

La cadena de valor de productos químicos en México

Análisis de oportunidades de proveeduría a la CGV de semiconductores

Agustín Filippo
Carlos Guaipatín
Lucas Navarro
Federico Wyss

Banco Interamericano de Desarrollo
Departamento de Países de Centroamérica, Haití,
México, Panamá y República Dominicana (CID),
Representación en México (CME) y División de
Competitividad, Tecnología e Innovación (CTI)

Julio 2024

La cadena de valor de productos químicos en México

Análisis de oportunidades de proveeduría a la CGV de semiconductores

Agustín Filippo
Carlos Guaipatín
Lucas Navarro
Federico Wyss

Banco Interamericano de Desarrollo
Departamento de Países de Centroamérica, Haití, México, Panamá y República Dominicana (CID), Representación en México (CME) y División de Competitividad, Tecnología e Innovación (CTI)

Julio 2024

Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo

La cadena de valor de productos químicos en México: análisis de oportunidades de proveeduría a la CGV de semiconductores / Agustín Filippo, Carlos Guaipatín, Lucas Navarro, Federico Wyss.
p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2954)
Incluye referencias bibliográficas.

1. Chemical industry-Mexico. 2. Integrated circuit layout-Mexico. 3. Mexico-Commerce. 4. Industries-Mexico. 5. International economic relations. 6. International economic integration. I. Filippo, Agustín. II. Guaipatin, Carlos. III. Navarro, Lucas. IV. Wyss, Federico. V. Banco Interamericano de Desarrollo. Departamento de Países de Centroamérica, Haití, México, Panamá y República Dominicana. VI. Banco Interamericano de Desarrollo. Representación en México. VII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Competitividad, Tecnología e Innovación. VIII. Serie.

IDB-TN-2954

Clasificaciones JEL: L14, L2, L63, L65, F15, O14, O25

Palabras clave: Desarrollo Productivo, Cadenas Globales de Valor, Industria Química, Semiconductores, México

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



La cadena de valor de productos químicos en México

Análisis de oportunidades de proveeduría a la CGV de semiconductores

Agustín Filippo

Carlos Guaipatín

Lucas Navarro

Federico Wyss



2024

Contenido

Introducción	5
1. La CGV de los productos químicos	6
1.1. Introducción	6
1.2. Estructura: Una cadena de muchas cadenas	6
Materias primas	9
Sustancias básicas	9
Sustancias intermedias	10
Sustancias de especialidad	10
Distribución, comercialización y branding	11
Investigación y desarrollo	11
1.3. Modelos de negocio y gobernanzas	12
Empresas integradas (diversificadas)	13
Empresas especializadas en sustancias básicas	14
Empresas especializadas en sustancias de especialidad	14
1.4. Distribución geográfica de la cadena	15
1.5. Entorno: Los determinantes de cambio para la CGV de productos químicos	17
Exposición a ciclos y shocks	17
Nuevos imperativos: resiliencia y sostenibilidad	18
Regulaciones, normas y estándares	18
2. Mapeando la CGV de los químicos en México	21
2.1. Introducción	21
2.2. Estructura de la industria química mexicana	21
Valor de la producción	21
Comercio exterior	23
Empleo	25
Inversión extranjera	26
2.3. Empresas y geografía de la cadena	27
2.4. Regulaciones y gobierno	30
2.5. Academia y otros actores	31
2.6. Transporte y aduana	31
2.7. Mapeo de la cadena de químicos en México	32
2.8. Estrategias de <i>upgrading</i> : el futuro de la cadena de los químicos en México	34
3. Las CGV de los químicos y de semiconductores: una conexión estratégica	38
3.1. Introducción	38

3.2. La CGV de los semiconductores	39
3.3. Sustancias químicas para producir semiconductores	42
Químicos para Frontend	43
Químicos para Backend	46
Materias primas	47
Estándares y regulaciones	48
Inversiones y costos	49
3.4. Detección de oportunidades para México	50
Nuevas inversiones en Estados Unidos	50
Semiconductores en México	53
Sustancias químicas: las ventajas reveladas de México	54
4. Conclusiones	57
Bibliografía.....	59
Apéndice 1. Clasificación de productos químicos en los eslabones de la cadena de valor .	62
Apéndice 2. Cómo se hace un semiconductor	65

