Singh enfatiza que las redes interpersonales son cruciales para la gestión del conocimiento, a pesar del creciente énfasis en los sistemas formales de gestión del conocimiento. Además, si bien la geografía es importante para la difusión del conocimiento, lo es al menos en parte porque las redes interpersonales tienden a ser de naturaleza regional. Esto sugiere que un componente importante de la gestión de recursos humanos de una empresa debería ser no solo rastrear la base de conocimientos de sus empleados, sino también comprender su participación en redes interpersonales clave que abarcan las fronteras regionales y de la empresa. Esto explica también la formación de redes de colaboración densas donde los actores se encuentran adscritos a organizaciones que se encuentran geográficamente cercanas.

Además, una organización podría aprender más de su entorno alentando a sus individuos a construir vínculos de colaboración externos en lugar de simplemente abrir divisiones relacionadas con “clústeres de alta tecnología” con la esperanza de que la generación de conocimiento se produzca por sí sola. El análisis sobre la interacción entre la distancia social y la co-ubicación geográfica muestra que, para los inventores conectados a través de trayectos cortos, la co-ubicación geográfica tiene un efecto residual menor sobre la probabilidad de flujo de conocimiento. Esto sugiere que las limitaciones geográficas se pueden superar fomentando los vínculos interpersonales entre regiones (Singh, 2004).

De la misma manera, desde una perspectiva de redes sociales, la proximidad social reduce la necesidad de búsqueda al facilitar la transmisión de este conocimiento y posterior absorción. El estudio realizado por estos autores demuestra que los individuos cuyas conexiones sociales son más cercanas con la fuente de conocimiento le dan un mejor acceso a la red de colaboración, en comparación con que los individuos con conexiones distantes o sin conexiones. Un estudio realizado por Hedstrom (1994) indica que la densidad de la red y la proximidad geográfica pueden explicar la mayor parte de la difusión de la idea de sindicalización en Suecia (Sorenson, Rivkin, & Fleming, 2006), lo que refuerza la propuesta de que las conexiones más cercanas otorgan un mejor acceso a la red (Sorenson, Rivkin, & Fleming, 2006). Cabe resaltar que a pesar de que científicos sociales han demostrado que las redes sociales son fundamentales para la difusión del conocimiento, existen pocos estudios que sistematicen y profundicen en esta perspectiva.

Considerando estudios clásicos de difusión y la curva de adopción acumulativa “S” (Ryan y Gross, 1943; Griliches, 1957; Rogers, 1995, en Sorenson, Rivkin y Fleming (2006) se encuentra que la adopción de una innovación a lo largo del tiempo sigue un patrón común: crecimiento lento al principio, luego aceleración rápida y finalmente desaceleración para alcanzar su límite de difusión. A pesar de que esta teoría describe el flujo de conocimiento de manera inalterada a medida que pasa de un actor a otro, esto no siempre sucede de esta manera. La mayor parte del conocimiento requiere capacidad de absorción previa, lo que permite a los actores recibirlo y construir sobre él (Sorenson, Rivkin, & Fleming, 2006); los destinatarios que asimilan nuevos conocimientos deben procesarlos activamente experimentando con su aplicación en nuevos contextos.

A nivel de la organización, este efecto puede resultar de suma dificultad a pesar de la infraestructura que esta tenga hacia los individuos. Teece (1977), por ejemplo, informa que la transmisión y asimilación de conocimientos técnicos representó el 19% de los costos del proyecto, en promedio, llegando al 59% en un caso, en 26 proyectos internacionales de transferencia de tecnología (Sorenson, Rivkin, & Fleming, 2006).

Entonces, se destacan dos puntos que influyen en el efecto de la difusión del conocimiento:

1. La proximidad geográfica

El espacio representa una dimensión importante que estructura la interacción social. De hecho, parte de la literatura más antigua sobre las redes sociales enfatizó el dramático declive en la probabilidad de una relación social a medida que dos partes se volvían cada vez más distantes (Park, 1926; Bossard, 1932 en Sorenson, Rivkin y Fleming (2006).

## 2. Proximidad organizacional

Las redes sociales también se concentran dentro de focos, como las organizaciones. Diariamente, la mayoría de las personas empleadas a tiempo completo pasan más horas de vigilia dedicadas al trabajo que a cualquier otra actividad. Los empleados se reúnen regularmente con otros empleados a través del trabajo para cooperar en proyectos, consultar decisiones, transferir información y socializar. Por tanto, utilizamos el empleo en el mismo escenario de la patente como otro indicador de proximidad social (Sorenson, Rivkin, & Fleming, 2006).

Balland (2012) propone un tercer punto que resulta importante en cuanto a las capacidades descritas en este trabajo de investigación. Se trata de la proximidad cognitiva. Esta se refiere al grado de similitud de las bases de conocimiento de las organizaciones y la necesidad de comunicar y transferir conocimiento entre actores (Balland, 2012). Sin embargo, para que las organizaciones adquieran capacidad de absorción y de difusión, estas requieren un cierto grado de distancia cognitiva con respecto al transmisor de conocimiento. Esto conduce a un equilibrio entre la novedad (distancia cognitiva de las bases del conocimiento) y la comunicación (proximidad cognitiva de las bases del conocimiento), ilustrada por la existencia de una distancia cognitiva óptima que asegurará la novedad, pero también una comunicación eficaz (Balland, 2012).

Como resultado de esta investigación, se destaca el papel de la proximidad institucional, que a su vez se encuentra ligado al recurso de capital organizacional propuesto por Barney (1991). Esta capacidad, si bien pareciera no resultar en principio tan relevante como los primeros tres puntos mencionados, es pertinente realizar una definición de esta capacidad de la propia organización para explicar la producción de conocimiento y el comportamiento de la red de colaboración con respecto a las organizaciones (principalmente academia) en el sector biomédico. Esta es definida por la similitud de restricciones informales y reglas formales compartidas por las organizaciones, donde representaciones, rutinas e incentivos comunes

permiten a las organizaciones realizar una transferencia de conocimiento eficiente (Balland, 2012). Esta capacidad entonces está compuesta por instituciones formales, como leyes y normas, e instituciones informales, cercanas a la noción sociológica de *habitus* (que es el conjunto de esquemas generativos a partir de los cuales los sujetos perciben el mundo y actúan en él), que es una forma de conducta construida involuntariamente a través del proceso de socialización (Balland, 2012).

### 3.3.3. Combinaciones de Recursos de Red

Los estudios a menudo sostienen que las empresas deben ser capaces de movilizar combinaciones de recursos para tener éxito (Barney, 1991). Penrose (1959) en Tolstoy y Agnal (2010) presenta esto como una interacción dinámica entre los recursos específicos de la empresa y las oportunidades de mercado, donde el crecimiento se logra a través de un proceso entrelazado de adquisición de recursos y explotación de oportunidades. Así, los nuevos recursos generan nuevas constelaciones de recursos únicas que, a su vez, presentan nuevas oportunidades que pueden explotarse en beneficio de la empresa (Tolstoy & Agndal, 2010). Bajo este efecto, Karra (2008) expone que, sin recurrir a recursos en la red, muchas empresas internacionales nunca serían explotadas en absoluto.

La combinación de recursos de red, por lo tanto, significa reunir recursos complementarios de las relaciones de red, recursos cuyo valor se mejora mediante la combinación, proporcionando a la organización una ventaja sobre otras (Tolstoy & Agndal, 2010). Es ampliamente reconocido que tanto la creación como la difusión de nuevas ideas son procesos que implican la integración y recombinación de conocimientos existentes provenientes de diferentes fuentes, ubicaciones y posiciones organizacionales (Breschi & Lissoni, 2005).

Como se mencionó con anterioridad, la visión basada en recursos se basa en el supuesto de que los recursos son de naturaleza heterogénea (Tolstoy & Agndal, 2010; Barney, 1991). La heterogeneidad de los recursos también significa que la combinación de recursos de una empresa, al menos de alguna manera, es única. Así mismo, Tolstoy y Agnal (2010) proponen los siguientes tipos de recursos bajo una revisión de literatura retomando a diferentes teorías:

Recursos tecnológicos



El uso efectivo de recursos tecnológicos ha demostrado ser importante en la explotación de alianzas entre organizaciones de diversas industrias de alta tecnología. Los recursos tecnológicos a menudo son cruciales para la innovación y pueden conducir a un avance comercial incluso cuando su aplicabilidad en el mercado no es evidente (Tolstoy & Agndal, 2010)

#### Recursos del mercado

Además, los recursos del mercado incluyen las competencias requeridas para hacer negocios en un determinado mercado extranjero (Fang et al., 2007). En la industria de la biotecnología, los recursos del mercado son a menudo vitales para la comercialización de la tecnología, ya que contribuyen a la sincronización de las agendas científicas y comerciales (Tolstoy & Agndal, 2010).

#### Recursos humanos

Gertler y Levitte (2005) afirman que los recursos humanos son extremadamente importantes en la industria biotecnológica, donde es crucial tener acceso a personas altamente educadas ("conocimiento incorporado") para poder desarrollar nuevas oportunidades de negocios. Los recursos basados en el conocimiento, por lo tanto, no siempre son parte integral de la organización como tal, pero a menudo están directamente relacionados con personas como científicos clave (Tolstoy & Agndal, 2010).

#### Recursos reputacionales

La reputación de una empresa en su red es esencial para los negocios porque la reputación puede ser una fuente de ventaja competitiva al mejorar la capacidad a largo plazo de las empresas para atraer clientes extranjeros.

#### Recursos financieros

Sin embargo, los recursos basados en el conocimiento a menudo no son suficientes para la aventura internacional; Las empresas también pueden necesitar medios financieros y físicos para convertir las oportunidades en negocios. La falta de capital puede ser un obstáculo importante cuando las empresas más pequeñas aprovechan las oportunidades comerciales en los mercados extranjeros.

#### Recursos físicos

Los recursos físicos pueden involucrar las plantas, el espacio de inventario y los equipos necesarios para facilitar la generación de conocimiento. Estos recursos pueden, por ejemplo, ser críticos en la implementación de proyectos de I+D en empresas biotecnológicas internacionales (Tolstoy & Agndal, 2010).

Retomando la propuesta de Ahuja (2000), que expone que las redes que presentan una densidad de vinculación entre actores alta se considera ventajosa en la medida en que estas redes se encuentren más vinculadas entre sus actores (Ahuja, 2000); además de lo mostrado anteriormente con respecto a los recursos presentes en la red, se puede deducir que la densidad de la red también es un recurso presente para el actor. Los actores pueden construir relaciones con múltiples clústeres desconectados y utilizar estas conexiones para obtener información y controlar ventajas sobre otros (Ahuja, 2000). Así, la estructura social óptima es la que se genera mediante la construcción de redes densas e interconectadas.

En relación con esto, existen investigaciones que han demostrado que la construcción de redes con un gran número de vínculos indirectos puede ser una forma efectiva para que los actores disfruten de los beneficios del tamaño de la red sin pagar los costos de mantenimiento de la red asociados con los vínculos directos (Ahuja, 2000). Aunque esta estrategia parece ser atractiva desde el punto de vista conceptual y teórico, parece probable que su confirmación en un contexto dado dependa de varios factores. Específicamente, el valor relativo de los vínculos directos frente a los indirectos puede depender del grado en que los beneficios proporcionados por los vínculos directos e indirectos sean similares en magnitud y contenido (Ahuja, 2000).

El estudio conducido por Ahuja (2000), se concluye que las redes de colaboración entre organizaciones están asociadas con dos tipos distintos de beneficios de la red. Primero, pueden proporcionar el beneficio de compartir recursos, lo que permite a las organizaciones combinar conocimientos, habilidades y activos físicos. En segundo lugar, las redes de colaboración pueden brindar acceso a los llamados *spill-offs* (derrames de conocimiento), sirviendo como conductos de información a través de los cuales las noticias de avances técnicos, nuevas percepciones de problemas o enfoques fallidos viajan de una empresa a otra.

### 3.3.3.1. *Capacidad de Combinación de Recursos de Red*

Esta capacidad de aprovechar y combinar recursos complementarios puede describirse como una capacidad de combinación de recursos de red de acuerdo con el concepto propuesto por Tolstoy y Agnal (2010). Esto significa que, al responder a los desarrollos en las redes, las empresas están listas para actuar sobre los recursos de la red cuando se abren ventanas de oportunidad con respecto a nuevos desarrollos de tecnologías. Al tener en cuenta esas ventanas de oportunidad, las organizaciones deben estar preparadas para reconocer los recursos y coordinar las relaciones de red. Esto solo se puede lograr mediante las primeras actividades de mapeo y los flujos de recursos que abarcan todas las organizaciones (Tolstoy y Agndal, 2010).

De esta manera, Tolstoy y Agnal sugieren principios de capacidad de combinación de recursos de la red, donde las organizaciones incorporen: en primera instancia la capacidad de interactuar efectivamente con los socios de la red, seguido de la capacidad de identificar complementariedades entre los recursos presentes en la red general y finalmente la capacidad de coordinar la red de manera proactiva recursos para un fin específico.

Por otra parte, el número de vínculos directos que mantiene una organización puede afectar positivamente su producción científica al proporcionar tres beneficios sustantivos: intercambio de conocimientos, complementariedad y escala (para el caso del sector industrial). Primero, los vínculos directos permiten compartir conocimientos (Berg, Duncan y Friedman, 1982 en Ahuja 2000). Cuando las organizaciones colaboran para desarrollar una tecnología, el conocimiento resultante está disponible para todos los colaboradores. Por lo tanto, cada colaborador puede recibir potencialmente una mayor cantidad de conocimiento de un proyecto en colaboración que el que obtendría de una inversión de investigación comparable realizada de forma independiente.

En segundo lugar, la colaboración facilita reunir habilidades complementarias de diferentes empresas (Ahuja, 2000). La tecnología a menudo exige el uso simultáneo de diferentes conjuntos de habilidades y bases de conocimiento en el proceso de innovación. Sin embargo, para las organizaciones es difícil desarrollar competencias amplias y múltiples o mantenerlas frente a los rápidos cambios tecnológicos (Ahuja, 2000).

## 4. Metodología

En este capítulo se explica la metodología que se utilizó para llevar a cabo esta exploración y responde a la pregunta de investigación la cual solicita una explicación de la evolución de las redes de colaboración y los campos de conocimiento biomédico en México; se exponen las principales fuentes de información y los motivos que llevaron a la elección de los agentes de estudio, también se explican las herramientas utilizadas para la obtención de la información, así como la metodología seguida para la construcción de las bases de datos y de los indicadores utilizados para el análisis de la evolución de las redes de colaboración en el sector de ingeniería biomédica, así como la identificación de las fortalezas presentes en las redes de colaboración.

La principal herramienta para esta investigación es la bibliometría, la cual ayudó a detectar literatura científica relevante para los propósitos de este trabajo y el posterior análisis de la información. El análisis de documentos de patentes también ha sido considerado por algunos investigadores, como un área de aplicación de los estudios bibliométricos; mientras que otros prefieren manejar la patentometría y la bibliometría como dos herramientas independientes pero complementarias.

El uso de la bibliometría tiene una larga historia que se remonta a las primeras décadas del siglo pasado, de acuerdo con Andrés (2009), los mayores avances debido a los nuevos desarrollos tecnológicos se produjeron en 1990, además de que los sistemas en línea facilitaban la indexación tradicional que facilitaba la disponibilidad de la información generada en los trabajos de investigación. Ahora hay muchas bases de datos específicas o multidisciplinarias que proporcionan información de indexación para miles de revistas, artículos, libros y actas. Indudablemente, la era tecnológica ha permitido avances enormes en el campo de la bibliometría (Andrés, 2009).

De esta manera, Andrés (2009) menciona las diferentes aplicaciones en las que la bibliometría se desempeña, siendo la primera la investigación metodológica, en la cual los estudios se centran en la metodología usada para llevar a cabo la investigación bibliométrica y se refieren al desarrollo o la mejora de los indicadores bibliométricos; la segunda aplicación es en las disciplinas científicas, donde estos estudios bibliométricos pueden ser realizados por investigadores de cualquier disciplina y el objetivo es aplicar indicadores bibliométricos

a un área de estudio determinada. Así, estos estudios aplican métricas para describir la ciencia; y finalmente la aplicación para la generación de políticas para la ciencia, la cuál es la aplicación más importante en el campo. Aquí, los estudios bibliométricos se utilizan para evaluar diferentes niveles de productividad y los responsables de la formulación de políticas realizan esta investigación con el objetivo de decidir cómo distribuir los recursos disponibles.

#### 4.1. Diseño de la metodología

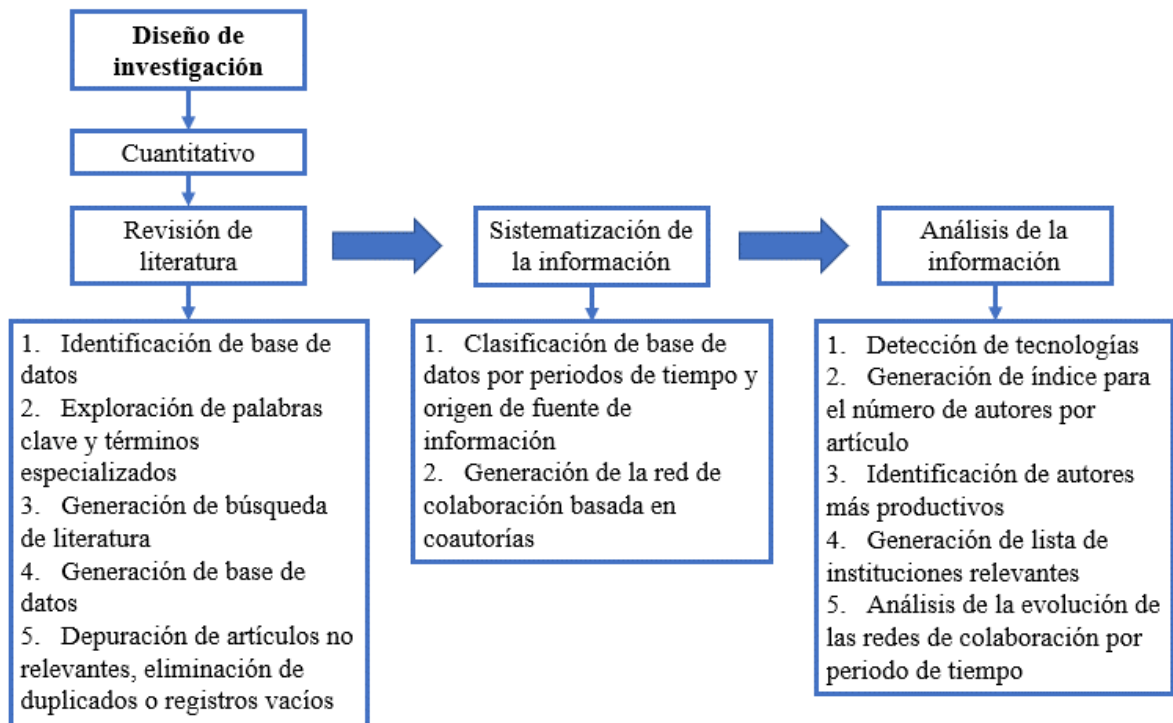


Figura 1 Diseño de la metodología empleada para la investigación. Fuente: Elaboración propia.

Para fines del presente trabajo, el diseño de la investigación a realizar se divide en tres etapas principales. Se inicia con una revisión fina de la literatura con el fin de a) definir las fronteras del sector, acotando el área de estudio; b) entender mejor el funcionamiento de algunas herramientas de inteligencia tecnológica, siendo bibliometría la empleada en este trabajo de investigación, y c) determinar los artículos científicos relevantes tomando en consideración un periodo de los últimos 20 años (periodo del año 2000 al año 2019).

Esta investigación se ocupa de la orientación dirigida a la evolución de las redes de colaboración que desarrollan tecnologías del sector biomédico. Por consiguiente, se presentan las siguientes etapas de la investigación principales, que son una revisión fina de

literatura, siguiendo por una sistematización de la información obtenida para finalizar con un análisis de la información; en las cuales, en la Figura 1 se presentan a detalle los pasos que se llevan a cabo en esta investigación.

#### **4.1.1. Revisión de literatura**

##### *4.1.1.1. Identificación de base de datos*

Señalamos las bases de datos de ciencia y tecnología como la puerta de entrada principal que nos deja observar los procesos de divulgación del conocimiento. De acuerdo con Porter y Cunningham (2005) la bibliometría y patentometría tecnológica se centran en la explotación de publicaciones de investigaciones y la información de patentes para obtener valiosos indicadores del progreso tecnológico latente.

Así, la investigación científica se organiza en jerarquías de disciplina, campo y especialidad (Porter & Cunningham, 2005). Las disciplinas son las unidades más grandes de organización científica y abarcan muchos campos; los campos son áreas intermedias de investigación; mientras que las especialidades, o dominios de investigación son regularmente la jerarquía más productiva para la investigación científica usando la bibliometría.