La cadena de valor de productos químicos en México

Análisis de oportunidades de proveeduría a la CGV de semiconductores

Agustín Filippoⁱ

Carlos Guaipatínⁱⁱ

Lucas Navarroⁱⁱⁱ

Federico Wyss^{iv}

Abstract

Las acciones de los Estados Unidos orientadas a recuperar su liderazgo en la cadena global de valor (CGV) de semiconductores abren oportunidades para desarrollar actividades de la cadena en las que este país no cuenta con ventajas comparativas. Uno de estos segmentos es el de materiales y sustancias químicas de extrema pureza, hasta ahora dominado fundamentalmente por Asia. Este nuevo escenario global de la industria de semiconductores plantea la pregunta de si México podría posicionarse en este segmento, en el que actualmente no participa de manera relevante. Este informe apunta a responder esa pregunta, considerando en primer lugar la situación de toda la cadena de valor de sustancias químicas en el país, que presenta un proceso de deterioro que lleva décadas. Este diagnóstico marca la necesidad de desarrollar capacidades de base y mejorar la competitividad al nivel de toda la industria, para poder así estar en condiciones de avanzar en las capacidades específicas para producir químicos de alta pureza.

Palabras clave: Desarrollo Productivo, Cadenas Globales de Valor, Industria Química, Semiconductores, México

Códigos JEL: L14, L2, L63, L65, F15, O14, O25

ⁱ Departamento de Países de Centroamérica, Haití, México, Panamá y la República Dominicana.

ⁱⁱ División de Competitividad, Tecnología e Innovación.

ⁱⁱⁱ Consultor independiente.

^{iv} Consultor independiente

Introducción

La cadena global de valor (CGV) de los semiconductores es una de las más complejas que existen. Debido a ello, sus actividades se encuentran concentradas en unos pocos países del hemisferio norte. A partir de recientes disrupciones, sumadas a cambios en la frontera tecnológica que amenazan con desarticular las estructuras de poder dentro de la cadena, los países líderes se han involucrado fuertemente en el objetivo de fortalecer sus posiciones en ella.

En particular, Estados Unidos presentó su *CHIPS and Science Act*, por la inédita suma US\$ 52 mil millones, con el objeto de recuperar el liderazgo que el país supo tener en todos los eslabones. Sin embargo, hay ciertas actividades en las que Estados Unidos no tiene las ventajas comparativas requeridas para preservar la eficiencia productiva de la cadena y, por tanto, ha iniciado una búsqueda activa de nuevos aliados y proveedores en occidente. Uno de estos segmentos es el de materiales y sustancias químicas de extrema pureza, hasta ahora dominado fundamentalmente por Asia.

¿Podría México reclamar una posición en la producción de estos químicos? En este informe intentamos dar respuesta a esta pregunta desde una perspectiva amplia; esto es, analizando la situación de toda la cadena de valor de sustancias químicas en el país. México cuenta con uno de los sectores industriales más grandes del mundo y, por lo tanto, es un gran demandante de productos químicos de diversa índole. Sin embargo, su industria química lleva décadas de deterioro, y el país se convirtió en el poseedor de uno de los mayores déficits comerciales en productos químicos a escala global.

Producir los químicos de alta pureza que demanda la cadena de semiconductores requiere de capacidades específicas que actualmente el país no tiene en abundancia, pero que puede consolidar con las inversiones adecuadas. No obstante, esas inversiones pueden no ser suficientes si el país no resuelve los problemas de base que vienen contribuyendo al deterioro de la industria química en su conjunto. Los químicos de alta pureza son productos de nicho: una empresa que produzca químicos para semiconductores, también puede hacerlo para otras industrias electrónicas, médicas, o farmacéuticas. Por lo tanto, no se trata de crear las condiciones para proveer a semiconductores, sino para recuperar la competitividad de la industria química mexicana.

El análisis se basa en distintas fuentes secundarias, como en entrevistas específicas realizadas a algunos actores de relevancia en México.

El informe se estructura como sigue. La Parte 1 presenta una caracterización general de la CGV de los productos químicos en cuanto a su estructura, sus modelos de negocio y gobernanzas, su distribución geográfica y los factores de entorno que pueden operar cambios estructurales en el futuro próximo. La Parte 2 se enfoca en mapear la cadena de valor en México, dimensionando eslabones e identificando actores locales e internacionales de relevancia. La Parte 3 comienza describiendo la estructura y la coyuntura de la CGV de semiconductores, para contextualizar las oportunidades que aparecen en el segmento de químicos de alta pureza para su proveeduría. Aquí se analiza también la situación de México en este segmento. Finalmente, la Parte 4 concluye con el resumen de las principales conclusiones que emergen del análisis previo.

1. La CGV de los productos químicos

1.1. Introducción

La industria química ocupa una posición estratégica en la economía mundial, no solo por su aporte directo a la economía¹, sino también porque se trata de un sector que provee a prácticamente todos los demás (ICCA, 2019). Cuando compramos una botella de agua en el supermercado, tanto la botella como el agua dependen fuertemente de la industria química. Lo mismo ocurre, por ejemplo, con los semiconductores: como veremos en la tercera parte de este documento, los chips que forman parte de los innumerables aparatos electrónicos que moldean nuestro día a día demandan más de 300 productos químicos a lo largo del proceso productivo (Varas, Varadarajan, Goodrich, y Yinug, 2021).

En esta primera parte del documento analizaremos a la industria química desde la perspectiva de las cadenas globales de valor (CGV). Este enfoque resulta particularmente útil para el diseño de intervenciones de política, ya que no solo se limita a la importancia del sector desde los indicadores económicos usuales (como la producción, las exportaciones, o el empleo), sino también pone especial énfasis en entender la estructura de los distintos eslabones que componen a la cadena, los distintos agentes que intervienen, las relaciones de poder que se establecen entre ellos, y las dinámicas que motorizan el cambio en dicha estructura.

Siguiendo el enfoque presentado en Filippo, Guaipatín, Navarro y Wyss (2023), este capítulo se estructura en cuatro secciones principales. En la Sección 1.2 se presenta la estructura de la cadena, describiendo los productos y actividades de cada eslabón y su relación entre sí. A partir de esta estructura, la Sección 1.3 describe los modelos de negocio típicos de la cadena y sus gobernanzas asociadas. En la Sección 1.4 se presenta la distribución geográfica actual de la cadena. Finalmente, en la Sección 1.5 se analiza el entorno de la cadena, donde se incluyen los determinantes de cambio que afectan a los puntos antes presentados.

1.2. Estructura: Una cadena de muchas cadenas

En su forma moderna, la tabla periódica consta de 118 elementos que, individualmente o combinados, constituyen a cada una de las cosas que existen. Hasta donde sabemos, el universo entero puede resumirse en esos 118 elementos. Adicional a las particularidades de estos elementos (que se agrupan en 18 familias, pero que poseen propiedades únicas por separado), sus combinaciones generan un continuo de posibilidades inagotables.

Es por ello que, al hablar de industria química, en realidad estamos refiriendo a un sinnúmero de productos, sustancias y procesos que resulta verdaderamente difícil de sistematizar². Un fabricante de vidrios, un fabricante de medicamentos y un productor de combustibles conviven todos bajo la misma etiqueta de industria química, pero sus actividades diarias posiblemente difieran en más de lo que coinciden. Desde el enfoque de cadenas de valor, se dice que la cadena de los productos químicos en realidad se compone de una variedad de cadenas que se intersecan entre sí (Bamber *et al.*, 2016).

¹ Se estima que la industria química contribuye a aproximadamente un 7% del Producto Interno Bruto mundial (ICCA, 2019).

² Ciertas estimaciones sugieren que, a la fecha, se producen más de cien mil productos químicos (Bamber *et al.*, 2016).

Debido a lo anterior, existen diversas formas de clasificar a las sustancias químicas según el tipo de análisis que se requiera³. Este reporte seguirá el enfoque utilizado en Bamber *et al.* (2016), que resulta especialmente útil para el análisis de cadenas de valor. Según este criterio, los productos químicos pueden clasificarse en dos grandes grupos: las sustancias básicas, por un lado, y los productos de especialidad, por otro.