Debido a la relevancia en el campo científico se usaron las bases de datos obtenidas de *Web of Science* y *Scopus* para el caso de las publicaciones científicas. Los registros de ambas bases de datos fueron condensados en una sola base para fines de análisis posterior, eliminando entradas no relevantes, duplicados y entradas vacías.

##### *4.1.1.2. Exploración de palabras clave y términos especializados*

Siguiendo con los autores Porter y Cunningham (2005), es fundamental tener en cuenta dos aspectos para generar una consulta productiva. Primero, la amplitud de la búsqueda, si se desea una inclusión amplia o un enfoque más preciso. El segundo es considerar la naturaleza del lenguaje, si este debe ser científico y es más apropiado adoptar un lenguaje “natural” y más general y común tanto para científicos como para investigadores no relacionados con la disciplina estudiada. Tomando esto en consideración, se adoptó un enfoque preciso debido a que la generación de artículos científicos relacionados con el sector biomédico tiene una perspectiva más específica. El lenguaje empleado es el científico ya que es esencial debido a

que uno de los objetivos específicos de este trabajo es detectar tecnologías en las redes de colaboración.

El siguiente conjunto de palabras clave (ver tabla 3) fue seleccionado debido a que ofrecen la oportunidad de capturar mejor los desarrollos relevantes, eliminando publicaciones que no reflejen generación de conocimiento o avances tecnológicos y científicos, así mismo, se incluyeron ciertos términos<sup>1</sup> que excluyen disciplinas que no son relevantes para esta investigación:

*Tabla 3 Palabras clave para la generación de sintaxis de búsqueda. Nota: Se emplearon guiones y truncamientos para ampliar la sintaxis de búsqueda.*

<b>Jerarquía</b>	
Campo	Biotechnology / biomedic / health / healthcare
Especialidad	Physic / Magnet / Neuro / Cardio / Vascular / Lung / Diabetes / Kidney / Renal
Nivel tecnológico	Innovation / device / machine / monitor
Términos por excluir	agro / nano / food / geno / social / management / pharma / biolog

#### **4.1.2. Sistematización de la información**

Posteriormente se procedió con una etapa de sistematización de la información, la cual ayudó a codificar de bases de datos, realizar un análisis estadístico y generar una construcción de gráficas y/o redes que ayudaron a identificar tendencias tecnológicas en el sector en primera instancia. Para esta etapa de la investigación se empleó el uso de diferentes softwares. El primero de ellos es Science of Science (Sci2), que es un conjunto de herramientas modulares diseñado específicamente para el estudio de la ciencia. Es compatible con el análisis y la visualización temporal, geoespacial, tópica y de redes de conjuntos de datos académicos a nivel micro, meso y macro (Sci2 Team, 2009). La razón principal del uso de esta herramienta es para la preparación de la base de datos conjunta, de forma que Sci2 eliminó entradas duplicadas, entradas sin información y además procesa la información de manera que extrae las redes de coautores para el posterior análisis mediante la siguiente herramienta.

<sup>1</sup> Algunos de estos términos excluidos de los criterios de búsqueda son relacionados a la industria agrónoma, alimenticia y biológica sin relación directa con el ser humano

Al realizar una revisión general de la información y teniendo en cuenta los años a los que ésta corresponde (del año 2000 al año 2019) se encontró que hay comportamientos significativos por periodos de tiempo de cinco años cada uno. Esto debido a que entre los años 2000 y 2004 se detectó un periodo inicial, donde existe información que comienza a ser relevante para el sector biomédico y se trabaja bajo ciertos campos de conocimiento que son desarrollados con anterioridad por otros sectores, información anterior al año 2000 no es relevante para esta investigación dado que el volumen de producción científica es muy reducido; el segundo periodo detectado es del año 2005 al 2009 dado que la publicación de artículos aumenta con respecto a los cinco años anteriores, y que, sin embargo, los campos de conocimiento iniciales se mantienen en su mayoría; después del año 2010 se tiene un crecimiento acelerado en cuanto a la cantidad de campos de conocimiento y especializaciones en el sector, así como el número de coautorías en cada artículo publicado, así como en la cantidad de artículos publicados, crecimiento que se mantiene hasta el año 2019, por lo que se optó por separar este periodo de tiempo en dos de cinco años cada uno.

La base de datos, habiendo sido dividida en cada periodo de tiempo, se analizó por medio de redes por medio del software Gephi, el cuál es el software líder de visualización y exploración para todo tipo de gráficos y redes. Gephi es de código abierto y gratuito (Gephi.org, 2017). Esta herramienta resulta útil, además de otorgar un soporte en la explicación de los efectos de cada periodo con respecto a las uniones de cada actor de la red, también permite analizar las características de la propia red (ver apartado 4.1.3. Análisis de la información).

De acuerdo con Andrés (2009), la forma más fácil de comenzar un estudio bibliométrico es a través de análisis descriptivos de las principales características de los estudios que se incluyen. Por consiguiente, una vez que se hayan recopilado los documentos necesarios para el estudio es posible analizar cómo han evolucionado con el tiempo. Para realizar este análisis fue necesario conocer el año de publicación de cada estudio y calcular la frecuencia de los estudios publicados cada año, de esta manera fue posible identificar la tendencia de la productividad científica en un área de estudio determinada.

Los artículos científicos suelen ser el resultado del trabajo de varios investigadores. De hecho, y como afirma Posner (2001), el trabajo académico depende cada vez más del trabajo en equipo, al igual que la producción industrial. Por lo tanto, dado que los avances en la



ciencia serán el resultado de esfuerzos colectivos, será interesante estudiar la colaboración entre autores o instituciones (Andrés, 2009). La interacción entre los científicos ha sido durante mucho tiempo la esencia de la práctica científica. La mayoría de las fases del proceso de investigación están asociadas con una cantidad bastante grande de actividades de comunicación: científicos que hablan entre sí, escriben y leen documentos y cartas. Pero los científicos no solo se comunican los resultados de la investigación y la información entre ellos, sino que también coproducen y divulgan los resultados de la investigación (Melin & Persson, *Studying Research Collaboration Using Co-Authorships*, 1996).

En un enfoque básico de las colaboraciones científicas, se pueden identificar una serie de indicadores descriptivos con respecto al número de autores que participan en los artículos de un campo de investigación. Estos patrones de colaboración dan lugar a una gran cantidad de relaciones entre autores, instituciones o países, estableciendo así una red de investigación. Bibliometristas también analizan las relaciones entre los factores involucrados en estas redes de investigación (Andrés, 2009). El análisis de red aplicado al estudio de los agentes sociales responsables de las publicaciones científicas nos permite identificar el número de miembros en la red, la intensidad de la relación entre ellos y los miembros más relevantes de la red.

Siguiendo estas líneas, las vinculaciones que se identificaron en el estudio pudieron ser leídas desde varios ángulos, trascendiendo la mera productividad científica, deduciendo relaciones de aprendizaje y otras consideraciones estratégicas.

#### **4.1.3. Análisis de la información**

Los análisis descriptivos realizados en esta investigación a partir de la base de datos generada tienen diferentes enfoques, que cada uno aporta conocimiento diferente y ayuda a entender mejor el comportamiento de la evolución de la red de colaboración y la generación de conocimiento de los investigadores y científicos del sector biomédico. Particularmente, contribuyen a dar respuesta a los objetivos específicos 1 y 2 presentados en la Introducción.

La siguiente tabla (Tabla 4) contribuye a analizar las redes detectadas mediante la sistematización de la base de datos presentada con anterioridad. Estas variables explican ciertos aspectos que son importantes para describir el comportamiento de las redes, así como para comparar cada periodo de tiempo con respecto a la cantidad de coautorías, cantidad de actores presentes, así como los vínculos que tienen estos actores. Es pertinente mencionar

previamente la definición de gráfica, la cual es una estructura relacional que consta de dos elementos: un conjunto de actores (llamados vértices o nodos) y un conjunto de pares de entidades que indican vínculos (llamados aristas), en esta investigación la gráfica se encuentra medida con respecto a los periodos de tiempo definidos anteriormente. De la misma manera, el concepto de grupo adquiere relevancia debido a que este es un sistema de actores de menor tamaño que la red. Es el conjunto de los actores que se encuentran vinculados entre sí y siempre se trata de un conjunto finito. En esta investigación los grupos de actores se encuentran colaborando entre sí mediante coautorías.

*Tabla 4 Tabla de operacionalización de variables para el análisis de redes. Fuente: Elaboración propia.*

<b>Variables</b>	<b>Definición</b>	<b>Indicadores</b>
Tamaño de gráfica	El número de vértices en una gráfica dada se conoce como su orden o tamaño.	Número de nodos presentes
Actor/Nodo (Autores)	El actor se refiere a una persona, organización o nación que está involucrada en una relación social. Por tanto, un actor es un nodo en una red social. Un nodo es la unidad más pequeña de una red.	Cantidad de nodos presentes
Aristas (coautorías)	Una arista un vínculo entre dos nodos de una red	Por coautorías realizadas por periodo
Grado de un nodo	El grado de un nodo es el número de vínculos incidentes	Cantidad de vínculos por nodo
Grado medio de la red	El grado medio es el promedio de vínculos incidentes por el total de nodos en la red. Para este caso nos dice el porcentaje de coautorías por actor en la red.	Promedio de vínculos en el total de nodos por cada red
Densidad	La densidad es el número de líneas en una red simple, expresada como una proporción del número máximo posible de líneas	Proporción de la cantidad de vínculos presentes en la red de un periodo de tiempo con respecto al resto de periodos de tiempo
Número de grupos de colaboración	Cantidad de conjuntos de los actores que se encuentran vinculados entre sí	Cantidad de grupos en la red
Coefficiente medio de clústering	El coeficiente medio de de clustering de un nodo de la red mide el promedio de los vínculos de un nodo con respecto al resto de los nodos de la red.	Medido en porcentaje

Por otro lado, para analizar la continuidad de los grupos de colaboración detectados en las redes de cada periodo, los grupos más importantes son numerados en las redes. Así, notando la participación de un actor en un periodo de tiempo posterior se justifica la continuidad, aun no habiendo publicado algún artículo con los mismos actores iniciales, esto con la finalidad de justificar también la evolución de los grupos de colaboración y el cambio de las redes en

cada periodo de tiempo. La tabla 11 del apartado 6.5. Continuidad en los grupos de investigación presentes en las redes de colaboración explica esta situación.

De manera similar, se hace un análisis puntual de los siguientes aspectos:

- Número de autores por artículo

Un recuento del número de autores que han contribuido a los informes ofrece una indicación del grado de colaboración entre los autores.

- Autores más productivos

Este tipo de análisis elabora una lista de los autores más productivos, así como el número total de publicaciones. El porcentaje de publicaciones de estos autores con respecto al número total de publicaciones incluidas en el estudio o durante el período de tiempo en que han sido más productivas también se puede incluir en este análisis descriptivo.

- Lista de instituciones

Otro análisis común implica la elaboración de una lista de las instituciones o países más productivos en un campo determinado. En este sentido, es habitual incluir un ranking de quienes han colaborado en la mayor cantidad de publicaciones incluidas. El procedimiento utilizado para identificar las instituciones o países más productivos consiste en obtener la afiliación de los autores que han participado en la redacción de los documentos.

En el apartado séptimo Sobre el Análisis de competencias de las redes de colaboración, se muestran las competencias que las redes de colaboración han adquirido mediante la absorción de conocimiento y capacidad de combinación de recursos de la red. Es pertinente mencionar que para fines comparativos se seleccionaron los últimos 10 años, siendo estos los dos últimos periodos de tiempo del año 2010-2014 y 2015-2019, con el fin de medir el nivel de actualidad de los campos de conocimiento y tecnologías desarrolladas en el sector biomédico en México con respecto a la frontera internacional. Estos dos últimos periodos son relevantes dado que son los más recientes, muestran grupos de colaboración especializados en campos de conocimiento más complejos a comparación de los primeros dos periodos de tiempo, así como un mayor volumen de producción científica y una mayor cohesión de las redes.

#### **4.2. Principales resultados esperados**

- Identificación de núcleos de investigación y su perfil de especialidad.
- Análisis de redes de colaboración a partir de coautorías.
- Análisis de la conformación temporal de la estructura de las redes.
- Identificación de las competencias en producción científica y nivel de visibilidad internacional de la comunidad biomédica mexicana.

### **5. Determinación de tecnologías relevantes en la Ingeniería Biomédica**

A partir de la revisión bibliográfica, se detectaron un total de 211 artículos científicos obtenidos de las bases de datos de *Scopus* y *Web of Science*, en un periodo de 20 años, siendo estos del año 2000 al 2019. Se consideró el criterio de búsqueda señalado en el apartado de Revisión de Literatura que adiciona términos que permiten reconocer la relevancia de los artículos científicos para esta investigación; además, se emplearon ciertos términos<sup>1</sup> que descartaron artículos que no trascienden ante los objetivos presentados con anterioridad. Para complementar a la delimitación de la búsqueda de artículos científicos, se integra “México” como un criterio de búsqueda para el país de residencia de los autores o coautores de los artículos científicos. Cabe destacar que este criterio permite reconocer investigadores cuya nacionalidad no sea exclusivamente mexicana, incluyendo también los artículos científicos de autoría única.

La codificación de los títulos y resúmenes en la base de datos contribuyó a la revelación de las tecnologías presentes en el sector biomédico. Partiendo de la identificación de tecnología específica por artículo científico, se realizó la clasificación de tecnologías por campo científico. Esto permitió el reconocimiento de las líneas de investigación en las cuales están trabajando los autores y científicos relacionados a estos artículos. Esta es una primera aproximación a los grupos de colaboración presentes en el sector, que, a su vez, contribuye a abonar a una mejor explicación del comportamiento de las redes de colaboración, así como de su evolución.

Para el periodo inicial, comprendido entre los años 2000 al 2004, bajo un total de 11 publicaciones se detectan un total de 11 tecnologías trabajadas por los autores, es decir, cada artículo científico está basado en un tema de investigación diferente, sin embargo, algunas líneas de investigación presentadas en este periodo convergen en un campo científico para así deducir un total de 8 especialidades (como se muestra en la tabla 5). El siguiente periodo ofrece un crecimiento no muy relevante con respecto a la cantidad de artículos publicados, además de seguir el mismo comportamiento en cuestión de las tecnologías específicas del periodo anterior con 11. En ambos periodos se destaca el bajo aporte científico para el sector biomédico, que pudo haberse generado por diversos factores que no son objeto de discusión de este trabajo.

*Tabla 5 Número de tecnologías presentes en el Sector Biomédico por periodo. Fuente: Elaboración propia*

<b>Periodo</b>	<b>Años</b>	<b>Total de publicaciones</b>	<b>Tecnologías específicas</b>	<b>Especialidad</b>
1	2000-2004	11	11	8
2	2005-2009	13	11	9
3	2010-2014	45	35	17
4	2015-2019	118	74	22

Siguiendo con el periodo del año 2010 al año 2014, se tienen un total de 17 especialidades, teniendo 35 tecnologías las cuales trabajan los autores. Es en este momento donde se demuestra de manera más clara la coautoría de algunos trabajos de investigación debido a la afinidad de las líneas de investigación en las que trabajan los autores. Para el siguiente periodo, las tecnologías específicas detectadas pasan de 35 a 74, resultando un 111% más altas con respecto al periodo anterior; ello supone también una diversificación más amplia de las tecnologías aplicadas al sector biomédico, siendo estas no sólo las comunes de biomedicina, también incluyen ingeniería química, mecánica, eléctrica, etc., por mencionar algunas. Por el contrario, las especialidades no incrementan en la misma cantidad, sino en 29%, lo que supone que existen tecnologías presentes que muestran afinidad. Estos dos últimos periodos ofrecen crecimientos y diversificación en las líneas de investigación, así como en las tecnologías presentes en estos periodos de tiempo, los cuales se analizan con detenimiento posteriormente en este trabajo.

## 5.1. Campos de conocimiento presentes por periodo de tiempo

Cada periodo está caracterizado por tener campos de conocimiento y tecnologías específicas que las redes de colaboración han desarrollado. La mayoría de estas tecnologías cambian conforme pasa el tiempo debido a diferentes factores, como las corrientes de investigación, las necesidades de los mercados, los fondos que pagan estas investigaciones, etc. Así también, estas tecnologías dejan de desarrollarse y otras emergen para consolidarse después.

En los siguientes apartados se presentan estas tecnologías en los cuatro periodos de tiempo presentados en la metodología de este trabajo (2000-2004, 2005-2009, 2010-2014, y 2015-2019). Se destacan las tecnologías más relevantes y el comportamiento que tienen a través de los años, así mismo, se presenta en cada caso el porcentaje al que corresponde cada tecnología con respecto al total de artículos publicados en el sector biomédico.

### 5.1.1. Periodo 2000-2004

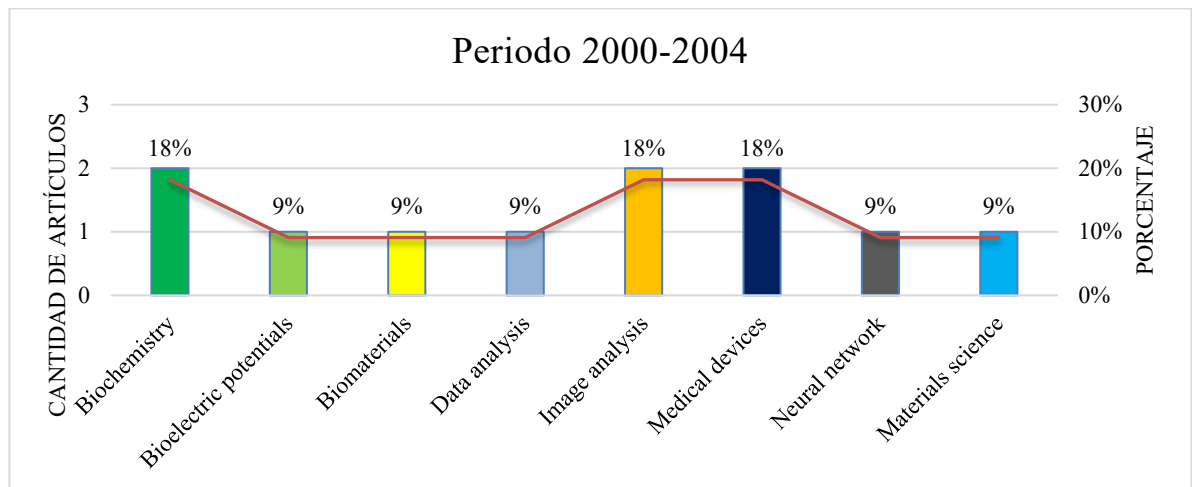


Figura 2 Tecnologías presentes en la red de colaboración del sector biomédico, periodo 2000-2004. Fuente: Elaboración propia.

Para este primer periodo (ver Figura 2), se detecta que el número máximo de publicaciones por año es de 2 artículos y las tecnologías más relevantes son bioquímica, análisis de imágenes y dispositivos médicos, estas tres tecnologías juntas representan el 54% del total de artículos científicos publicados. Se detectaron un total de 8 tecnologías diferentes desarrolladas en este periodo.

### 5.1.2. Periodo 2005-2009

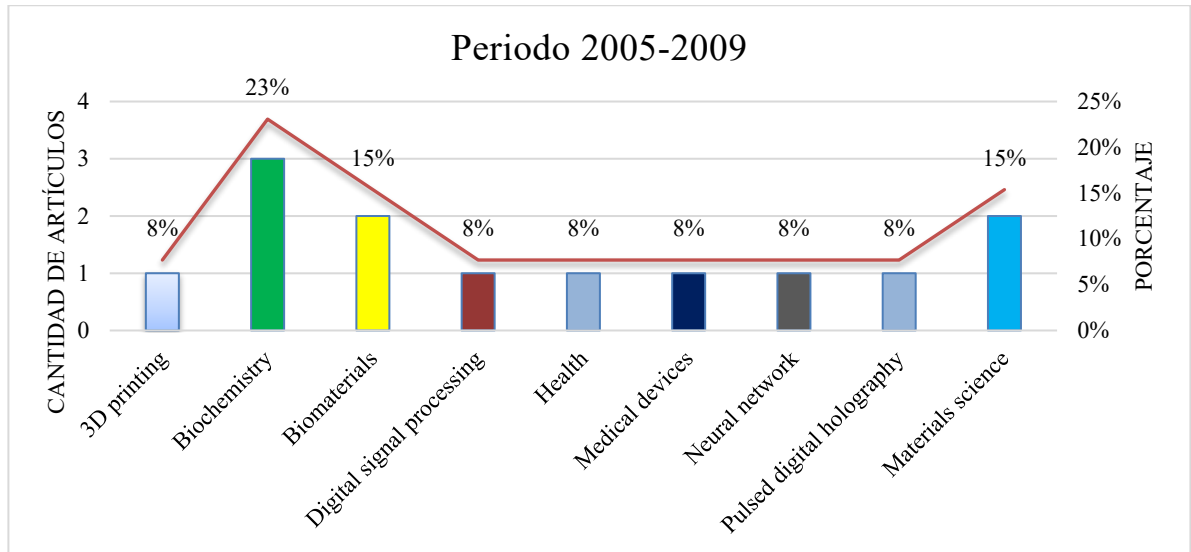


Figura 3 Tecnologías presentes en la red de colaboración del sector biomédico, periodo 2000-2004. Fuente: Elaboración propia.