- **Sustancias básicas:** En este grupo se encuentran los químicos no diferenciados, que generalmente requieren un número limitado de pasos para ser producidos. Se caracterizan principalmente por su estructura química (*qué son*); esto es, para un determinado producto con un determinado nivel de pureza, será imposible distinguir si éste fue elaborado por la empresa A o la empresa B. Pueden ser de origen orgánico (como las resinas plásticas o el caucho sintético), o inorgánico (por ejemplo, gases industriales como el hidrógeno y el nitrógeno). Este segmento concentra aproximadamente el 80% de los ingresos de la industria química, e incluye dos subgrupos principales:
 - **Commodities:** En este caso, la producción se realiza a gran escala y la comercialización suele ser a granel, para usos generales dentro de la industria química o en otras cadenas.
 - **De alta pureza:** También conocidos como químicos finos, se destacan por su pureza extrema, generalmente por encima del 99,99%⁴. Se utilizan en aplicaciones donde la más mínima impureza puede afectar significativamente el resultado final. Por lo tanto, su producción es a una escala significativamente más reducida que la de los *commodities*. Son utilizados principalmente por la industria farmacéutica, la de agroquímicos, y la de químicos para la industria electrónica y de semiconductores.
- **Sustancias de especialidad:** Estas sustancias tienen un alto grado de diferenciación, según el segmento de especialidad al que atiendan. A diferencia de las sustancias básicas, que son definidas por sus componentes, los químicos de especialidad se definen por *lo que pueden hacer*. Se incluyen productos tales como pinturas, tintas, y adhesivos. La especialidad hace que estas sustancias típicamente requieran muchas más etapas para su producción, que se produzcan en una escala menor, y que involucren un alto valor agregado relativo a las sustancias básicas.

En la Tabla 1.1 se pueden apreciar las principales diferencias entre estas categorías y subcategorías.

³ Por ejemplo, en Promexico (2018) se utiliza el criterio de la naturaleza de las sustancias, según la clasificación SCIAN: orgánicas, inorgánicas y mixtas. En ACC (2022) se utiliza un criterio similar al del presente documento, considerando a las sustancias como básicas y de especialidad, pero dando a su vez categorías separadas a agroquímicos y químicos de consumo (que en nuestro reporte son considerados dentro de las sustancias de especialidad).

⁴ La pureza de un compuesto químico se refiere a la proporción o porcentaje de la sustancia deseada en relación con otras sustancias presentes en la muestra.

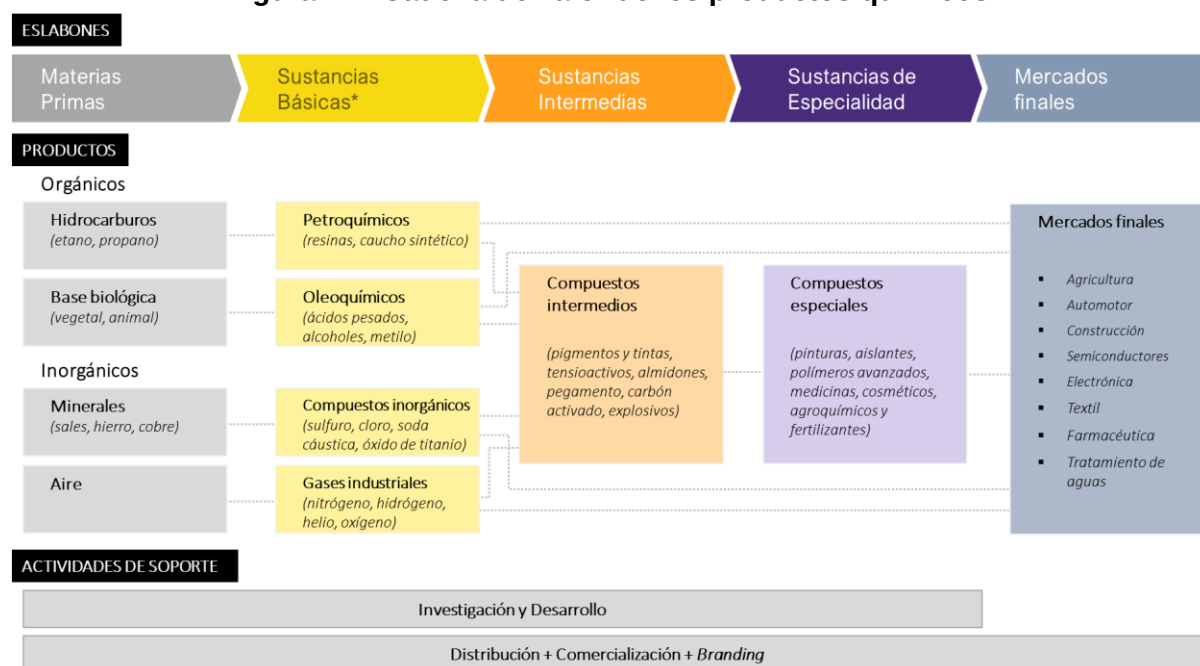
Tabla 1.1. Distinción entre categorías de químicos