Consecuentemente para el periodo de los años 2005 al 2009, algunas tecnologías continúan desarrollándose por los investigadores (ver Figura 3). Tal es el caso de la bioquímica, la cual representa un 23% del total de las publicaciones para estos años. Además, las investigaciones sobre biomateriales y ciencia de materiales aplicados a la biomedicina adquieren mayor relevancia ya que aumenta el volumen de publicaciones en 6%.

### 5.1.3. Periodo 2010-2014

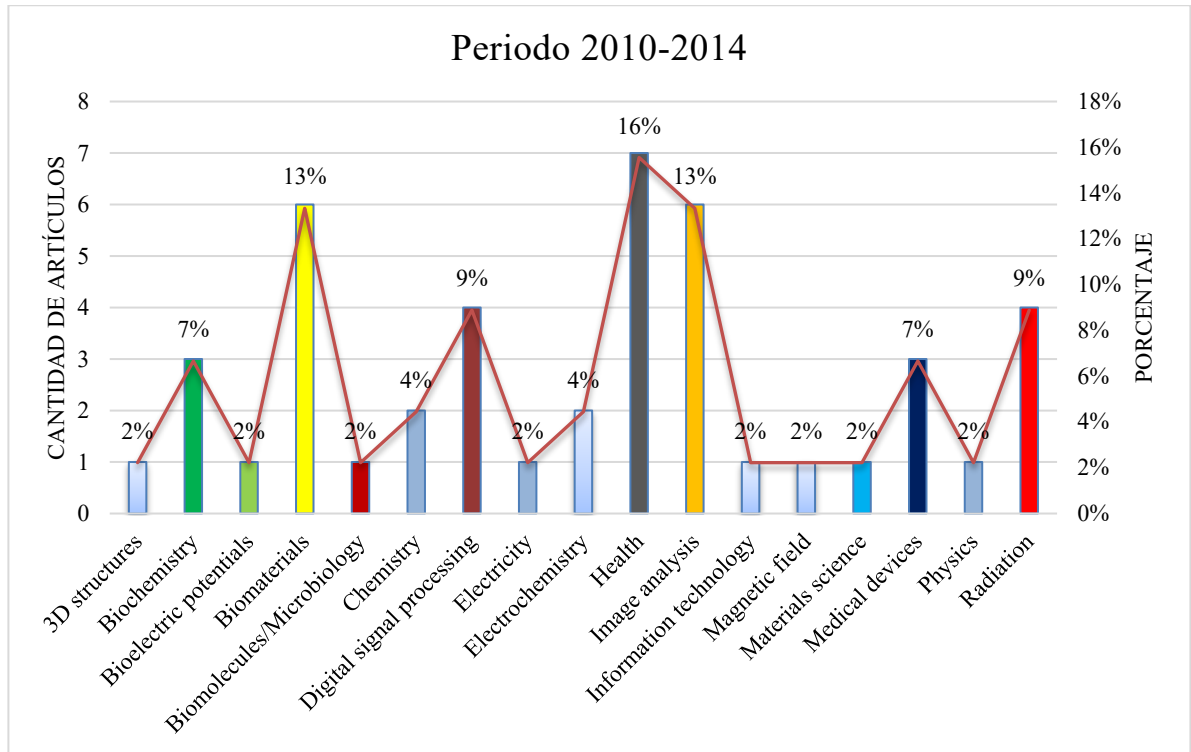


Figura 4 Tecnologías presentes en la red de colaboración del sector biomédico, periodo 2000-2004. Fuente: Elaboración propia.

En este tercer periodo se detecta un incremento general que no se mostró en los dos anteriores periodos (ver Figura 4). Destacan las tecnologías en Salud, Análisis de Imagen, Biomateriales, Dispositivos médicos y los trabajos en Radiación principalmente. Los biomateriales son una tecnología que continúa siendo una de las líderes en el sector, así también el análisis de imágenes, las cuales se presentaron en periodos anteriores. En el caso de las tecnologías en Salud específicamente se tiene un gran incremento, considerando el periodo anterior el cuál solo muestra una publicación en 4 años; para este periodo adquiere relevancia ya que representa el 16% de un total de 45 publicaciones. Cabe destacar que las tecnologías en radiación comienzan a ser trabajadas en este periodo, anteriormente no se había detectado esta tecnología para su aplicación en el sector biomédico.



#### 5.1.4. Periodo 2015-2019

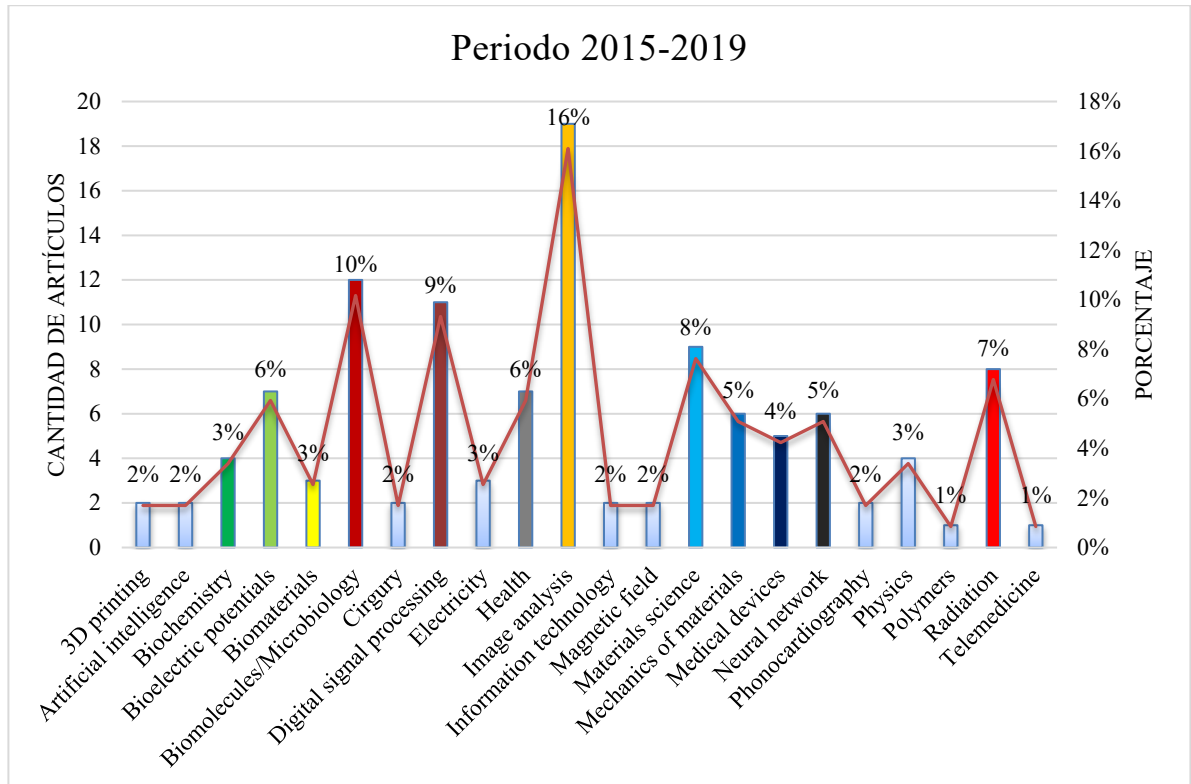


Figura 5 Tecnologías presentes en la red de colaboración del sector biomédico, periodo 2000-2004. Fuente: Elaboración propia.

El incremento en las publicaciones para este periodo con respecto al periodo anterior se mantuvo, llegando a las 118 publicaciones (ver Figura 5). Las tecnologías líderes del periodo anterior se siguen trabajando en este periodo, sin embargo, algunas tecnologías emergen. Tal es el caso de las tecnologías en biomoléculas y microbiología además de las tecnologías en procesamiento de señales digitales, ambas tecnologías se han trabajado con anterioridad, pero con la relevancia que adquieren en este periodo.

La tecnología que lidera en este periodo es el análisis de imagen con un 16% del total, teniendo 19 artículos publicados. En el caso de las tecnologías en Salud se detiene el incremento detectado en el periodo anterior al publicarse la misma cantidad de artículos científicos con 7 en ambos casos.

## 5.2. Evolución de los campos de conocimiento y tecnologías

Habiendo realizado una identificación previa de las tecnologías que son empleadas por estas redes de colaboración, es posible realizar un análisis de la evolución que han tenido en diferentes periodos de tiempo, así como la diversificación que han tenido las tecnologías para su uso en el sector biomédico.

La figura 6 muestra cuál es la tendencia en el uso de las tecnologías en el sector biomédico. Teniendo en los primeros dos periodos, siendo estos 2000-2004 y 2005-2009, un comportamiento de diversificación en las tecnologías usadas. Para estos periodos se tiene en promedio 1.4 artículos publicados por tipo de tecnología. Esta tendencia cambia ligeramente en el siguiente periodo, comprendido del 2010 al 2014, donde se tienen 2.6 artículos por tipo de tecnología, esto a pesar de que la cantidad de artículos publicados en el periodo es significativamente mayor con relación a los dos periodos anteriores y se detecta una mayor cantidad de tecnologías empleadas, con 17.

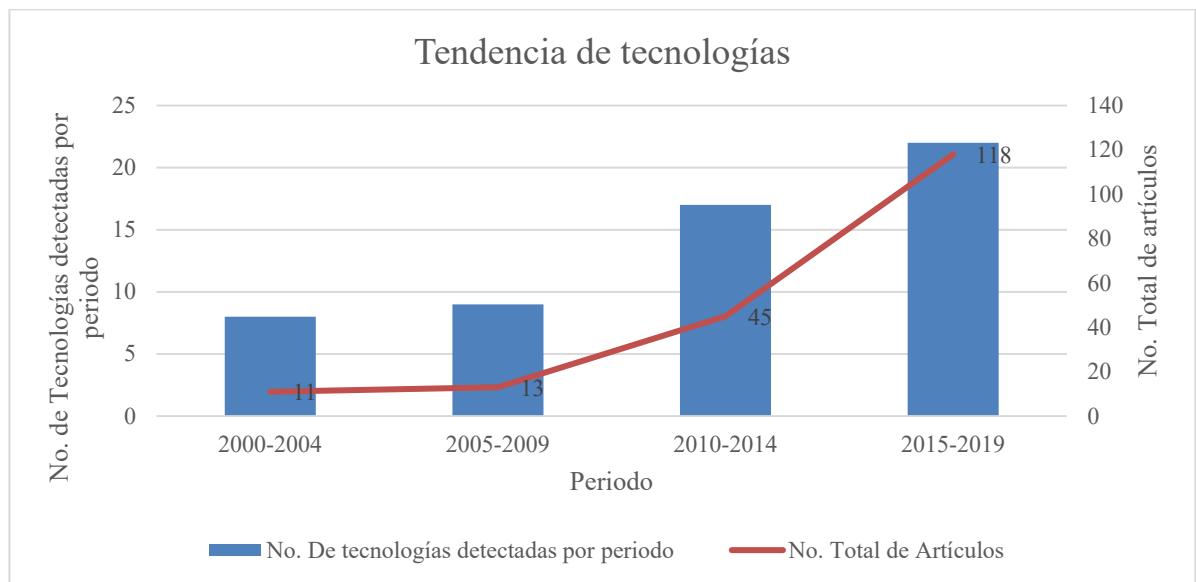


Figura 6 Tendencia de tecnologías por periodo de tiempo en el sector biomédico en México. Fuente: Elaboración propia.

Para el periodo del año 2015 al año 2019 se tiene una especialización, donde muchas tecnologías mostradas en el periodo anterior prevalecen, además de que las tecnologías incrementan su promedio en publicaciones, siendo 5.4 artículos científicos presentados por tipo de tecnología.

Considerando la tabla 3 mostrada en el apartado de la Determinación de tecnologías relevantes en la Ingeniería Biomédica, se toman las tecnologías relevantes en cada periodo y se analiza su comportamiento temporal.

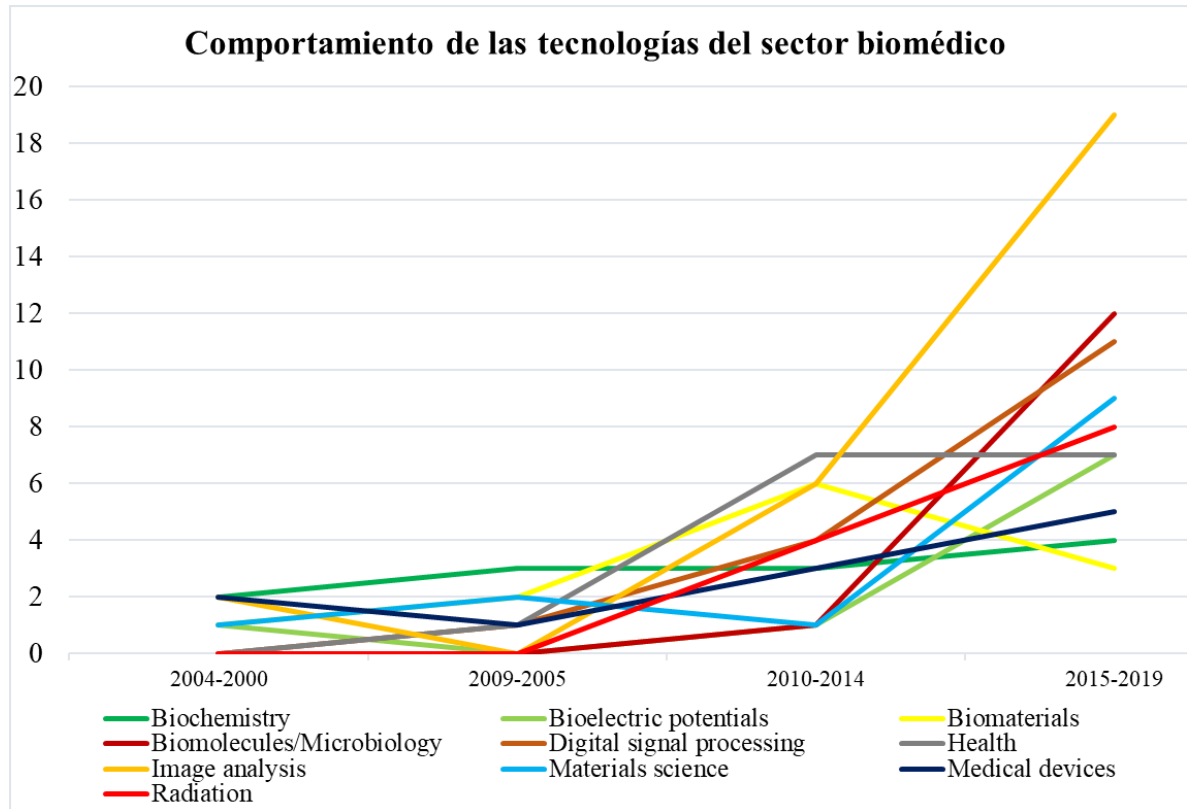


Figura 7 Comportamiento de las tecnologías más relevantes del sector biomédico en Médico. Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, la figura 7 muestra este comportamiento, donde se muestra que diferentes tecnologías han adquirido una mayor relevancia, así como algunas tecnologías que tuvieron relevancia en cierto periodo posteriormente dejan de ser consideradas de la misma manera para la generación de artículos científicos. Las tecnologías más relevantes en el sector son el Análisis de imagen, Biomoléculas/Microbiología, el Procesamiento de señales digitales, Ciencia de materiales y Radiación, considerando el último periodo comprendido del 2015 al 2019.

La colaboración entre autores, perteneciente al mismo grupo de colaboración inicialmente o trabajando posteriormente con grupos externos, durante periodos de tiempo diferentes contribuye a la generación de conocimiento y a un efecto de aprendizaje dadas las interacciones entre ellos, lo que ayuda a la evolución de las tecnologías presentes. De acuerdo

con Rycroft y Kash (2004), el aprendizaje que es esencial para desarrollar capacidades básicas y vincularlos con activos complementarios implica al menos tres actividades de colaboración: primero, buscar nuevos conocimientos y procedimientos para resolver problemas; segundo, experimentar y redefinir los problemas; y tercero, modificar la vía o trayectoria tecnológica; en este sentido, las actividades de las redes, tanto de la búsqueda de nuevos conocimientos, así como de nuevas trayectorias tecnológicas provocan el dinamismo de la red en cada periodo de tiempo.

La integración y recombinación de conocimientos, siendo éstos parte de los recursos de la red, provenientes de diferentes fuentes, ubicaciones y posiciones de las organizaciones a las que están adscritos los investigadores, ayudaron a la creación y difusión de nuevas ideas (Breschi & Lissoni, 2005), lo que a su vez permite nuevos desarrollos en líneas de investigación diferentes a las actuales. De esta manera, la combinación de recursos de la red presente en el sector biomédico en México reúne recursos complementarios de las relaciones de red, recursos cuyo valor se mejora mediante la combinación (Tolstoy & Agndal, 2010), proporcionando a la red mayores capacidades en la producción científica.

## **6. Evolución de las Redes de Colaboración del sector biomédico en México**

Las redes de colaboración presentan un proceso dinámico, en las cuales son afectadas tanto por las actividades inherentes a la propia red de investigadores, como por los agentes externos que permean a la red. Esto origina constantes cambios entre los nodos y los vínculos de cada una, al igual que la constante entrada y salida de investigadores en las líneas de investigación y en los grupos presentes que colaboran entre sí.

En este apartado se presentan las redes de colaboración divididas en los mismos 4 periodos de tiempo analizados en el apartado anterior, cada uno de 5 años, partiendo del año 2000 y culminando en el año 2019. Se denota cómo cada red de colaboración mantiene un incremento en tamaño con respecto al anterior periodo, sin embargo, estos incrementos no son constantes, sino que varían cada vez en mayor medida conforme se avanza en los diferentes periodos. Así mismo, estas diferentes redes de colaboración presentan diferentes características en cuanto a densidad, la cual es medida por la cantidad de autores que se

encuentran en un grupo, la cantidad total de grupos que se presentan en la totalidad de la red y el coeficiente medio de *clustering*, el cual mide el porcentaje de nodos que se conectan con algún otro, formando así un grupo en sí mismo. Estas características son enlistadas en la tabla 6.

*Tabla 6 Características que presentan las redes de colaboración en cada periodo. Fuente: Elaboración propia.*

Características	Periodo			
	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019
Total de artículos	11	13	45	118
Nodos (Autor)	45	59	189	553
Aristas (Coautoría)	89	141	431	1548
Grado medio	3.956	4.78	4.561	5.599
Número de grupos	11	12	37	94
Coficiente medio de clustering	100%	99%	98.4%	98%

De la Figura 8 se destacan dos características que resultan más relevantes, el grado medio y el número de grupos de coautores. El primero de ellos nos muestra el promedio de investigadores que colaboran en un grupo de investigación, el cual resulta en un promedio de 3.956 investigadores por grupo en un primer periodo 2000-2004, posteriormente este número incrementa en 20.8% con respecto al siguiente periodo. En un tercer periodo se tiene una ligera caída hasta 4.561, lo cual no representa un efecto adverso ya que la cantidad de grupos de investigación presentes en la red, con respecto al periodo anterior, crece en un 200% llegando a los 37 grupos de investigación presentes en la red.

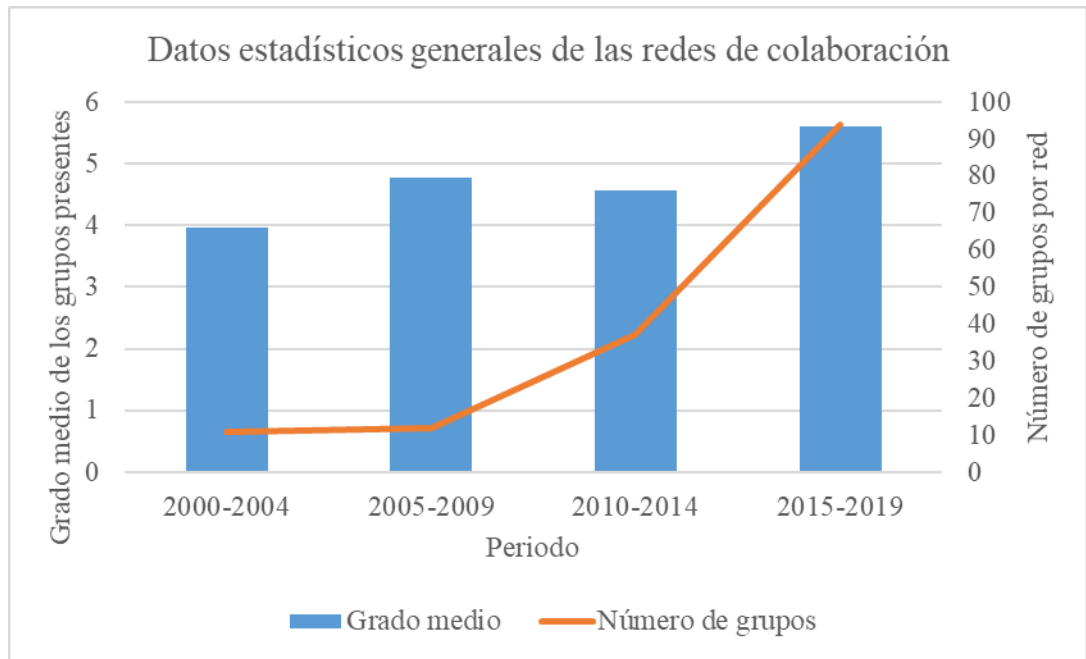


Figura 8 Datos estadísticos generales de las redes de colaboración de los periodos 2000-2004, 2005-2009, 2010-2014 y 2015-2019. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en un periodo de tiempo 2015-2019, se tiene el mayor incremento en cuanto al promedio de investigadores presentes en un grupo teniendo un promedio de 5.599 investigadores, así como en el número total de grupos presentes en la red el cuál llega a 94 grupos, lo cual significa un incremento de 2.5 veces más que el periodo inmediato anterior.