Característica	Sustancias básicas		Sustancias de especialidad
	Commodities	De alta pureza	
Composición	Sustancias puras	Sustancias puras	Sustancias combinadas (formuladas)
Condición de venta	Según qué son	Según qué son	Según qué hacen
Escala de producción	Grandes volúmenes	Volúmenes reducidos	Volúmenes reducidos, dependiendo del mercado
Precio unitario	Bajo	Alto	Medio-alto, dependiendo del mercado
Aplicaciones	Múltiples	Específicas	Específicas

Fuente: Elaboración propia.

La distinción anterior es útil para el análisis de cadenas de valor, toda vez que las sustancias básicas pueden conceptualizarse como insumo para los productos de especialidad. En la transición, podría agregarse una tercera categoría de “sustancias intermedias”, la cual incluye productos que tienen un grado de procesamiento bajo antes de ser utilizados como insumos para el eslabón de especialidad.

Con lo dicho hasta aquí, podemos establecer una estructura de la cadena de valor de los productos químicos que puede utilizarse de base para entender las cadenas específicas de cada segmento y producto. En la Figura 1.1 se presenta un esquema simple de cinco eslabones principales: materias primas, sustancias básicas (commodities), sustancias intermedias, sustancias de especialidad, y distribución y comercialización. En los apartados siguientes, se profundiza en las actividades y productos propios de cada eslabón y actividades conexas.

Figura 1.1. Cadena de valor de los productos químicos.

* Las sustancias básicas pueden comercializarse como *commodities*, o bien diferenciadas según su grado de pureza (la alta pureza es requerida particularmente por la industria de semiconductores y farmacéuticas).

Fuente: Elaboración propia con base en Bamber et al. (2016)

Materias primas

Las materias primas de los diversos productos químicos pueden clasificarse primariamente en orgánicas e inorgánicas. Dentro de las orgánicas, tenemos a los hidrocarburos (principalmente representados por el petróleo crudo y el gas natural, donde predominan los elementos etano y propano) y a los materiales de base biológica (típicamente aceites y grasas extraídos de plantas y animales). De manera agregada para toda la industria química, los hidrocarburos concentran casi la totalidad del mercado. Por su parte, las materias primas inorgánicas son obtenidas a partir de diversos minerales y del aire atmosférico (ACC, 2022).

La mayoría de estas materias primas son comercializadas como *commodities*, lo cual implica que sus precios están expuestos a diversos tipos de *shocks*. Esta volatilidad en los precios de las materias primas, como veremos luego, ha sido una suerte de talón de Aquiles para la industria química. Debido a esto, fueron apareciendo diversas estrategias para fortalecer las relaciones con los proveedores y morigerar esta volatilidad. Tales estrategias incluyen desde relaciones contractuales especiales hasta la integración vertical.

Sustancias básicas

Este eslabón es el primero de la industria química propiamente dicha, y consiste en las actividades necesarias para descomponer las materias primas en químicos básicos. Un punto importante es que, en esta forma, pueden servir como insumos para los siguientes eslabones de la cadena química (sustancias intermedias o sustancias de especialidad), o para otras cadenas de valor (en este caso, se salta directamente al eslabón de comercialización).