### 6.1. Periodo inicial (entre los años 2000 y 2004)

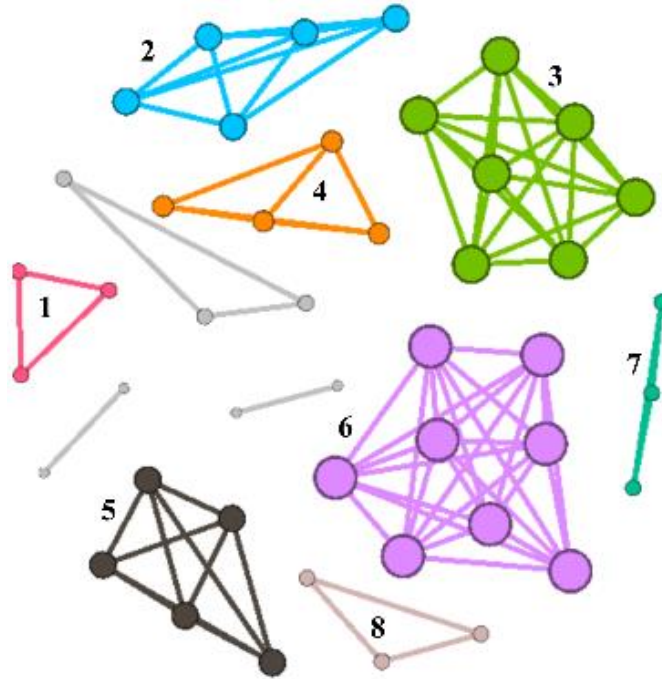


Figura 9 Red de colaboración del sector biomédico en México, comprendido entre los años 2000 al 2004. Fuente: Elaboración propia.

Para un primer periodo, en el cual las tecnologías involucradas en el sector de ingeniería biomédica, especialmente en México, se encuentran en desarrollo, se denota una baja producción de artículos científicos en 5 años, con 11 artículos. Esto confirma la teoría de la difusión de conocimiento de Griliches (1957) la cual menciona que la adopción de conocimiento sigue un patrón común: crecimiento lento al principio, luego aceleración rápida y finalmente desaceleración para alcanzar su límite de difusión (Sorenson, Rivkin, & Fleming, 2006).

De entre estos artículos se tiene una cantidad de 89 coautorías, las cuáles reflejan un promedio de 3.9 científicos e investigadores colaborando en la producción de un artículo científico, lo cual es relativamente alto con la actividad científica mostrada en periodos posteriores. Dada la baja cantidad de científicos e investigadores (45 en total), la densidad de la red para este periodo es del 9%, esto quiere decir que todas las coautorías relacionan al 9% de los autores de estos artículos: esta aproximación nos ayuda a entender que las conexiones locales son muy fuertes en algunos casos y se puede observar este fenómeno en los 11 clústers

presentes en la red. Sin embargo, se puede observar que todos los investigadores están relacionados con algún otro autor, todos colaboran en algún clúster, ya sea grande o pequeño dependiendo la cantidad de autores en cada caso.

*Tabla 7 Análisis de tecnologías y autores por grupo de colaboración en el periodo comprendido entre los años 2000 al 2004. Fuente: Elaboración propia.*

Grupo	Tecnología	Número de autores	Autores	Organización
1	Bioquímica	3	Castillo V., Gonzalez R., Suaste	CINVESTAV-IPN
2	Análisis de imagen	5	Botello S., Calderon F., Fernandez Bouzas A., Marroquin J.L., Vemuri B.c.,	
3	Análisis de imagen	7	Bharath A.a., Chapman N., Hughes A.d., Martinez Perez M.e., Parker K.h., Stanton A.v.,	Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM), Imperial College of Science, Technology and Medicine, St. Mary's Hospital,
4	Ciencia de materiales	4	Ballester A., Blazquez M.I., Gonzalez Chavez J.L., Gonzalez F.,	Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM); Facultad de Ciencias Químicas, Cd. Universitaria, Madrid, Spain
5	Redes neuronales	5	Becerra A.h., Corkidi G., Cosio F.a., Vega L.,	Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM);
6	Bioquímica	8	Valdez S.B., Rosas G.N., Carrillo B.M., Perez L.T., Ogura T., Beltran G.C., Miguel J., Beltran G.,	Univ. Autonoma de Baja California; Universidad Autonoma de Campeche; Univ. Autónoma de Guadalajara,
7	Biomateriales	3	Galindo E., Pacek A.W., Nienow A.W.	Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM); University of Birmingham;
8	Análisis de datos	3	Gutierrez J., Alcantara R., Medina V.	Instituto Nacional De Neurología Y Neurocirugía; Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM); Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa;

Cabe destacar la alta relación de este periodo con instituciones extranjeras. De los 8 grupos de colaboración más importantes, en 3 de ellos se tienen coautores que provienen de instituciones inglesas o españolas, incluso no son necesariamente provenientes de universidades sino de instituciones privadas. Estas actividades de relación con entidades extranjeras permiten a las redes de colaboración en México tener un acercamiento a las tecnologías que emplean los países líderes del sector.

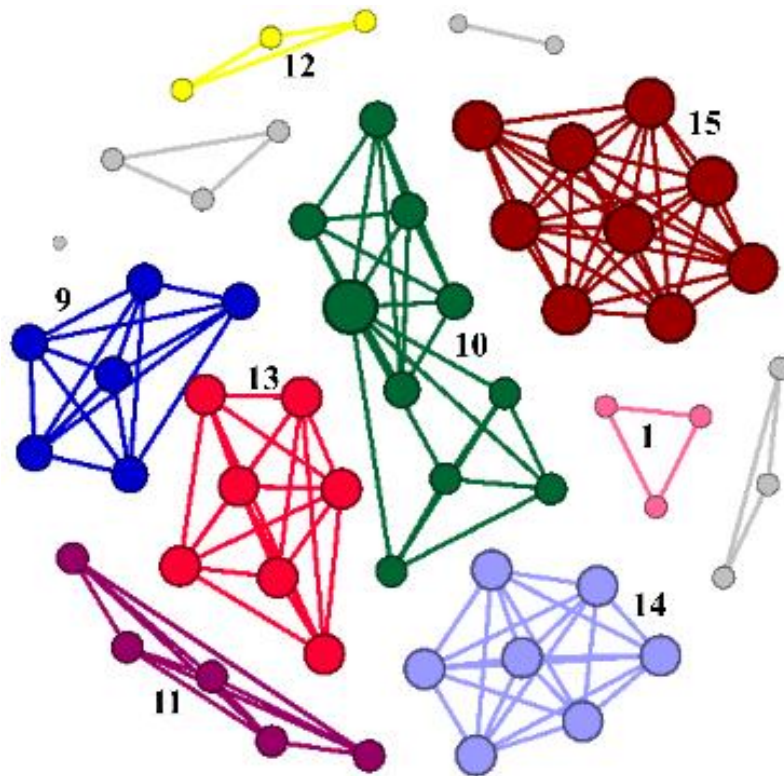
En este periodo inicial, destacan los recursos reputacionales (Tolstoy & Agndal, 2010), que dotan de capacidad a los investigadores que colaboran con científicos afiliados a instituciones extranjeras y a su vez, esto propicia las condiciones para la colaboración a largo plazo.

De manera similar al argumento de Cohen y Levinthal (1990), donde mencionan que los procesos de innovación de una organización se componen de elementos tanto internos como



externos, la producción de artículos científicos requiere que una organización aprenda continuamente más allá de sus fronteras (McMillan, Narin, & Deeds, 2000). Esto se ve reflejado de la misma manera en la red, los clústeres con mayor vinculación hacia el extranjero presentan mayores capacidades de producción de conocimiento.

## 6.2. Periodo de crecimiento de clústeres (entre los años 2005 y 2009)



*Figura 10 Red de colaboración del sector biomédico en México, comprendido entre los años 2005 al 2009. Fuente: Elaboración propia.*

Un periodo siguiente, comprendido entre los años 2005 y 2009, muestra un aumento en la colaboración entre autores de artículos científicos con respecto al periodo anterior. No así un aumento considerable en la producción científica. Los autores que participan en esta red de colaboración llegan a 59 y las coautorías a 141, lo que refleja también un aumento en el promedio de coautores por artículo científico con 4.78 autores.

Sin embargo, la densidad de la red baja a 8.2% y esto es debido a que los grupos de colaboración aumentan en su cantidad de autores significativamente, pero los autores

entrantes tienen una baja relación con estos grupos grandes y en ocasiones no tienen relación alguna, esto genera que el coeficiente de *clustering*, que es el porcentaje de autores relacionados con algún autor, sea quien sea, baje al 99%.

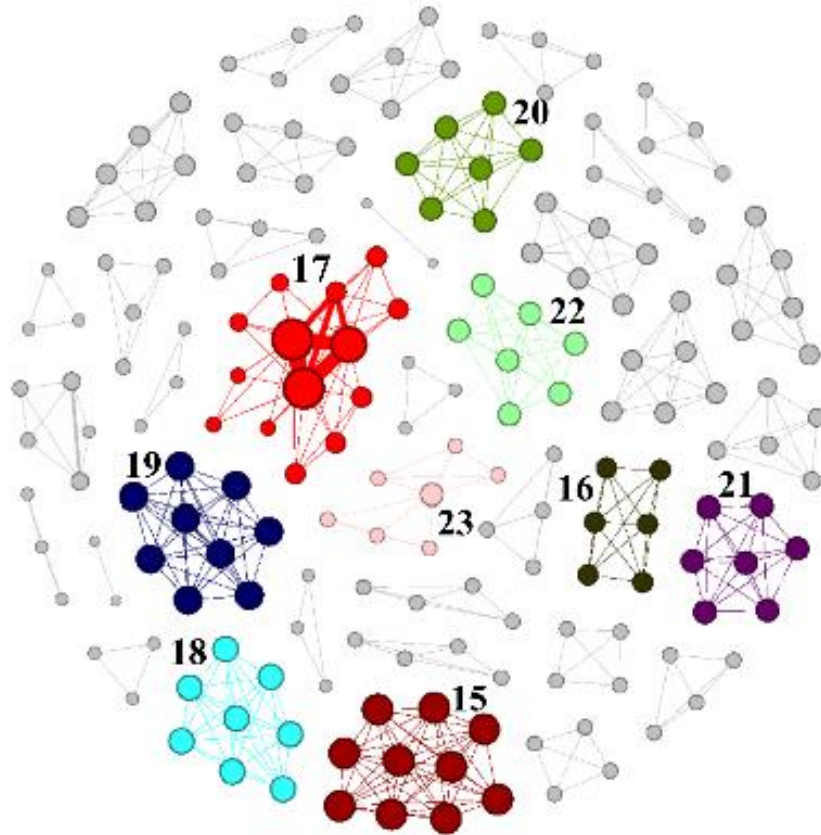
*Tabla 8 Análisis de tecnologías y autores por grupo de colaboración en el periodo comprendido entre los años 2005 al 2009. Fuente: Elaboración propia.*

Grupo	Tecnología	Número de autores	Autores	Organización
1	Bioquímica	3	Castillo V., Gonzalez R., Suaste E.,	CINVESTAV-IPN
9	Redes neuronales	6	Vega Carrillo H.R., Hernandez Davila V.M., Manzanares Acuña E., Gallego E., Lorente A., Iñiguez M.P.	Universidad Autónoma de Zacatecas, Universidad Politécnica de Madrid, Universidad de
10	Ciencia de materiales	10	Almaguer Flores A., Olivares Navarrete R., Lechuga Bernal A., Ximenez Fyvie L.A., Rodil S.E., Ramirez C., Olivares R., Arzate H., Reyes Gasga J., Magaña	Universidad Nacional Autónoma de México; Department of Biomedical Engineering, Georgia Institute of Technology;
11	Salud	5	Espinosa R., Valencia R., Uribe M., Ceja I., Saadia M.	Universidad de Guadalajara, Universidad Tecnológica de
12	Biomateriales	3	Miretzky P., Muñoz C., Carrillo Chavez	Centro de Geociencias-UNAM
13	Bioquímica	7	Mellado M.C.M., Mena J.A., Lopes A., Ramirez O.T., Carrondo M.J.T., Palomares L.A., Alves P.M.	
14	Bioquímica	7	Tristan F., Palestino G., Menchaca J.L., Perez E., Atmani H., Cuisinier F., Ladam	
15	Impresión 3D	9	Madrazo I., Zamorano C., Magallon E., Valenzuela T., Ibarra A., Salgado Ceballos H., Grijalva I., Franco Bourland R.E., Guizar Sahagun G.	Neuroscience Center, Hospital Angeles; Research Unit for Neurological Diseases, IMSS; Biochemistry, Instituto Nacional de Rehabilitación;

De los datos recopilados mediante las bases de *Web of Science* y *Scopus*, se encontró que sólo 1 de los 8 grupos principales de la red de colaboración en este periodo colabora con instituciones internacionales, siendo ésta una institución española; sin embargo, los datos encontrados no permiten mostrar las organizaciones a las que pertenecen dos de estos grupos principales. Según estos datos, se puede indagar que los grupos en general han colaborado menos que el periodo anterior.

El grupo 10, el cuál colaboró con el Instituto Tecnológico de Georgia, de los Estados Unidos, es el clúster más numeroso de la red de colaboración, con 10 autores presentes, además que la tecnología en la cual este grupo trabaja es Ciencia de materiales, que es junto con la Bioquímica, las tecnologías más relevantes en este periodo.

### 6.3. Periodo de la Red de Colaboración y diversificación de tecnologías (entre los años 2010 y 2014)



*Figura 11 Red de colaboración del sector biomédico en México, comprendido entre los años 2010 al 2014. Fuente: Elaboración propia.*

En comparación con los dos periodos anteriores, este periodo presenta un crecimiento acelerado en relación con la productividad científica y la cantidad de coautores presentes en la red. El número de clústeres aumenta llegando a 37, pero se mantiene una baja densidad de la red con sólo un 2.4%.

El comportamiento del periodo anterior, donde los nuevos autores se relacionan con un bajo número de autores se mantiene; así mismo, los grupos ya presentes desde el periodo anterior aumentan en número de autores, lo que genera un aislamiento aparente de los nuevos grupos pequeños y esto contribuye a la baja densidad de la red y al alto número de clústeres.

Tabla 9 Análisis de tecnologías y autores por grupo de colaboración en el periodo comprendido entre los años 2010 al 2014. Fuente: Elaboración propia.

Grupo	Tecnología	Número de autores	Autores	Organización
15	Impresión 3D	9	Madrazo I., Zamorano C., Magallon E., Valenzuela T., Ibarra A., Salgado Ceballos H., Grijalva I., Franco Bourland R.E., Guizar Sahagun G.	Neuroscience Center, Hospital Angeles; Research Unit for Neurological Diseases, IMSS; Biochemistry, Instituto Nacional de Rehabilitación;
16	Potencial bioeléctrico	6	Rendon Nava A.E., Diaz Mendez J.A., Nino De Rivera L., Calleja Arriaga W., Gil Carrasco F., Diaz Alonso D.,	Instituto Politécnico Nacional (IPN), ESIME UC; Electronics Department, INAOE; APEC;
17	Radiación /Biomateriales	14	Hiriart Ramirez E., Contreras Garcia A., Garcia Fernandez M.J., Concheiro A., Alvarez Lorenzo C., Bucio E., Muñoz Muñoz F., Magariños B., Ramirez Jimenez A., Vazquez Gonzalez B., Melendez Ortiz H.I., Diaz Gomez L., Garcia Uriostegui L., Burillo G.,	Universidad Nacional Autónoma de México; Department of Engineering Physics, École Polytechnique; Universidad de Santiago de Compostela
18	Campos magnéticos	8	Juarez Aguirre R., Dominguez Nicolas S.M., Manjarrez E., Tapia J.A., Figueras E., Vazquez Leal H., Aguilera Cortes L.A., Herrera May A.L.	Universidad Veracruzana; CINVESTAV-IPN; Institute of Physiology, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Microelectronic Institute of Barcelona IMB-CNM, CSIC; Universidad de Guanajuato;
19	Análisis de imagen	9	Vera Urquiza R., Bourlon Cuellar R., Ojeda Lopez C., Martinez Balbuena M.M., Mora Arias T.T., Sanchez Reyes P.A., Gunther Manzano G., Kramis Hollands M., Conde Espinosa R.	Hospital Angeles del Pedregal, Mexico
20	Salud	7	Robles Ramirez F., Navarro Bonnet J., Chiquete E., Gonzalez Cornejo S., Ramirez Huerta C.A., Bañuelos Acosta R., Ruiz Sandoval J.L.	Hospital Civil de Guadalajara Fray Antonio Alcalde; Departamento de Neurorradiología, Bañuelos Radiólogos; Departamento de Neurociencias, CUCS, Universidad de Guadalajara;
21	Salud	7	Paranjpe A., De Gregorio C., Gonzalez A.M., Gomez A., Silva Herzog D., Piña A.A., Cohenca N.	University of Washington; Universidad Europea de Madrid; University of San Luis Potosí;
22	Salud	7	Vera J., Siqueira Jr. J.F., Ricucci D., Loghin S., Fernandez N., Flores B., Cruz A.G.	University of Tlaxcala; Estácio de Sá University, Rio de Janeiro; Cetraro, Italy; University of Veracruz-UAV; University of Guadalajara;
23	Electroquímica	7	Castaneda I.E., Gonzalez Rodriguez J.G., Colin J., Neri Flores M.A., Ruiz J.A., Rosales I., Uruchurtu J.,	

En este periodo, para los 8 grupos líderes en producción científica y colaboración, en 4 de ellos se tiene alguna colaboración con organizaciones extranjeras. De estas, 3 colaboran con países líderes en producción científica del sector biomédico, siendo estos Francia, España y Estados Unidos, dejando de lado la colaboración con organizaciones inglesas.

El grupo 17 resulta uno de los grupos más importantes para la producción científica en México tanto en este como en un siguiente periodo. Este clúster trabaja sobre tecnologías de radiación y biomateriales en conjunto, además de que la colaboración se realiza con organizaciones francesas y chilenas, lo que refleja en un grupo de colaboración grande,

siendo este de 14 investigadores y científicos. Además, este grupo de colaboración contribuye fuertemente a la producción de artículos científicos sobre biomateriales, que es una de las tecnologías más relevantes en este periodo.

Por otro lado, es prudente mencionar que, siendo el tema de Salud el más relevante, este se denota en los grupos 20, 21 y 22, los cuales trabajan estos temas. Sin embargo, el análisis de imagen solo es trabajado por el grupo 19, siendo este de los grupos más importantes de la red de colaboración. La alta producción de artículos científicos que corresponden al Análisis de imagen está relacionada con clústeres presentes en la red, pero son pequeños y no son considerados como líderes.