- **Petroquímicos.** Los hidrocarburos pasan por un proceso de “*cracking*” para descomponer sus moléculas en otras más pequeñas y más útiles para la industria, como por ejemplo el etileno, el propileno, el benceno, entre otros. Luego, estas moléculas son transformadas dentro de este mismo eslabón en productos básicos, como las resinas plásticas (polietileno, polipropileno, poliestireno, y cloruro de polivinilo – PVC) o el caucho sintético.
- **Oleoquímicos.** En el caso de los materiales de base biológica, el proceso de separación más utilizado suele ser la hidrólisis, a partir del cual se llevan ciertos aceites vegetales y algunas grasas animales a derivados tales como ácidos grasos crudos, alcoholes grasos y glicerina, entre otros. De estos segmentos se derivan luego productos como jabones, cosméticos, emulsionantes, alimentos, biocombustibles, etc.
- **Compuestos inorgánicos no gaseosos.** En el caso de los productos químicos inorgánicos, se utilizan varios procesos diferentes para extraer los productos químicos básicos de sus materias primas. Los principales productos de esta etapa incluyen derivados de azufre, cloro, soda cáustica y óxidos de titanio.
- **Gases industriales.** Los gases industriales se obtienen principalmente mediante procesos de separación y purificación de gases presentes en el aire o en corrientes de gas natural o gases de refinería⁵. Estos gases son esenciales para diversas aplicaciones industriales, científicas y médicas. Algunos de los gases industriales más comunes incluyen oxígeno, nitrógeno, argón, dióxido de carbono, acetileno, hidrógeno y helio, entre otros.

⁵ Por lo tanto, en algunos casos, son subproductos de la obtención de las sustancias petroquímicas mencionadas arriba.

En general, estos productos son considerados commodities, con poca o ninguna diferenciación del producto entre los competidores, y son producidos en grandes cantidades y a un bajo precio unitario de venta. Los costos de la materia prima tienen una alta influencia en el precio de estos productos, como así también la utilización de la capacidad, resultando en bajos márgenes de ganancia. La producción de químicos básicos es intensiva en capital y con altos requerimientos de energía, ante lo cual el acceso a hidrocarburos es fundamental (ACC, 2022). A su vez, por regla general, las plantas para la producción de las sustancias básicas tienen un alto costo en comparación con las facilidades necesarias para la producción aguas abajo en la cadena.

Todo lo anterior configura barreras a la entrada que determinan una producción en grandes cantidades y con un bajo precio unitario en comparación con productos más sofisticados. Si bien las actividades de I+D son siempre relevantes, las tecnologías asociadas a este eslabón de la cadena se consideran maduras y por tanto presentan un menor dinamismo de lo que puede darse, por ejemplo, en el eslabón de productos de especialidad. A pesar de esto, el eslabón no deja de estar expuesto a nuevos imperativos de sostenibilidad y minimización del impacto ambiental, lo cual motiva una agenda dirigida a modos de producción más limpios (ver sección 1.5)⁶.

A pesar de las características definidas hasta aquí, existen casos en que se requieren un elevado nivel de pureza de las sustancias. Por lo tanto, el producto deja de ser un *commodity* (pues su grado de pureza le agrega un atributo diferenciador) y la producción es a una escala mucho más reducida, siguiendo a su vez exigentes procesos para garantizar la pureza requerida. Para esto, resulta necesaria la cumplimentación de estándares de procesos y productos que permitan facilitar la coordinación entre los productores y sus clientes. Los productos de grado electrónico utilizados para la fabricación de semiconductores que analizaremos en la Parte 3 entran en esta categoría; algunos son utilizados directamente en el proceso productivo de los chips, y otros son combinados y procesados como sustancias de especialidad.

Sustancias intermedias

En este eslabón se incluyen los procesamiento de sustancias básicas necesarios para que éstas se conviertan en insumos plenos del eslabón de sustancias de especialidad. Los ejemplos incluyen pigmentos y colorantes utilizados en la fabricación de pintura o la coloración de plásticos y tensioactivos utilizados en la producción de detergentes industriales y de consumo. De esta manera, este eslabón se conceptualiza esencialmente como una fase de transición entre químicos básicos y de especialidad que puede ser útil en algunos productos, y redundante en algunos otros.

Sustancias de especialidad

Los productos de especialidad son llamados así porque están diseñados para atender a necesidades específicas. También se conocen como “químicos de desempeño” o “químicos formulados”. Por lo tanto, se producen en volúmenes menores que los químicos básicos. Estos productos contribuyen a la optimización de los procesos productivos y son vendidos de

⁶ Por ejemplo, una actividad típica en este eslabón de la industria es el *cracking* de etano, que se desarrolla en grandes instalaciones en donde, en términos sencillos, se transforma el gas en otros productos. Una planta de *cracking* puede producir unos 150 millones de toneladas métricas de etano por año, aunque con un impacto ambiental importante. Esto ha llevado a endurecer los requisitos y regulaciones para la instalación de estas plantas.

acuerdo a los fines para los cuáles se utilizan más que por su contenido, tal como se mencionó antes y se refleja en la Tabla 1.1.

Ejemplos de este tipo de productos son los adhesivos y selladores, catalizadores, revestimientos, productos químicos electrónicos, limpiadores industriales, aditivos plásticos, pinturas, aislantes, tintas, fertilizantes, agroquímicos y productos químicos para la gestión del agua, entre otros. En cada uno de estos casos, existen numerosas posibilidades de diversificación, dependiendo del uso final que tenga el producto. Esto permite una estructura de mercado más atomizada, con producciones de escala media y con un elevado *markup* en relación con los productos aguas arriba en la cadena.

La materia prima de los químicos de especialidad se deriva principalmente de petroquímicos intermedios y otros químicos básicos. Hay altas barreras a la entrada que se relacionan con factores tecnológicos, protección de la propiedad intelectual y conocimiento específico del mercado y los compradores (ACC, 2022). En este mercado, los servicios tecnológicos, el *marketing* y la eficiencia en la distribución son clave para construir relaciones comerciales duraderas con los clientes (ver sección 1.2). Es por ello que la innovación es un determinante fundamental del crecimiento de las empresas en este rubro; en Estados Unidos, entre 3 y 6% de los ingresos se destina a gasto en I+D mientras que, el gasto en plantas y equipos representa entre 4 y 9% de los ingresos (ACC, 2022).

Dentro de los químicos de especialidad se incluyen algunos de los químicos utilizados para la producción de semiconductores (químicos electrónicos), como por ejemplo limpiadores, reveladores, dopantes, encapsulantes, grabadores, fotoprotectores, polímeros especiales, soluciones de revestimiento y decapantes. Volveremos sobre esto en detalle en la Parte 3 de este documento.

Distribución, comercialización y branding

Las características de la comercialización de los productos químicos dependen de varios factores. Uno de los principales es el eslabón del cual provenga el producto: mientras que las sustancias básicas son comercializadas en general a granel, las sustancias de especialidad, como su nombre lo indica, pueden requerir particulares esfuerzos de *branding* y de apertura de mercados. Estos esfuerzos también dependen de si el producto llega directamente al público masivo, o es utilizado como insumo para cualquiera de las otras cadenas que puedan existir en una economía (incluso retroalimentando a la propia industria química). La cercanía con estas cadenas es importante para desarrollar negocios y capturar una mayor generación de valor en la cadena.

En cuanto a la distribución, si bien tradicionalmente era una actividad integrada dentro de las empresas del sector, crecientemente fue empezando a tercerizarse. Esta práctica es especialmente frecuente entre los pequeños productores de sustancias de especialidad. Estos distribuidores de productos químicos desempeñan un papel más significativo que las empresas de logística típicas, ya que toman posesión física del producto y pueden almacenar, mezclar y volver a empaquetar productos de una amplia gama de proveedores para sus clientes finales (Bamber *et al.*, 2016).

Investigación y desarrollo

Las actividades de investigación y desarrollo (I+D) se encuentran transversalmente vinculadas a todos los eslabones de la cadena de químicos. Suele señalarse una diferencia entre el eslabón de químicos básicos y el de químicos de especialidad. En el primer caso, donde los productos valen por sus características intrínsecas (qué son), las tecnologías

utilizadas se consideran maduras, y los esfuerzos en I+D suelen estar asociados a la ciencia básica, encargada de realizar desarrollos de largo plazo. En el segundo caso, las actividades de I+D son mucho más dinámicas y ocupan un lugar central en el desarrollo de nuevos productos que permitan ocupar nuevos nichos de mercado. En muchos casos, las actividades de I+D no se realizan de manera aislada por parte de las empresas, sino que se abordan de manera conjunta con clientes, a fin de poder tener soluciones para problemas específicos. En estos casos, se establece una gobernanza relacional, en la que productores y clientes establecen una relación de cooperación y dependencia mutua (Bamber *et al.*, 2016).