#### 6.4. Periodo de madurez de tecnologías presentes en el sector (entre los años 2015 y 2019)

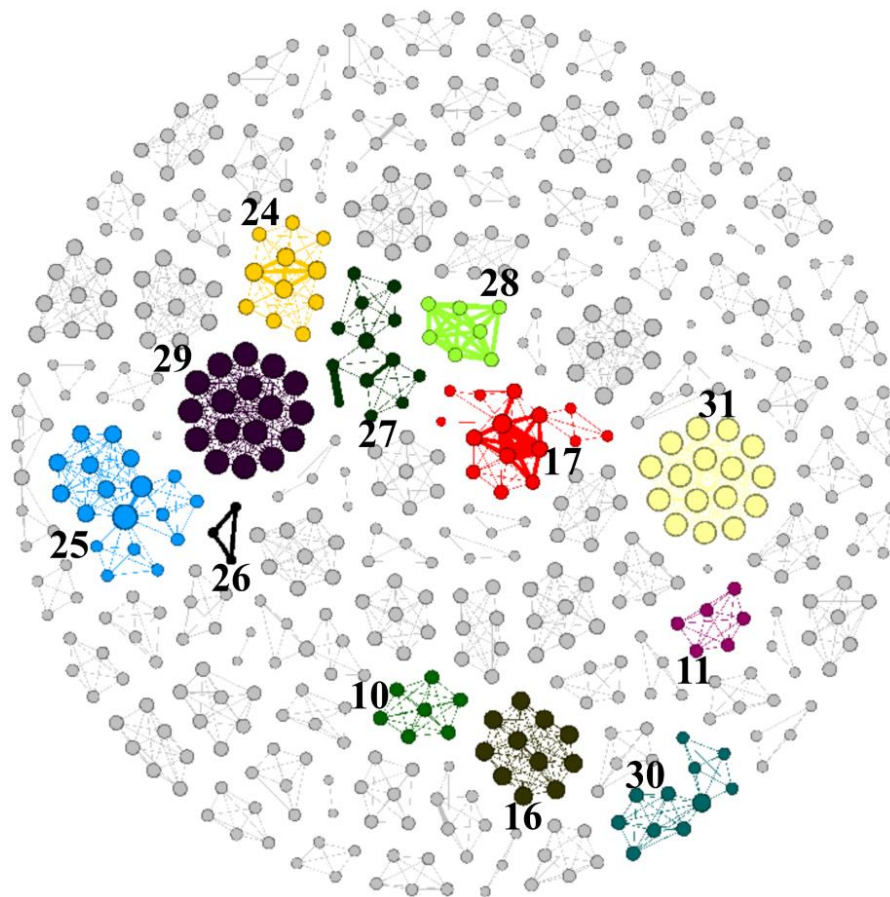


Figura 12 Red de colaboración del sector biomédico en México, comprendido entre los años 2015 al 2019. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de esta red de colaboración tiene un crecimiento acelerado, además de que sugiere la madurez de ciertas tecnologías. Con respecto al periodo anterior hay un aumento en la producción científica del 262%, la red de colaboración aumenta en la cantidad de autores presentes en 293% y el número de clústeres presentes aumenta de manera similar en 254%.

A pesar de estos aumentos significativos, la densidad de la red de colaboración tan solo llega al 1% y esto es debido a la gran cantidad de autores presentes y a la baja relación que existe entre todos ellos, incluso los grupos de colaboración que se mantienen constantes en su mayoría no colaboran entre sí. De darse este comportamiento, disminuirían significativamente los grupos de colaboración en número, pero aumentarían en tamaño y con ello las coautorías y la colaboración se vería beneficiada.

El crecimiento que presenta la red de colaboración también es apoyado por el hecho de que varios grupos de colaboración que surgen en periodos pasados se mantienen en este periodo, siendo los más relevantes los grupos 16 y 17 debido a que tienen un aumento de coautores, así como de coautorías. En el caso de los grupos 10 y 11 se mantienen en activo, pero tienen un decremento en los autores relacionados en estos clústeres. Por otro lado, 5 de los 12 grupos de colaboración trabajan sobre Análisis de imagen, que, si bien ya era una tecnología relevante en el periodo anterior, para este periodo se convierte en la tecnología más relevante.

Aunque la producción científica, así como el tamaño y la cantidad de grupos de colaboración aumenta, no lo hace también la colaboración con organizaciones internacionales, siendo sólo 4 de los grupos líderes los que tienen coautorías con el extranjero. El grupo 17, que en el periodo anterior se mostró como el más relevante y el más colaborativo, en este periodo mantiene su colaboración con Chile además de que continua su desarrollo en estudios sobre Radiación.

Los demás grupos son el 29, 30 y 31, los cuales colaboran con países líderes del sector, siendo estos Inglaterra, Francia, Estados Unidos, Alemania, Italia y Canadá. Destaca el grupo 29 el cual tiene mayor número de coautores con 17, además de que contribuye a la producción científica para el Análisis de imagen.

Los recursos de capital organizacional parecen relevantes, dado que ciertos grupos de investigación que presentan más capacidades para la producción de artículos científicos se

encuentran adscritos a instituciones o universidades relevantes en México, siendo estas principalmente la Universidad Nacional Autónoma de México, el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, el Instituto Politécnico Nacional y el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

Dadas las características presentadas de los campos de conocimiento en este periodo, con respecto a los periodos anteriores en los que los grupos de colaboración presentan investigaciones continuidad en los temas que trabajan, las organizaciones anteriormente mencionadas presentan capacidades en función del conocimiento previo adquirido, conocimiento visto como un recurso inmerso en la red. Entonces, en este caso, los individuos adscritos en las organizaciones con mayores capacidades han tenido acceso a un stock de conocimientos importante, lo que les permite ha permitido generar nuevos conocimientos en diferentes campos (Obstfeld, 2005).

Cohen y Levinthal argumentaron que tales capacidades se encuentran en función del nivel de conocimiento previo relacionado de una organización. Ellos realizaron su investigación la cual sugirió que el aprendizaje individual es acumulativo y que una profundidad y diversidad de conocimientos permite al individuo asimilar y aplicar el conocimiento de un amplio número de áreas (Cohen & Levinthal, 1990). El concepto de capacidad de absorción enfatiza la importancia del conocimiento técnico previo relacionado como base para la innovación, la investigación y el desarrollo exitosos. Esto con relación al incremento en las capacidades mostradas por la red de colaboración en este periodo de tiempo.

Tanto para el periodo 2019-2015 y el periodo inmediato anterior 2014-2010, siendo estos los periodos de mayor crecimiento en cuanto a producción científica, investigadores presentes en la red y de mayor cantidad de *clústeres*, se destacan los recursos de capital humano y de capital organizacional. En estos periodos destacan actores que son centrales en ciertos clústeres de la red de colaboración, que sin la presencia de estos el *clúster* se rompería y dejaría grupos de colaboración mucho más pequeños. La producción científica se encuentra relacionada positivamente como resultado de un "efecto de recursos" (Breschi, Lissoni, & Montobbio, 2005), siendo estos los propuestos inicialmente por Barney (1991): recursos de capital físico, de capital humano y de capital organizacional.

Tabla 10 Análisis de tecnologías y autores por grupo de colaboración en el periodo comprendido entre los años 2015 al 2019. Fuente: Elaboración propia.

Grupo	Tecnología	Número de autores	Autores	Organización
10	Ciencia de materiales	7	Bahrami A., Alvarez J.P., Depablos Rivera O., Mirabal Rojas R., Ruiz Ramirez A., Muhl S., Rodil S.E.	
11	Ciencia de materiales	6	Cruz A., Mercado Soto C.G., Ceja I., Gascon L.G., Cholico P., Palafox Sanchez C.A.,	Research Institute in Biomedical Sciences, CUCS, University of Guadalajara
16	Potencial bioeléctrico	11	Diaz Alonso D., Moreno Moreno M., Zuñiga C., Molina J., Calleja W., Cisneros J.C., De Rivera L.N., Ponomaryov V., Gil F., Guillen A., Rubio E.	INAOE, Puebla; UPAEP, Puebla; IPN-ESIME, National Polytechnic Institute of Mexico; Hospital Luis Sanchez Bulnes, APEC; CINVESTAV-IPN; CUVyTT, BUAP;
17	Radiación	17	Muñoz Muñoz F., Contreras García A., Burillo G., Bucio E., Melendez Ortiz H.I., Alvarez Lorenzo C., Concheiro A., Ortega A., García Uriostegui L., Avila Soria G., Pino Ramos V.H., Lopez Saucedo F., Magariños B., Flores Rojas G.G., Lopez Saucedo J., Lopez Saucedo F., Lopez Saucedo J.,	Universidad Nacional Autónoma de México; Universidad de Santiago de Compostela; CONACyT-Centro de Investigaciones en Química Aplicada; CONACyT-DMCyP-Universidad de Guadalajara; Institute of Marine Sciences and Limnology (ICML) of the National Autonomous University of Mexico (UNAM);
24	Bioquímica	11	Galindo De la Rosa J., Arjona N., Moreno Zuria A., Ortiz Ortega E., Guerra Balcazar M., Ledesma Garcia J., Arriaga L.G., Alvarez A., Dector A., Chavez Ramirez A.U., Vallejo Becerra V.,	Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica; Universidad Autónoma de Querétaro; Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Unidad Tijuana; CONACyT and Universidad Tecnológica de San Juan del Río;
25	Biomoléculas/ Microbiología	18	Aguilar Zarate P., Wong Paz J.E., Rodriguez Duran L.V., Buenrostro Figueroa J., Michel M., Saucedo Castañeda G., Favela Torres E., Ascacio Valdes J.A., Contreras Esquivel J.C., Aguilar C.N.; Pat Espadas A.M., Razo Flores E., Rangel Mendez J.R., Ascacio Valdes J.A., Cervantes F.J., Delgado Garcia M., Nicolaus B., Poli A., Rodriguez Herrera R.,	Universidad Autónoma de Coahuila; Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, Tecnológico Nacional de México; Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa; Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT);
26	Análisis de imagen	3	Jaramillo Nuñez A., Sanchez Rinza B.E., Perez Meza M.	Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica; Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Universidad de la Sierra Sur;
27	Análisis de imagen /Electricidad	13	Toledo Peral C.L., Gutierrez Martinez J., Mercado Gutierrez J.A., Martin Vignon Whaley A.I., Vera Hernandez A., Leija Salas L., Salazar Varas R., Vazquez R.A., Carino Escobar R.I., Cantillo Negrete J., Carrillo Mora P., Barraza Madrigal J.A., Arias Carrion O.	Universidad de las Americas Puebla; Universidad La Salle México; Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra; CINVESTAV- IPN; ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional; Hospital General Dr. Manuel Gea González;
28	Análisis de imagen	7	Batres Mendoza P., Montoro Sanjose C.R., Guerra Hernandez E.I., Almanza Ojeda D.L., Rostro Gonzalez H., Romero Troncoso R.J., Ibarra Manzano M.A.	Universidad de Guanajuato;
29	Análisis de imagen	17	Ning L., Laun F., Gur Y., DiBella E.V.R., Deslauriers-Gauthier S., Megherbi T., Ghosh A., Zucchelli M., Menegaz G., Fick R., St-Jean S., Paquette M., Aranda R., Descoteaux M., Deriche R., O'Donnell L., Rath Y.	Harvard Medical School; German Cancer Research Institute; IBM Almaden Research Center; Utah Center for Advanced Imaging Research (UCAIR), University of Utah; Nanyang Technological University, Singapore; ParIMed Team, LRPE, USTHB, Algiers, Algeria; Athena Project-Team, Inria Sophia Antipolis-Méditerranée, France; University of Verona, Italy; Université de Sherbrooke, Canada; Centro de Investigación en Matemáticas, Mexico,
30	Análisis de imagen	11	Vega R., Hernandez Reynoso A.G., Linn E.K., Fuentes Aguilar R.Q., Sanchez Ante G., Santos Garcia A., Garcia Gonzalez A., Antelis J.M., Gudiño Mendoza B., Falcon L.E., Sossa H.	Tecnológico de Monterrey, Campus Guadalajara; Massachusetts Institute of Technology; Universidad Politécnica de Yucatán; Instituto Politécnico Nacional-CIC;
31	Redes neuronales	16	Cintas C., Quinto Sanchez M., Acuña V., Paschetta C., De Azevedo S., De Cerqueira C.C.S., Ramallo V., Gallo C., Poletti G., Bortolini M.C., Canizales Quinteros S., Rothhammer F., Bedoya G., Ruiz Linares A., Gonzalez Jose R., Delrieux C.	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas; Universidad Nacional Autónoma de México; University College London; Superintendência da Polícia Técnico-Científica Do Estado de São Paulo; Universidad Peruana Cayetano Heredia; Universidade Federal Do Rio Grande Do sul; UNAM; Universidad de Tarapacá; Universidad de Antioquia; Fudan University; Aix Marseille Univ; Universidad Nacional Del sur;



Si bien los resultados mostrados no confirman que estas instituciones tengan características descritas por Barney como la estructura formal de informes de una empresa, sus sistemas formales e informales de planificación, control y coordinación eficientes, así como las relaciones informales entre grupos dentro de una organización y entre individuos de manera óptima dado que estos no son los objetivos de esta investigación, es probable que estas instituciones cuentan con dichos recursos, lo que le permitiría a los científicos afiliados brindar los resultados positivos aquí mostrados.

Además, el conocimiento técnico de los actores que más publican en los grupos de colaboración se ve relacionado con el concepto de capacidad de absorción. Esto es debido a que, a mayor capacidad de absorción, los actores demostraron mejores resultados en los últimos años en su producción científica.

En estos dos últimos periodos de tiempo analizados se muestra una similitud con los resultados obtenidos por Burt (1992), en donde él concluye que la construcción de redes con un gran número de vínculos indirectos puede ser una forma efectiva para que los actores disfruten de los beneficios del tamaño de la red sin pagar los costos de mantenimiento de la red asociados con los vínculos directos. Lo que se ve reflejado debido a que ciertos investigadores, que, aunque no son centrales en los *clústeres*, si mantienen una alta producción científica y que, con el paso del tiempo, al aumentar la producción científica de estos *clústeres*, también aumenta la relevancia de estos investigadores en la red de colaboración.

### **6.5. Continuidad en los grupos de investigación presentes en las redes de colaboración**

Ciertos grupos de colaboración presentan continuidad entre periodos de tiempo, esto es debido a que algunos investigadores se mantienen activos realizando publicaciones científicas sobre temas de ingeniería biomédica. Esta colaboración, como mencionan Melin y Persson (1996), es una forma intensa de interacción, que permite una comunicación eficaz, así como el intercambio de competencias y otros recursos de los investigadores en cada *clúster*.




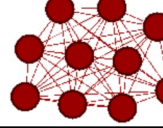
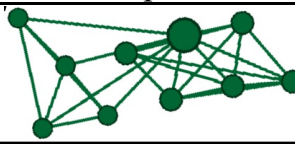
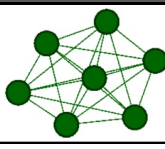
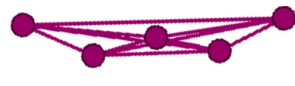
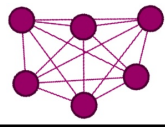

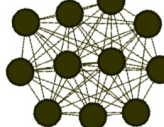

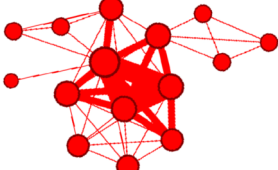
Sin embargo, estos grupos de colaboración no se mantienen constantes con el tiempo. Como se mostró en apartados anteriores, la cantidad de publicaciones, así como los coautores que componen estos clústeres, fluctúa, en la mayoría de los casos, de manera positiva. Es decir, agregan un mayor número de científicos colaborando en estos grupos, además de que su producción de artículos científicos aumenta. Estos son los casos de los grupos 1, 15, 11, 16 y 17 (ver tabla 11), los cuales muestran un aumento de científicos lo que contribuye que estos clústeres se vean aumentados en tamaño con relación a la red.

Curiosamente, los grupos de colaboración no siempre se mantienen constantes publicando entre periodos, los grupos 10 y 11 tuvieron ambos un periodo ausente donde no se detecta actividad de alguno de sus investigadores durante el periodo 2010-2014, pero sí se encuentran publicaciones en un periodo anterior 2005-2009 al igual que un periodo posterior 2015-2019. En cambio, el resto de los grupos de colaboración mostrados en la Figura XX tienen continuidad entre periodos.

Un aspecto importante que resaltar es la continuidad en las tecnologías de las cuales trabajan estos grupos. De los grupos mostrados, los números 1, 16 y 10 se mantienen trabajando sobre los temas que comenzaron trabajando desde un primer periodo. El grupo 11 presenta un cambio en las líneas de investigación, mientras en un primer periodo 2005-2009 publica sobre temas de salud, para un periodo 2015-2019 este mismo grupo comienza a publicar sobre Estructuras 3D.

El caso del grupo 17 presenta el comportamiento más interesante de entre todos los grupos presentes en las redes de colaboración ya que si bien un artículo científico está relacionado a alguna tecnología en específico, las publicaciones de este grupo son realizadas sobre varias tecnologías. En general, los grupos de colaboración se presentan con investigadores que provienen de disciplinas diferentes y complementarias, pero las publicaciones del grupo son sobre un tema en específico.

Tabla 11 Continuidad de grupos de colaboración presentes en el sector biomédico. Fuente: Elaboración propia.

Periodo			
2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019
			
Grupo 1	Grupo 1		
			
	Grupo 15	Grupo 15	
			
	Grupo 10		Grupo 10
			
	Grupo 11		Grupo 11
			
		Grupo 16	Grupo 16
			
		Grupo 17	Grupo 17

El contraste en este efecto de aumento de agentes en los clústeres se da en el grupo 10, debido a que este grupo en un primero periodo 2005-2009 presenta 10 investigadores con una densidad de red muy baja, en cambio, para el periodo 2015-2019 este grupo presenta 7 investigadores, pero esta vez con una densidad de red mayor. Esto significa que disminuyó el número de autores de artículos científicos, pero se encuentran más interrelacionados entre sí.

## **7. Análisis de competencias de las redes de colaboración**

Para realizar el análisis de las competencias de las redes de colaboración, es pertinente recordar algunas capacidades descritas en el apartado 3.1.2 Capacidades.

En primera instancia, la capacidad de absorción se vuelve relevante debido a que ésta permite a la organización reconocer nueva información, asimilarla y aplicarla con fines comerciales, principalmente. Para las organizaciones estudiadas, las cuales son principalmente universidades, el fin es extender las fronteras de conocimiento en el sector biomédico por medio de la producción de artículos científicos. Esta actividad genera un efecto de dependencia de estas organizaciones hacia el conocimiento externo, con el fin de mejorar sus esfuerzos internos de innovación (McMillan, Narin, & Deeds, 2000).

Pero este concepto de capacidad de absorción no sólo es aplicable a las organizaciones, sino también para los científicos e investigadores que se encuentran presentes en los clústeres, dado que la vinculación de estos les permite interiorizar conocimientos para su aplicación. A su vez, esto genera un efecto del flujo de conocimiento en una organización, como una capacidad para dispersar el conocimiento tanto dentro como fuera de la organización hacia la red de colaboración, ya sea con investigadores nacionales o incluso extranjeros.

Por consiguiente, la proximidad social reduce la necesidad de búsqueda al facilitar la transmisión de este conocimiento y posterior absorción. Existen investigadores que son parte de grupos de colaboración que generan una producción de artículos científicos alta, esto es reflejo de las conexiones sociales más cercanas con las que cuentan; esto les brinda un mejor acceso a la red de colaboración, en comparación con que los individuos con conexiones distantes o sin conexiones, como se mostró en algunos clústeres en los periodos 2000-2004 y 2005-2009. Así, los resultados arrojados por esta investigación refuerzan la propuesta de que las conexiones más cercanas otorgan un mejor acceso a la red (Sorenson, Rivkin, & Fleming, 2006).

Como resultado de esta investigación, se destaca el papel de la proximidad institucional, que a su vez se encuentra ligado al recurso de capital organizacional propuesto por Barney (1991). Esta capacidad, si bien pareciera no resultar en principio tan relevante como los primeros tres puntos mencionados, es pertinente realizar una definición de esta capacidad de la propia

organización para explicar la producción de conocimiento y el comportamiento de la red de colaboración con respecto a las organizaciones (principalmente academia) en el sector biomédico. Esta es definida por la similitud de restricciones informales y reglas formales compartidas por las organizaciones, donde representaciones, rutinas e incentivos comunes permiten a las organizaciones realizar una transferencia de conocimiento eficiente (Balland, 2012)

### 7.1. Dinámica de la productividad académica

El recuento del número de autores que contribuyen a la producción de un artículo científico muestra un índice del grado de colaboración entre los autores del sector biomédico. Mientras en los periodos de los años 2000 al 2004 y 2005 al 2009, la cantidad de autores que contribuyen en una publicación es relativamente baja, teniendo un promedio de 1.8 autores por publicación, para los periodos de los años 2010 al 2014 y del año 2015 al 2019 esta cifra aumenta, teniendo promedios de colaboración por artículo científico de 5 y 9 colaboradores respectivamente para cada periodo (ver figura 14).

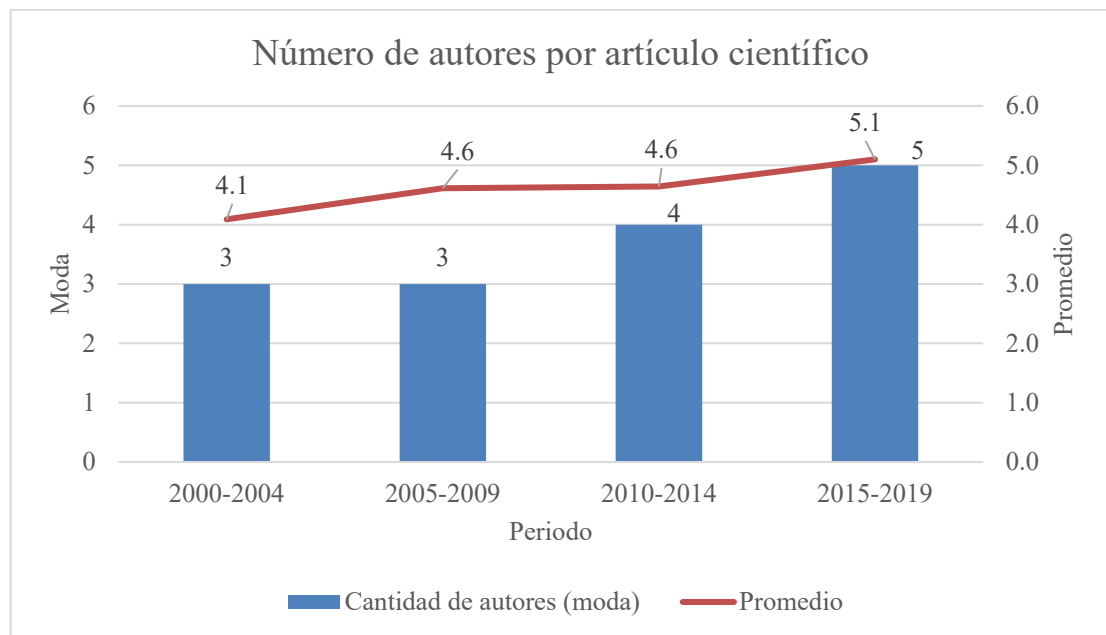


Figura 13 Análisis del número de autores que colaboran para la generación de un artículo científico, incluyendo los periodos 2000-2004, 2005-2009, 2010-2014 y 2015-2019. Fuente: Elaboración propia.

Este comportamiento en las redes de colaboración nos permite entender en primera instancia que la colaboración entre autores se ha incrementado con los años, teniendo incluso artículos científicos donde participan hasta 16 o 17 autores por artículo científico.

### 7.1.1. Producción por autor

Este tipo de análisis elabora una lista de los autores más productivos, así como el número total de publicaciones. El porcentaje de publicaciones de estos autores con respecto al número total de publicaciones incluidas en el estudio o durante el período de tiempo en que han sido más productivas también incluye en este análisis descriptivo.

La producción por autor es relevante porque nos permite reconocer a los autores más productivos en el sector, analizando este número de publicaciones con respecto al total de publicaciones desde el año 2000 al año 2019 se detecta el porcentaje de participación de estos autores principales.

Por conveniencia analítica, se realiza un análisis de producción por autor tomando en cuenta el reconocimiento que las bases de datos usadas, en este caso *Scopus* y *Web of Science*, les conceden a los autores mediante sus publicaciones de artículos científicos, así se extraen los autores líderes por base de datos de la siguiente manera:

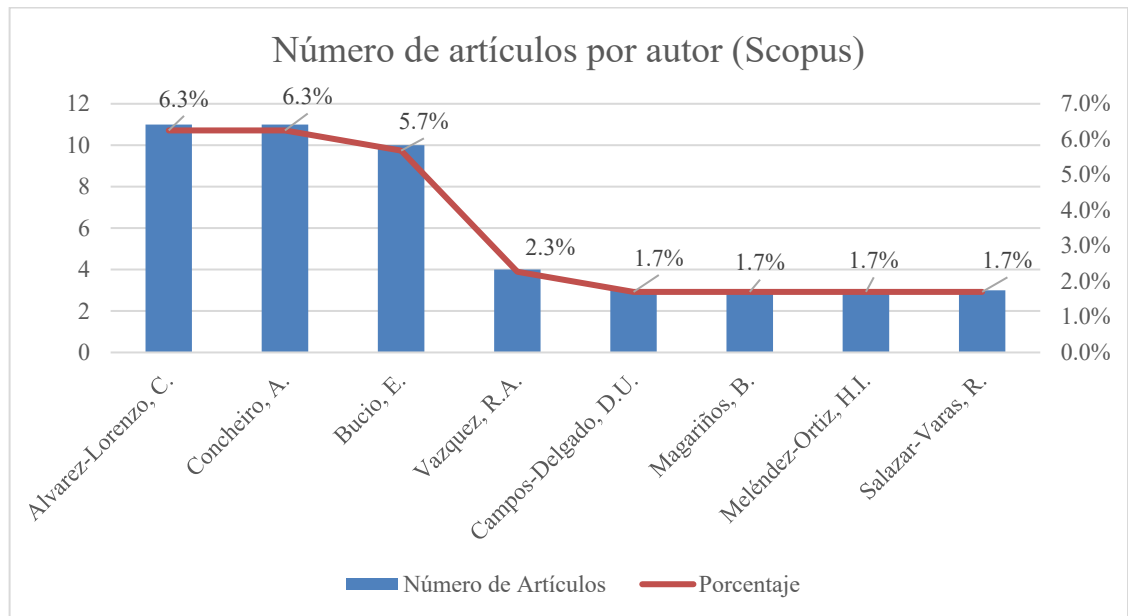


Figura 14 Análisis del número de artículos científicos presentados por autor, mostrando su relación con el porcentaje del total de artículos publicados, en el periodo del año 2000 al año 2019. Considerando la porción de la base de datos obtenida de Scopus. Fuente: Elaboración propia.

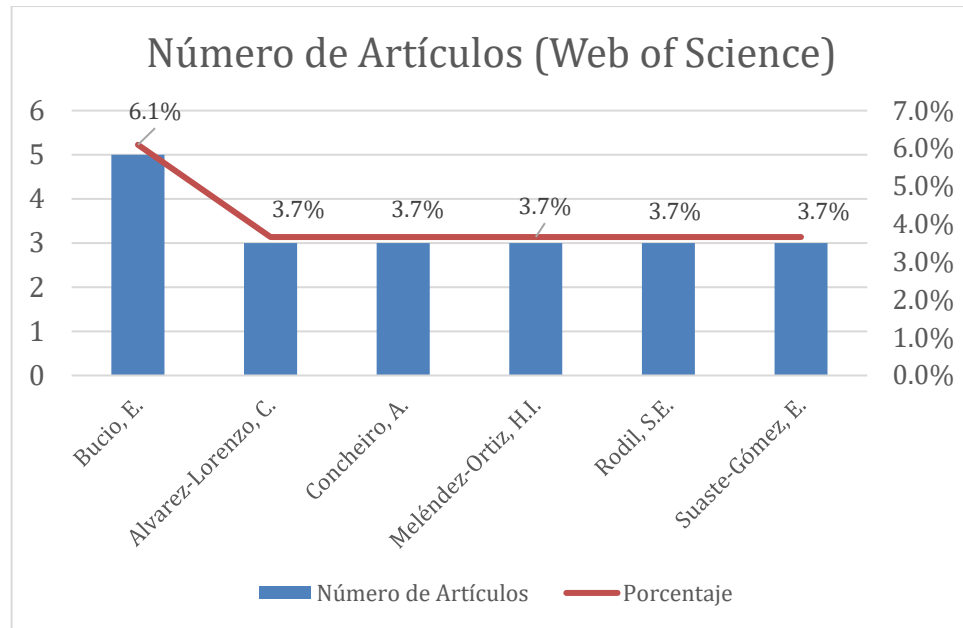


Figura 15 Análisis del número de artículos científicos presentados por autor, mostrando su relación con el porcentaje del total de artículos publicados, en el periodo del año 2000 al año 2019. Considerando la porción de la base de datos obtenida de Web of Science. Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas donde se muestra el número de artículos, tanto de *Scopus* como *Web of Science* (figuras 15 y 16, respectivamente), se destacan los primeros tres autores, líderes en la producción de artículos científicos, siendo estos Alvarez-Lorenzo C., Cocheiro, A. y Bucio, E. Ambas bases de datos reconocen una diferente cantidad de artículos científicos y esto se ve reflejado en la diferencia de artículos detectados por Scopus y Web of Science. Así mismo, el porcentaje que contribuye cada uno de estos autores varía de entre 5.7% y 6.3% del total de publicaciones del sector en Scopus, es decir, estos tres autores contribuyen con el 18.2% del total.

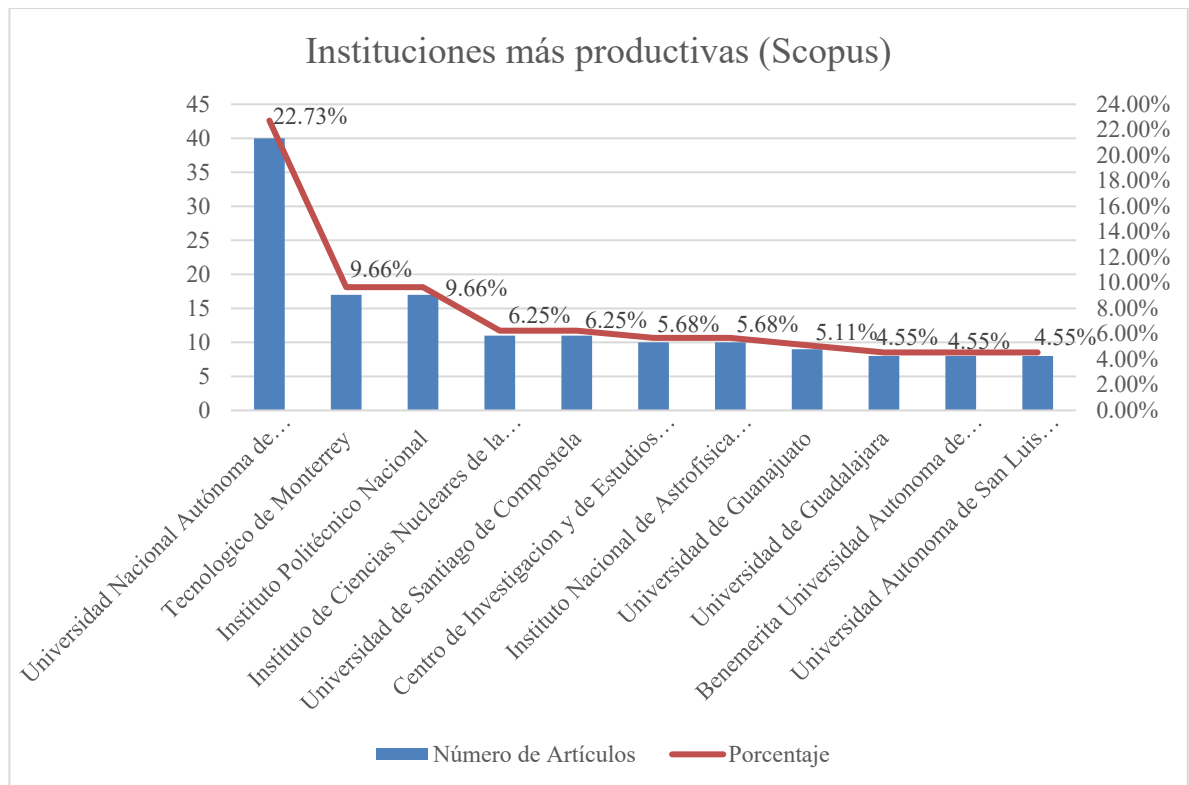
Para el caso de la base de datos de Web of Science, Bucio contribuye con un 6.1%, en contraste con Alvarez-Lorenzo y Concheiro, quienes contribuyen con el 3.7% respectivamente. Esto refleja una contribución de las publicaciones totales del 13.4%.

## 7.2. Análisis de las organizaciones

Es pertinente reconocer a las instituciones a las que están afiliados los diferentes autores que componen ambas bases de datos empleadas en este trabajo de investigación. En este sentido, se retoman a las instituciones que aportan por lo menos ocho artículos científicos para el

sector durante el periodo del año 2000 al año 2019. De esta manera se reconocen a las instituciones que tienen una mayor producción científica.

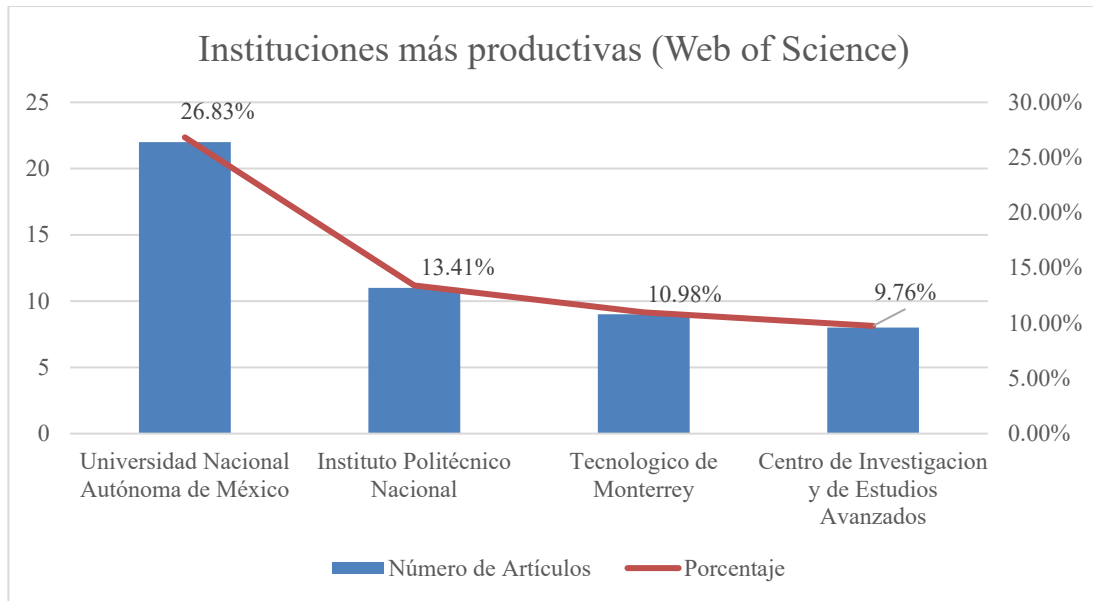
De la misma manera que se realizó en el apartado de Producción por autor, es oportuno realizar este ranking de producción de instituciones explorando de manera separa ambas bases de datos.



*Figura 16 Análisis de las organizaciones más productivas en el sector biomédico, mostrando su relación con el porcentaje del total de artículos publicados, en el periodo del año 2000 al año 2019. Basado en la porción de la base de datos obtenida de Scopus. Fuente: Elaboración propia.*

En ambas bases de datos se tiene un reflejo de la importancia de la Universidad Nacional Autónoma de México, ya que contribuye con por lo menos el 22% del total de las publicaciones en el sector (22% de *Scopus* y 26.8% de *Web of Science*). Las siguientes instituciones que contribuyen fuertemente a la producción científica son el Instituto Politécnico Nacional y el Tecnológico de Monterrey, los cuales contribuyen con un promedio del 10% del total.





*Figura 17 Análisis de las organizaciones más productivas en el sector biomédico, mostrando su relación con el porcentaje del total de artículos publicados, en el periodo del año 2000 al año 2019. Considerando la porción de la base de datos obtenida de Web of Science. Fuente: Elaboración propia.*

Es de destacarse la capacidad de absorción presentada por las instituciones líderes en el sector, capacidad que les permite reconocer nueva información, asimilarla y aplicarla con fines de producción de conocimiento científico y ciencia básica. Así mismo, denotando la producción científica de los investigadores anteriormente presentados y comparándolos con las instituciones a las que son afiliados, es importante señalar la contribución de estas organizaciones en la construcción de nuevo conocimiento mediante la búsqueda para llenar los vacíos y corregir los errores de transmisión de entre individuos de estas organizaciones; esto debido a que con las nuevas tendencias tecnológicas la investigación se torna compleja a medida que también evolucionan las tecnologías. Además, estas organizaciones muestran capacidades de aprendizaje al interior, al alentar a sus individuos a construir vínculos de colaboración externos en lugar de simplemente abrir divisiones relacionadas con “clústeres de alta tecnología” con la esperanza de que la generación de conocimiento se produzca por sí sola.

Por otro lado, esta investigación muestra una convergencia con respecto al estudio mostrado por Ahuja (2000), el cual concluye, entre otras cosas, que las redes de colaboración entre organizaciones están asociadas con diferentes tipos distintos de beneficios de la red. Principalmente, pueden proporcionar el beneficio de compartir recursos, lo que permite a las

organizaciones combinar conocimientos, habilidades y activos físicos. Estos recursos son finalmente a los que tienen acceso los investigadores los cuales son los productores, en su mayoría, de conocimiento en el sector biomédico en México.

Por otra parte, el número de vínculos directos de estas organizaciones, mostrados mediante las relaciones sociales de los individuos afiliados en cada clúster, afecta positivamente su producción científica al proporcionar tres beneficios sustantivos: intercambio de conocimientos, complementariedad para la búsqueda de nuevas tendencias y la escala o aumento de producción científica (e incluso para el aprovechamiento por parte del sector industrial). Esto es que, primero, los vínculos directos permiten compartir conocimientos clave. Cuando las organizaciones colaboran para desarrollar una tecnología, el conocimiento resultante está disponible para todos los colaboradores, tanto dentro como fuera mediante los investigadores relacionados de organizaciones externas. Por lo tanto, cada colaborador puede recibir potencialmente una mayor cantidad de conocimiento de un proyecto en colaboración que el que obtendría de una inversión de investigación comparable realizada de forma independiente.

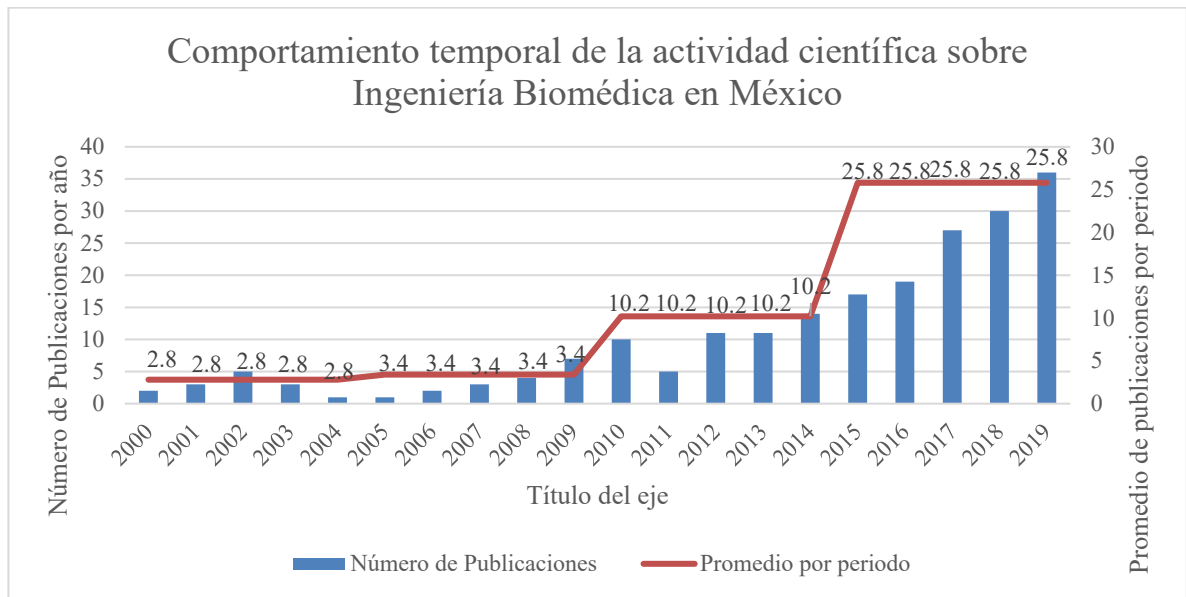
En segundo lugar, la colaboración facilita reunir recursos complementarios de diferentes organizaciones (Ahuja, 2000). La tecnología a menudo exige el uso simultáneo de diferentes conjuntos de recursos y bases de conocimiento en el proceso de innovación. Sin embargo, para las organizaciones es difícil desarrollar competencias amplias y múltiples o mantenerlas frente a los rápidos cambios tecnológicos (Ahuja, 2000).

### **7.3. Evolución temporal de la publicación de artículos científicos**

El comportamiento de la publicación de artículos científicos del sector biomédico en México tiene un aumento gradual, desde el año retomado para esta investigación, el año 2000, hasta el año 2019.

En un primer periodo, comprendido entre los años 2000 al año 2004, se presenta un promedio de 2.8 publicaciones por año. En el siguiente periodo, del año 2005 al año 2009, se detecta un incremento del 21% de las publicaciones por año, con respecto al periodo anterior, es decir, se tienen en promedio 3.4 publicaciones de artículos científicos.

La actividad científica en México sobre el sector biomédico comienza a tener mayor relevancia a partir del siguiente periodo comprendido del año 2010 al año 2014. En este periodo se tiene un promedio de 10.2 artículos científicos publicados. Además, como se muestra en la figura 19, es justamente en el año 2012 donde se da un incremento más acelerado en el número de publicaciones a comparación de los periodos anteriores, concluyendo en el año 2019. En el siguiente periodo, de los años 2015 al 2019, se tiene un promedio de publicaciones de 25.8 artículos científicos por año, cantidad que es muy superior a las mostradas en periodos anteriores.



*Figura 18 Comportamiento temporal de la actividad científica sobre Ingeniería Biomédica en México, incluyendo información del año 2000 al año 2019. Fuente: Elaboración propia.*

Si consideramos sólo los años 2000 y 2009, que es donde comienzan y finalizan estos dos primeros periodos, se tiene un incremento del 250% en las publicaciones en un periodo de 10 años. Así mismo, realizando el mismo análisis de 10 años, pero esta vez comprendido de los años 2010 al 2019, se tiene un incremento del 260% en la publicación de artículos científicos. El año 2010 tiene 10 publicaciones realizadas, mientras que el año 2019 tiene una cantidad de 36 artículos. Considerando este aumento del 260% del periodo 2010 al 2019 y el aumento del 250% reflejado en el periodo 2000 al 2009 muestran que existe un comportamiento de incremento en las publicaciones similar en ambos periodos. Si este comportamiento persiste en los próximos años, las publicaciones por año podrían llegar entonces a 94 artículos por año.

Este comportamiento tiene relevancia debido a que, a partir del periodo 2010-2014, existe un crecimiento mayor en la colaboración de autores por artículo científico en promedio. Esto significa que las redes de colaboración han tenido un aumento en el número de autores por artículo, lo que afecta positivamente la cantidad de publicaciones realizadas por año.

#### **7.4. Identificación de convergencias y brechas con respecto a los países líderes del sector**

Para realizar un análisis del nivel de producción científica mexicana es prudente considerar el contexto internacional. Estos datos fueron colectados retomando la *query* utilizada en el estudio bibliométrico; así también se consideran los dos últimos periodos, de los años 2010-2014 y 2015-2019 debido a que estos son los más recientes y relevantes para la producción científica en México sobre ingeniería biomédica; por último, la base de datos utilizada es *Web of Science* debido a su relevancia internacional.

En primera instancia, se presenta la lista de los 10 países líderes en producción científica en ambos periodos. Destaca la actividad científica de los Estados Unidos, dado que es el país líder, teniendo un porcentaje del 28% en el primer periodo y aumentado incluso en el segundo periodo llegando al 38%, es decir, un incremento del 10%.

Este incremento no significa un decremento en la producción científica del resto de países líderes, por el contrario, en todos los países dentro de este *top* se tiene un incremento en la cantidad de artículos científicos. Siendo los casos más relevantes el de China e India, los cuales tienen un incremento en su producción científica biomédica del 279% y 312% al periodo 2015-2019 con respecto al periodo anterior. En el caso de Estados Unidos, este incremento representó el 133% de su cantidad de artículos científicos publicados.

Es prudente resaltar la actividad científica antes mostrada por las redes de colaboración en México, las cuales describen ciertas colaboraciones con países líderes que se encuentran en esta lista, siendo estos Estados Unidos, Inglaterra, Italia, Canadá, Francia y España. En la red de colaboración mostrada también destacan otros países que colaboran con investigadores mexicanos; sin embargo, éstos no figuran como líderes en producción científica en el sector.

Tabla 12 Países líderes en producción de artículos científicos en los periodos 2010-2014 y 2015-2019. Fuente:  
Elaboración propia

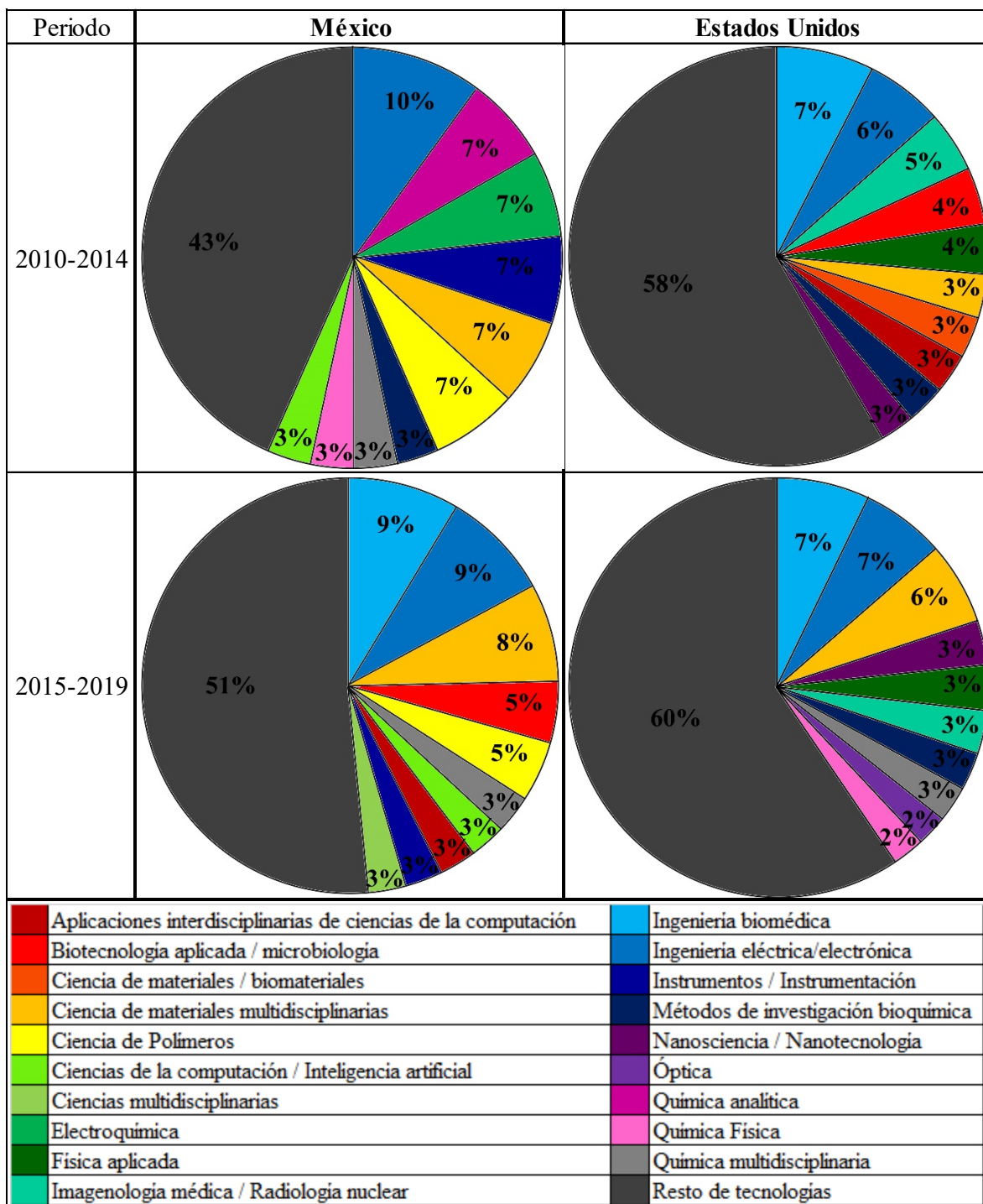
<b>Contexto Internacional</b>					
<b>Periodo</b>		<b>Total Artículos</b>	<b>Principales países</b>		
			<b>País</b>	<b>Cantidad de artículos</b>	<b>Porcentaje del total de artículos</b>
2010	2014	2750	Estados Unidos	783	28%
			China	276	10%
			Alemania	184	7%
			Italia	165	6%
			Canadá	150	5%
			Inglaterra	149	5%
			España	143	5%
			Japón	128	5%
			India	125	5%
			Francia	122	4%
			Resto del mundo	525	19%
2015	2019	4658	Estados Unidos	1041	38%
			China	769	28%
			India	390	14%
			Alemania	303	11%
			Inglaterra	283	10%
			Italia	248	9%
			Canadá	215	8%
			Francia	194	7%
			España	180	7%
			Australia	176	6%
			Resto del mundo	859	31%

Así, considerando a Estados Unidos como país líder del sector, se realizó un análisis comparativo que permite medir la posición de la producción científica en México, así como comparar los temas de investigación en México con respecto al contexto internacional, tomando en consideración al país líder en el sector biomédico (ver tabla 11 y 12).

Tabla 13 Comparativa entre categorías de Web o Science considerando los países de México y Estados Unidos en los periodos de tiempo 2010 al 2014 y 2015 al 2019.

Periodo		México				Estados Unidos			
		Categorías de Web of Science				Categorías de Web of Science			
		Total de categorías	Categorías tecnológicas	Cantidad de artículos	Porcentaje del total de tecnologías	Total de categorías	Categorías tecnológicas	Cantidad de artículos	Porcentaje del total de tecnologías
2010	2014	23	Ingeniería eléctrica/electrónica	3	10%	155	Ingeniería biomédica	117	7%
			Química analítica	2	7%		Ingeniería eléctrica/electrónica	95	6%
			Electroquímica	2	7%		Imagenología médica / Radiología nuclear	74	5%
			Instrumentos / Instrumentación	2	7%		Biotecnología aplicada / microbiología	69	4%
			Ciencia de materiales multidisciplinares	2	7%		Física aplicada	60	4%
			Ciencia de Polímeros	2	7%		Ciencia de materiales multidisciplinares	53	3%
			Métodos de investigación bioquímica	1	3%		Ciencia de materiales / biomateriales	50	3%
			Química multidisciplinaria	1	3%		Aplicaciones interdisciplinares de ciencias de la computación	49	3%
			Química Física	1	3%		Métodos de investigación bioquímica	48	3%
			Ciencias de la computación / Inteligencia artificial	1	3%		Nanociencia / Nanotecnología	43	3%
			Resto de tecnologías	13	43%		Resto de tecnologías	922	58%
2015	2019	57	Ingeniería biomédica	9	9%	167	Ingeniería biomédica	143	7%
			Ingeniería eléctrica/electrónica	9	9%		Ingeniería eléctrica/electrónica	132	7%
			Ciencia de materiales multidisciplinares	8	8%		Ciencia de materiales multidisciplinares	127	6%
			Biotecnología aplicada / microbiología	5	5%		Nanociencia / Nanotecnología	70	3%
			Ciencia de Polímeros	5	5%		Física aplicada	70	3%
			Química multidisciplinaria	3	3%		Imagenología médica / Radiología nuclear	66	3%
			Ciencias de la computación / Inteligencia artificial	3	3%		Métodos de investigación bioquímica	59	3%
			Aplicaciones interdisciplinares de ciencias de la computación	3	3%		Química multidisciplinaria	56	3%
			Instrumentos / Instrumentación	3	3%		Óptica	50	2%
			Ciencias multidisciplinares	3	3%		Química física	47	2%
			Resto de tecnologías	54	51%		Resto de tecnologías	1207	60%

Tabla 14 Categorías de Web o Science de los países de México y Estados Unidos, considerando el porcentaje que representan las categorías en cada país. Fuente: Elaboración propia.



Con respecto a estos resultados, sobresale la producción científica del sector biomédico nacional, dado que, aproximadamente el 70% de las tecnologías de las que se trabajan en los grupos de colaboración se tiene concurrencia con respecto a las categorías que los grupos de Estados Unidos estudian y desarrollan. El 30% restante puede ser resultado de los contextos diferentes entre ambos países, dado que las necesidades y los comportamientos económicos y sociales difieren entre sí.

Los temas relacionados con la ingeniería biomédica, eléctrica, ciencia de materiales y radiología e imagenología resultan los más desarrollados por ambos países, lo que coincide con lo mostrado en el apartado 6. Evolución de las Redes de Colaboración del sector biomédico en México.

Cabe destacar que este trabajo de investigación no distingue entre alta tecnología o tecnología intermedia, ni el nivel tecnológico de las investigaciones conducidas en las redes presentes, es de suponerse que las capacidades para desarrollar alta tecnología de los Estados Unidos son superiores a las del sector biomédico mexicano. Sin embargo, la capacidad de combinación de recursos de red mostrada en el sector es sobresaliente, dado que las organizaciones nacionales logran incorporar: en primera instancia la capacidad de interactuar efectivamente con los socios de la red, tanto nacionales como extranjeros, seguido de la capacidad de identificar complementariedades entre los recursos de la red en la red general y finalmente la capacidad de coordinar la red de manera proactiva recursos para un fin específico. Esto ha permitido que el sector biomédico mexicano pueda colaborar con países líderes y mantener una producción científica que esté relacionada con las tendencias actuales.

Los resultados demuestran que la colaboración con organizaciones internacionales es fundamental para desarrollar tecnologías trabajadas en los países líderes. Esto, como es mencionado por Katz y Martin (1997), agrega a la propuesta de que la alta productividad (en términos de producción científica publicada) se correlaciona al hecho con los altos niveles de colaboración.

Del mismo modo, Lane y Lubatkin (1998) demostraron que las organizaciones que realizan investigaciones en biotecnología que se basan en la misma base de conocimiento y lógicas dominantes tienen más probabilidades de asociarse y generar un mejor rendimiento, mientras que Ahuja (2000) descubrió que una mayor similitud tecnológica entre los socios de



colaboración aumenta las patentes posteriores de la organización (Lin, Wu, Chang, Wang y Lee, 2012). En esta investigación se demostraron las relaciones de ciertas organizaciones nacionales con organizaciones presentes en países líderes, lo que les permitió desarrollar y madurar ciertas líneas de investigación en periodos posteriores, así como mantener e incrementar las redes de colaboración, lo que se ve traducido en un aumento de producción científica.

## **8. Conclusiones**

La evidencia encontrada en los datos obtenidos y analizados, así como las referencias teóricas que son retomadas en este trabajo de investigación apoyan a la resolución de la pregunta de investigación, así como de los objetivos presentados. Se debe agregar que se ha aportado un panorama más amplio de elementos que explican el estado actual de producción científica en el sector biomédico en México.

Respondiendo a la pregunta de investigación propuesta en este trabajo, ¿Cómo han evolucionado las redes de colaboración y los campos de conocimiento de los grupos de investigación presentes en el sector biomédico en México?, se tienen las siguientes conclusiones.

La alta productividad (en términos de producción científica publicada) de ciertos grupos de colaboración se correlaciona al hecho con los altos niveles de colaboración entre sus actores. Se encontró que los grupos de colaboración con vínculos más densos tienden a publicar más, así como los actores que tienen mayores vínculos con otros investigadores mantienen mayor número de coautorías y por ende de productividad.

El incremento de la producción conforme a los periodos de tiempo presentados tiene dos justificaciones, la primera es debido a que los grupos de colaboración aumentan su densidad con respecto a los vínculos de la red, las redes más recientes mostrados mayores vínculos entre nodos con respecto a los dos periodos iniciales. El segundo punto es dado por la difusión de conocimiento: los primeros periodos presentan crecimiento lento tanto de productividad como de campos de conocimiento presentes, posteriormente se tiene un proceso de aceleración rápida lo que se ve reflejado en el aumento de artículos publicados y la presencia de más campos de conocimiento, así como de mayor número de grupos de colaboración

especializados. Con esto se explica una parte de la adquisición de la capacidad de absorción por parte de las redes en cada periodo, lo que permite a los actores recibir conocimiento y construir sobre este. Así mismo, la capacidad de absorción de los individuos afecta directamente al grupo de colaboración al que pertenece, así como a la propia red, mientras que la estructura que tiene la red limita y define las oportunidades disponibles de absorción de conocimiento del actor.

Como un componente crucial de la atención médica, las tecnologías inmersas en el sector biomédico serán más efectivas cuando se consideren en el contexto más amplio del paquete completo de atención médica necesario para abordar las necesidades de salud pública, en esta investigación se comprueba que las tecnologías desarrolladas en otros sectores como las TICs cada vez más relevantes en la prevención y atención clínica (siendo la investigación, el diagnóstico, los tratamientos así como la rehabilitación). Por lo tanto, en lugar de centrarse solo en los problemas tecnológicos relacionados con los dispositivos médicos de la actualidad, es necesario enmarcar los dispositivos médicos de otra manera.

Las investigaciones en tecnologías biomédicas han avanzado rápidamente desde los primeros descubrimientos biotecnológicos de mediados de los años setenta. Ha generado conocimiento, herramientas y técnicas que han mejorado enormemente el proceso de investigación de medicamentos y tratamientos médicos. A pesar de los enormes avances en el conocimiento y la tecnología, muchos desarrollos siguen siendo "emergentes" en el sentido de que aún no se han traducido o integrado completamente en los sistemas de salud y la práctica médica. Al tiempo en que una tecnología se comienza a investigar en México, los avances en países líderes del sector como Estados Unidos ya han generado mayores investigaciones, lo que genera un sesgo en términos de producción científica, a pesar de que ambos esfuerzos se concentran en una misma tecnología biomédica.

En esta investigación, uno de los hallazgos principales es el comportamiento de las tecnologías presentes en las redes de colaboración del sector. En los primeros periodos de tiempo, siendo estos del año 2000 al año 2009, las tecnologías presentes se encuentran en un bajo número, existe una baja diversidad y esto se ve reflejado debido a las bajas capacidades generadas en ese momento por parte de los grupos de colaboración. En contraste, el comportamiento posterior que muestran los investigadores mostró la importancia de la

colaboración científica mediante la coautoría, donde a partir del año 2010 existen tecnologías que comienzan a emerger, como el análisis de imagen y radiación, siendo estas las más relevantes en la actualidad; así como algunas de ellas llegan a la madurez tecnológica, como los biomateriales e ingeniería eléctrica, que si bien son temas en los que los investigadores ya se encontraban trabajando, es en estos periodos recientes en los que alcanzan una producción científica relevante.

Cabe destacar también que las especialidades mostradas en todos los periodos no se presentan con el mismo ritmo de crecimiento, que, si bien en los primeros años éstas tenían un incremento vertiginoso, en los años recientes se detectan nuevas líneas de investigación que están sumamente relacionadas con las tecnologías ya existentes, lo que se da lugar a la diversificación de líneas de investigación.

Todavía cabe señalar que existen abundantes avances tecnológicos mostrados mediante el análisis de las competencias de las redes de colaboración. El dinamismo de las redes de colaboración denota resultados positivos, siendo estos el aumento de producción científica entre cada periodo, el incremento de la densidad de la red de colaboración y la disminución de las brechas en categorías tecnológicas con respecto a los países líderes. Además, el ritmo de la innovación en tecnologías biomédicas se está acelerando, generando mejores resultados clínicos con procedimientos menos invasivos y así como más efectivos para la detección de enfermedades y tratamientos. Estos cambios impulsarán la demanda de nuevos procedimientos de diagnóstico, monitoreo y tratamiento de menor costo, lo que ayuda finalmente a la economía del país que desarrolla dichas tecnologías, además de propiciar el cuidado de la salud de la sociedad.

Como se mencionó, el enfoque principal de la investigación de redes en las ciencias sociales ha sido sobre el efecto de las redes. Se demostró que la propuesta más importante en la investigación de redes sociales es que la posición de un nodo en una red determina en parte las oportunidades y limitaciones que encuentra, y de esta manera juega un papel importante en los resultados de un nodo, siendo estos resultados en términos de producción científica. Estas redes son en su mayoría verdaderas redes de conocimiento, ya que según Newman (2001) es probable que un par de científicos que hayan escrito un artículo juntos estén personalmente familiarizados. Estas redes proporcionan una fuente importante de datos del

sector biomédico que permitió identificar el aumento en el interés en ciertas líneas de investigación dentro de la comunidad científica en México.

Es pertinente mencionar que las redes de colaboración presentan características que si bien no son efecto directo de la vinculación entre actores, se tienen también presentes recursos y capacidades que generan efectos que explican el porque de la disminución o falta de continuidad de algunas redes así como del crecimiento y maduración de otras; así mismo, este mismo efecto ayuda a entender el porque algunos grupos de colaboración aumentaron o redujeron la brecha con respecto a los grupos internacionales además de como ciertos grupos de colaboración se encuentran en una vinculación más estrecha con grupos internacionales. Sin embargo, los objetivos y la pregunta de investigación no fueron enfocados en este sentido dado el interés que se tiene atiende al análisis de la evolución de las redes de colaboración y la identificación de los campos de conocimiento del sector biomédico, por lo que, al mencionar los recursos y capacidades de los actores de las redes, así como del contexto en el que las redes se encuentran inmersas permite generar cuestionamientos que pueden ser desarrollados de manera posterior.

Los grupos de investigación mexicanos demostraron tener capacidad de combinación de recursos presentes en la red, siendo estos recursos la capacidad de interactuar efectivamente con los socios de la red, tanto entre nacionales como extranjeros mediante la colaboración; seguido de la capacidad de identificar complementariedades entre los recursos de la red en la red general para generar nuevas líneas de conocimiento y madurar los campos ya presentes; además de demostrar la capacidad de coordinar la red de manera proactiva recursos para un fin específico, siendo este el aumento de producción científica. Esto ha permitido que el sector biomédico mexicano pueda colaborar con países líderes y mantener una producción científica que esté relacionada con las tendencias científicas actuales. Así, se tiene que la colaboración con organizaciones internacionales es fundamental para desarrollar tecnologías trabajadas en los países líderes.

Estas redes de colaboración presentan un proceso dinámico, las cuales son afectadas tanto por las actividades inherentes a la propia red de investigadores, como por los agentes externos que permean a la red. Esto origina constantes cambios entre los nodos y los vínculos de cada una, al igual que la constante entrada y salida de investigadores en las líneas de investigación

y en los grupos presentes que colaboran entre sí. El análisis de la evolución de estas redes de colaboración permitió reconocer y explicar la evolución de las tecnologías presentes en el sector desarrolladas por estos grupos de investigación especializados, tanto industriales como científicos y académicos.

Si bien las diferentes redes presentes en el sector pueden o no coincidir en ciertas líneas de investigación, estas de igual manera presentan diferentes características en cuanto a densidad, la cual es medida por la cantidad de autores que se encuentran en un grupo, la cantidad total de grupos que se presentan en la totalidad de la red y el coeficiente medio de *clustering*, el cual mide el porcentaje de nodos que se conectan con algún otro, formando así un grupo en sí mismo y único.

Este efecto dinámico coincide con la propuesta de Newman, et al. (2006), quienes agregan que los enfoques tradicionales de las redes han tendido a pasar por alto o simplificar demasiado la relación entre las propiedades que conforman el sistema en red y su comportamiento. Y, por el contrario, mencionan que gran parte de los trabajos recientes en redes adoptan una vista dinámica de sistemas según la cual los vértices de un gráfico representan entidades dinámicas discretas, con sus propias reglas de comportamiento, y los bordes representan acoplamientos entre actores.

El patrón de conexiones entre organizaciones esta dado por la interacción de varios investigadores afiliados a diferentes organizaciones. Esto permite que cada una recurra a diversas fuentes de conocimiento y tengan oportunidad de converger en ciertas líneas de conocimiento y desarrollar y adaptar nuevas tecnologías al sector, que, si bien en los periodos nacientes del sector no se desarrollaban, en periodos recientes se ven con cierta maduración y con una gran capacidad de producción científica. Así, los principales desafíos de las organizaciones incluyen la construcción de relaciones con agentes clave dentro y fuera de la organización, la movilización y la alineación de actividades en apoyo de una investigación científica con intereses en tecnologías que pueden ser divergentes, pero armoniosas entre sí; además de la construcción de una infraestructura que legitime, habilite y dirija la innovación tecnológica.

Finalmente, se destacan dos puntos relevantes en el análisis de la evolución de redes de colaboración. El primero es que se detectaron brechas en términos de la posición competitiva

de México entre el sector, Así, esta actividad permitió identificar áreas de oportunidad para capitalizar recursos existentes y nichos de mercado. Para medir el nivel de producción de tecnología y científica de México es prudente considerar el contexto internacional identificando las tecnologías presentes en los países líderes.

### **8.1. Principales lecciones**

Quizás la propuesta más importante en la investigación de redes sociales es que la posición de un nodo en una red determina en parte las oportunidades y limitaciones que encuentra, y de esta manera juega un papel importante en los resultados de un nodo (Borgatti, Mehra, Brass y Labianca, 2009).

Newman, Barabási y Watts (2006) afirman que, mientras que en el pasado el análisis de redes sociales ha tendido a tratar las redes como estructuras estáticas, recientemente se ha reconocido que las redes evolucionan con el tiempo. Muchas redes son producto de procesos dinámicos que agregan o eliminan vértices o bordes. Newman, et al. (2006) agregan que los enfoques tradicionales de las redes han tendido a pasar por alto o simplificar demasiado la relación entre las propiedades que conforman el sistema en red y su comportamiento. Sin embargo, gran parte de los trabajos recientes en redes adoptan una vista dinámica de sistemas según la cual los vértices de un gráfico representan entidades dinámicas discretas, con sus propias reglas de comportamiento, y los bordes representan acoplamientos entre actores (Newman, Barabási y Watts, 2006).

El análisis de la evolución de las redes de colaboración presentes en el sector biomédico en México permite reconocer y explicar campos de conocimiento y tecnologías que se encuentran en desarrollo por los grupos de investigación especializados, tanto industriales como científicos y académicos. Estas tecnologías en desarrollo son analizadas en este trabajo principalmente sobre dispositivos médicos, que como se definirá posteriormente, son cruciales en la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades, así como en la rehabilitación de un paciente (WHO, 2017). Aunado a esto, el análisis de la evolución de redes de colaboración contribuye a la detección de brechas en términos de la posición competitiva entre el sector, así como también permite ubicar áreas de oportunidad para capitalizar recursos existentes y nichos de mercado.

Es importante resaltar que la aproximación teórica de las redes sociales usada en esta investigación mantiene ciertas limitaciones para explicar los comportamientos que tiene la evolución del sector biomédico. La teoría presentada no contempla factores externos, como políticos o sociales, que permean a los individuos involucrados en la producción científica; tampoco denota actividades de vinculación que no son coautorías, como las actividades de patentamiento o espacios informales para la colaboración, como lo son congresos, foros y convenciones relacionados a los campos de conocimiento discutidos en este trabajo.

De manera similar, se tiene que esta teoría es presentada solo con actores que son similares, como el vínculo entre colaboradores (como se realiza en esta investigación) o el vínculo entre organizaciones; no permite indagar en el vínculo que un investigador mantiene alguna organización, siendo particularmente relevante el análisis del vínculo que tiene un individuo con la organización a la que se encuentra afiliado. Adicionalmente, se reconoce que las coautorías presentadas en esta investigación no son más que un indicador parcial de las actividades de colaboración de las que son parte los científicos e investigadores del sector biomédico.

La metodología realizada en esta investigación basada en la bibliometría contribuyó a la revelación de las tecnologías presentes en el sector biomédico. Partiendo de la identificación de tecnología específica por artículo científico, se realizó la clasificación de tecnologías por campo científico. Esto permitió el reconocimiento de las líneas de investigación en las cuales están trabajando los autores y científicos relacionados a estos artículos. Esta es una primera aproximación de los grupos de colaboración presentes en el sector, que, a su vez, contribuye a abonar a una mejor explicación del comportamiento de las redes de colaboración, así como de su evolución.

En este sentido, se destaca el reconocimiento de las tecnologías presentes en la red de colaboración en diferentes periodos de tiempo, partiendo de la identificación y el detalle de líneas de investigación específicas para posteriormente agrupar en tecnologías que se encuentran en el sector biomédico. Dicho nivel de especificidad de tecnologías se realiza de manera inédita; sin embargo, existen investigaciones realizadas basadas en categorías tecnológicas ya establecidas por las bases de datos relevantes, como *Web of Science* y *Scopus* con el fin de clasificar áreas de investigación de manera simplificada con el fin de presentar

las publicaciones. Hay que mencionar, además, que las investigaciones importantes en el sector biomédico son realizadas principalmente en países líderes, como Estados Unidos, Francia, Italia y Suecia, estudios realizados en México similares al realizado en este trabajo son prácticamente inexistentes.

Sin embargo, la metodología empleada también genera un sesgo dado que excluye cierta información con respecto a la realidad que enfrenta el sector. Las bases de datos empleadas (*Web of Science* y *Scopus*), que si bien son relevantes dentro de la comunidad científica internacional, no cuentan con un registro de la totalidad de los artículos científicos que están presentes en la red de colaboración. Éstas mantienen criterios más rigurosos a comparación de otras bases de datos que no permiten a toda la comunidad científica exponer el nuevo conocimiento producido. En cambio, de haberse realizado la investigación tomando en consideración una mayor cantidad de bases de datos se amplía la totalidad de las publicaciones de los autores, lo cual hubiese revelado una red de colaboración con *clústeres* más ricos y complejos, además de mostrar un panorama más amplio del dinamismo que tiene la comunidad científica con respecto al sector biomédico.

En este mismo sentido, las palabras de búsqueda utilizadas en la *query* pueden delimitar u omitir ciertos artículos que sí corresponden al sector biomédico, pero no fueron detectados, a pesar de haberse realizado diferentes revisiones a los criterios de búsqueda para afinar mejor el resultado.

Con respecto al análisis de la evolución de las redes de colaboración del sector biomédico en México, este permite reconocer el comportamiento de los clústeres y grupos de colaboración, la relación entre los investigadores entre sí y el soporte brindado por parte de las organizaciones a las que se encuentran afiliados, así como de los recursos indispensables y de las capacidades con las que estos cuentan para la producción científica. Esto, dado que los formuladores de políticas, siendo estos las universidades, instituciones gubernamentales y en algunos casos el sector privado, requieren de herramientas e información pertinente para poder reconocer la dinámica en el que los investigadores se encuentran inmersos.

Si bien los resultados y conclusiones estudiadas en trabajos previos a este se muestran cruciales para la comparación con los propios, además de la confirmación de ciertas corrientes teóricas presentadas anteriormente, resulta relevante efectuar una confirmación de



resultados por medio de la realización de entrevistas a expertos inmersos en el sector, que permitan generar una visión alterna al dinamismo de la red de colaboración. Esto debido a que es necesario validar el carácter de las colaboraciones y los vínculos sociales, además del porqué de la complementariedad entre investigadores, aun no siendo parte de las mismas organizaciones.

## 9. Bibliografía

- Ahuja, G. (2000). Collaboration Networks, Structural Holes, and Innovation: A Longitudinal Study. *Administrative Science Quarterly*, 425-455.
- AMID. (S.F. de S.F. de S.F.). *Acerca de AMID*. Obtenido de Asociación Mexicana de Industrias Innovadoras de Dispositivos Medicos, A.C.: <https://amid.org.mx/>
- Andrés, A. (2009). *Measuring Academic Research: How to undertake a bibliometric study*. Oxford, UK: Chandos Publishing.
- Balconi, M., Breschi, S., & Lissoni, F. (2004). Networks of inventors and the role of academia: an exploration of Italian patent data. *Research Policy*, 127–145.
- Balland, P.-A. (2012). Proximity and the Evolution of Collaboration Networks: Evidence from Research and Development Projects within the Global Navigation Satellite System (GNSS) Industry. *Regional Studies*, 741–756.
- Barabási, A., H., J., Néda, Z., Ravasz, E., Schubert, A., & Vicsek, T. (2002). Evolution of the social network of scientific collaborations. *Physica*, 590 – 614.
- Barney, J. (1991). Firm Resources and Sustained Competitive Advantage. *Journal of Management*, 99-120.
- Borgatti, S. P., Mehra, A., Brass, D. J., & Labianca, G. (2009). Network Analysis in the Social Sciences. *Science*, 892-895.
- Bozeman, B., & Lee, S. (2003). The Impact of Research Collaboration on Scientific Productivity. *Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science* (págs. 1-56). Denver, Colorado: School of Public Policy Georgia Institute of Technology.
- Breschi, S., & Lissoni, F. (2005). Knowledge networks from patent data: Methodological issues and research targets. *Handbook of Quantitative Science and Technology Research*, 613-643.
- Breschi, S., Lissoni, F., & Montobbio, F. (2005). The Scientific Productivity of Academic Inventors: New Evidence from Italian Data. *Economics of Innovation and New Technology*, 1-28.

- Bronzino, J. D. (2005). Biomedical Engineering: A Historical Perspective. En J. D. Bronzino, S. M. Blanchard, & J. D. Enderle, *Introduction to Biomedical Engineering* (págs. 1-30). Burlington, MA, USA: Elsevier Academic Press.
- Burt, R. S. (1992). *Structural Holes: The Social Structure of Competition*. Cambridge, MA.: Harvard University Press.
- Burt, R. S. (2000). The Network Structure of Social Capital. *Research in Organizational Behaviour*, 345–423.
- Butts, C. T. (2008). Social network analysis: A methodological introduction. *Asian Journal of Social Psychology*, 13-41.
- Cadena Méndez, M., & Leehan, J. A. (2003). Overview of the Biomedical Engineering History in Mexico: A Personal Point of View. *IEEE Xplore*, 3450-3453.
- CANIFARMA. (S.F. de S.F. de 2020). *Historia y Marco Jurídico*. Obtenido de CANIFARMA: [https://www.canifarma.org.mx/historia\\_marco.xhtml](https://www.canifarma.org.mx/historia_marco.xhtml)
- CIBEJ. (S.F. de S.F. de S.F.). *¿Quiénes Somos?* Obtenido de CIBEJ: <http://cibej.mx/quienes-somos/>
- Clúster Ingeniería biomédica. (S.F. de S.F. de 2020). *Inicio*. Obtenido de Clúster Ingeniería: <https://www.clusteringenieria.bio/>
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 128-152.
- Colegio Mexicano de Profesionales en Esterilización A.C. (S.F. de S.F. de 2016). *Acerca de nosotros*. Obtenido de Colegio Mexicano de Profesionales en Esterilización A.C.: <http://esterilizacion.org/about-us>
- Coleman, J. S. (1988). Social Capital in the Creation of Human Capital. *The American Journal of Sociology*, S95-S120.
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios . (S.F. de S.F. de S.F.). *¿Qué hacemos?* Obtenido de gob.mx: <https://www.gob.mx/cofepris/que-hacemos>
- CONACyT. (S.F. de S.F. de 2019). *Padrón de Beneficiarios Programa de Laboratorios Nacionales*. Obtenido de Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología:

<https://www.conacyt.gob.mx/index.php/sni/convocatorias-conacyt/convocatoria-pln/padron-de-beneficiarios-programa-de-laboratorios-nacionales>

CONACyT. (S.F. de S.F. de 2020). *Directorio de Centros de Investigación Conacyt*. Obtenido de Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología: <https://www.conacyt.gob.mx/index.php/el-conacyt/sistema-de-centros-de-investigacion/directorio-de-centros-de-investigacion-conacyt>

De Miranda, M. A., Doggett, M., & Evans, J. T. (2005). *Medical Technology: Contexts and Content in Science and Technology Education*. United States: National Science Foundation.

Diario Oficial de la Federación. (2000). *Ley de Insitutos Nacionales de Salud*. Ciudad de México: Secretaría de Gobernación.

Diario Oficial de la Federación. (2002). *Ley de Ciencia y Tecnología*. Ciudad de México.

Diario Oficial de la Federación. (2019). *DECRETO por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley General de Salud y de la Ley de los Institutos Nacionales de Salud*. Ciudad de México: Secretaría de Gobernación.

Diario Oficial de la Federación. (2020). *Estatuto Orgánico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*. Ciudad de México: Secretaría de Gobernación.

Eisenhardt, K. M., & Martin, J. A. (2000). Dynamic Capabilities: What Are They? *Strategic Management Journal*, 1105-1121.

Gephi.org. (2017). *The Open Graph Viz Platform*. Obtenido de Gephi.org: <https://gephi.org/>

Gittelman, M., & Kogut, B. (2003). Does Good Science Lead to Valuable Knowledge? Biotechnology Firms and the Evolutionary Logic of Citation Patterns. *Management Science*, 366–382.

Goldstein, D. J., Oz, M. C., & Rose, E. A. (1998). Implantable left ventricular assist devices. *The New England Journal of Medicine*, 1522-1533.

Griliches, Z. (1957). Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change. *Econometrica*, 501-522.

- Johanson, J., & Vahlne, J.-E. (2009). The internationalization process of the firm: A model of knowledge development and increasing foreign market commitments. *Journal of International Business Studies*, 1-21.
- Katz, J. S., & Martin, B. R. (1997). What is research collaboration? . *Research Policy*, 1-18.
- Kogut, B., & Zander, U. (1992). Knowledge of the Firm, Combinative Capabilities, and the Replication of Technology. *Organization Science*, 383-397.
- Kohler, R. E. (1982). *From medical chemistry to biochemistry: The Making of a Biomedical Discipline*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Koput, K. W. (2010). *Social capital*. Cheltenham, UK; Northampton, MA, USA: Edward Elgar Publishing Limited.
- Laal, M. (2012). Innovation and Medicine . *Procedia Technology*, 469-473.
- Lall, S. (1993). Technological Capabilities. En S. Jean-Jacques, *The Uncertain Question: Science, Technology and Development*; pp. 264-301 (págs. 264-301). Tokyo: United Nations University Press.
- Lane, P. J., & Lubatkin, M. H. (1998). Relative absorptive capacity and interorganizational learning. *Strategic Management Journal*, 461-477.
- Lin, C., Wu, Y.-J., Chang, C., Wang, W., & Lee, C.-Y. (2012). The alliance innovation performance of R&D alliances—the absorptive. *Technovation*, 282-292.
- Loveridge, D., & Cagnin, C. (2016). FTA as Due Diligence for an Era of Accelerated Interdiction by an Algorithm-Big Data Duo. En T. U. Daim, D. Chiavetta, A. L. Porter, & O. Saritas, *Anticipating Future Innovation Pathways Through Large Data Analysis* (págs. 3-96). Switzerland: Springer International Publishing.
- Marin, A., & Wellman, B. (2010). Social Network Analysis: An Introduction. En J. Scott, & P. J. Carrington, *The SAGE Handbook of Social Network Analysis* (pág. 11). London: Sage.
- McMillan, G. S., Narin, F., & Deeds, D. L. (2000). An analysis of the critical role of public science in innovation: the case of biotechnology. *Research Policy*, 1–8.

- Medical+Health Cluster A.C. (S.F. de S.F. de 2019). *¿Quiénes somos?* Obtenido de Medical+Health Cluster A.C.: <https://www.mhcluster.org/quienes-somos/>
- Melin, G., & Persson, O. (1996). Study Collaboration in Research Using Co-Authorities. *Scientometrics*, 363-377.
- Melin, G., & Persson, O. (1996). Studying Research Collaboration Using Co-Authorships. *Scientometrics*, 363-377.
- Miyazaki, K., & Islam, N. (2007). Nanotechnology systems of innovation—An analysis of industry and academia research activities. *Technovation*, 661–675.
- Narula, R. (2004). R&D collaboration by SMEs: new opportunities and limitations in the face of globalisation. *Technovation*, 153–161.
- Newman, M. E. (2000). The structure of scientific collaboration networks. *PNAS*, 404-409.
- Newman, M. E. (2001). Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality. *Physical Review E*, 1-7.
- Newman, M. E. (2004). Coauthorship networks and patterns of scientific collaboration. *PNAS*, 5200–5205.
- Newman, M., Barabási, A.-L., & Watts, D. J. (2006). Introduction. En M. Newman, A.-L. Barabási, & D. J. Watts, *The Structure and Dynamics of Networks* (págs. 1-8). Princeton: Princeton University Press.
- Obstfeld, D. (2005). Social Networks, the Tertius Iungens Orientation, and Involvement in Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 100–130.
- OECD. (2005). *A Framework for Biotechnology Statistics*. OECD Publishing.
- OECD. (2013). *Toward New Models for Innovative Governance of Biomedicine and Health Technologies*. París: OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, No. 11, OECD Publishing.
- OECD/Eurostat. (2018). *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*. OECD. Paris/Eurostat, Luxembourg: OECD Publishing.

- Porter, A. L., & Cunningham, S. W. (2005). *Tech Mining, Exploiting New Technologies for Competitive Advantage*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- ProMéxico. (16 de Febrero de 2016). *ProMéxico. Acciones y Programas*. Obtenido de <https://www.gob.mx/promexico/acciones-y-programas/dispositivos-medicos-26794>
- ProMéxico. (2017). *Panorama actual de la Industria Biotecnológica en México*. Ciudad de México: ProMéxico.
- Ramasco, J. J., Dorogovtsev, S. N., & Pastor-Satorras, R. (2004). Self-organization of collaboration networks. *Physical Review E*, 1-10.
- Rycroft, R. W., & Kash, E. D. (2004). Self-organizing innovation networks: implications for globalization. *Technovation*, 187–197.
- Salud Pública de México. (1974). El Plan Nacional de Salud. Antecedentes. *Salud Pública de México*, 16(6), 887-888. Obtenido de <http://saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/1477/1461>
- Sawhney, G. (2007). Biomedical Engineering. En G. Sawhney, *Fundamentals of Biomedical Engineering* (págs. 33-37). New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers.
- Sci2 Team. (2009). *Indiana University and SciTech Strategies* . Obtenido de Science of Science (Sci2) Tool: <https://sci2.cns.iu.edu>
- Singh, J. (2004). Collaborative Networks as Determinants of Knowledge Diffusion Patterns . *Management Science*, 1-32.
- SOMIB. (S.F. de S.F. de 2019). *Historia*. Obtenido de Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica: <http://somib.org.mx/historia/>
- Sorenson, O., Rivkin, J. W., & Fleming, L. (2006). Complexity, networks and knowledge flow. *Research Policy*, 994–1017.
- Tödtling, F., Lehner, P., & Kaufmann, A. (2009). Do different types of innovation rely on specific kinds of knowledge interactions? *Technovation*, 59-71.
- Tolstoy, D., & Agndal, H. (2010). Network resource combinations in the international venturing of small biotech firms. *Technovation*, 24–36.

- Van de Ven, A. H., & Engleman, a. R. (2004). Central Problems in Management Corporate Innovation and Entrepreneurship. *Advances in Entrepreneurship, Firm Emergence and Growth*, 47–72.
- WHO. (2003). *Medical device regulations : global overview and guiding principles*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- WHO. (2010). *Medical devices: managing the mismatch: an outcome of the priority medical devices project*. Geneva, Switzerland: WHO Press.
- WHO. (2016). *Regulation of medical devices: A step-by-step guide*. Cairo, Egypt: WHO Regional Publications.
- WHO. (2017). *Global atlas of medical devices: WHO medical devices technical series*. Geneva, Switzerland.: WHO Document Production Services.