Fuera de estas características estructurales (que definen en parte a los modelos de negocio que se presentan en la siguiente sección), actualmente las agendas de investigación de la CGV de químicos como un todo se ven fuertemente influidas por nuevos acuerdos y preocupaciones a nivel gubernamental y privado. Dadas estas crecientes preocupaciones por la sostenibilidad, la I+D en la industria química ha comenzado a enfocarse en la búsqueda de procesos y productos químicos más sostenibles, que contribuyan a reducir el impacto ambiental de la propia cadena, pero también a desarrollar soluciones para otros sectores en la búsqueda de la neutralidad de carbono. En esta agenda se incluye el desarrollo de nuevas formas de extracción y nuevas fuentes potenciales de materias primas, así como también el desarrollo de métodos de producción menos contaminantes, productos con mayor duración, y tratamientos efectivos para su deposición o potencial reutilización (Henske *et al.*, 2023). Sobre estos temas volveremos en la sección 1.5, sobre el Entorno de la cadena.

1.3. Modelos de negocio y gobernanzas⁷

Del análisis de la sección previa se desprende que la cadena de valor de los productos químicos se caracteriza por altas barreras a la entrada, que pueden darse en los altos costos del capital, de investigación y desarrollo, o en los requerimientos regulatorios (sobre los que se profundizará en el apartado 1.5, de Entorno). Naturalmente, estas barreras limitan el número de firmas operando en la cadena, pero operan de diferente forma dependiendo de las particularidades que se suceden a nivel eslabón. Mientras que la producción de *commodities* tiende a ser capital-intensiva y asociada a tecnologías de producción maduras, en las sustancias de especialidad los esfuerzos de I+D en conjunto con sus clientes y la consecución de patentes son fundamentales para garantizar un lugar en sus respectivos mercados.

De esta manera, se establecen diversos modelos de negocios para las empresas del sector. Debido a la naturaleza interconectada de la CGV de los químicos, estos modelos tienden a superponerse. Tradicionalmente, las empresas más poderosas del sector siguen un modelo integrado, con unidades de negocio repartidas a lo largo de toda la cadena. Este modelo convive con otros eslabón-específicos, donde las empresas se dedican casi con exclusividad a la producción de sustancias básicas, o bien a la producción de sustancias de especialidad. A continuación, repasaremos las principales características y líderes de cada modelo (Figura 1.2).

⁷ Esta sección se basa principalmente en Bamber *et al.* (2016).

Figura 1.2. Modelos de negocio en la cadena de valor de los productos químicos.



Fuente: Elaboración propia.

Empresas integradas (diversificadas)

Los principales nombres de la industria química mundial aparecen en este modelo de negocio. Algunos ejemplos son *BASF* (Alemania), *Dow Chemical Company* y *Dupont* (ambas de Estados Unidos). Estas compañías tienen unidades de negocio en los distintos tipos de sustancias básicas *commoditizadas* (petroquímicos, oleoquímicos y sustancias inorgánicas), así como en la producción de químicos de alta pureza y de especialidad. En algunos casos, la integración vertical de estas compañías se extiende hasta la provisión de materias primas, a fin de lograr un blindaje sobre las fluctuaciones de precios en esos productos.

Desde su posición en el eslabón de sustancias básicas, estas empresas establecen fuertes relaciones de poder con sus clientes dentro y fuera de la cadena de químicos. Al dominar la producción de sustancias básicas, estas empresas ofician el rol tanto de proveedoras como de competidoras de las empresas (no integradas) aguas abajo, lo cual coloca a éstas últimas en posición de desventaja en costos. En lo que refiere a empresas de otras cadenas, la provisión de grandes volúmenes de sustancias básicas no diferenciadas suele asegurarse con contratos de largo plazo que establecen una relación de cautividad entre el cliente y la firma química.

Por otro lado, existen firmas integradas que tienen su centro de poder en los mercados finales o las sustancias de especialidad. Estas firmas están vinculadas mayormente a las sustancias oleoquímicas y sus derivados. Algunos ejemplos son *Procter & Gamble* (P&G), *Johnson & Johnson* y *Colgate Palmolive*, de Estados Unidos; o *Unilever*, del Reino Unido. En general, a pesar de estar integradas, estas firmas tienen también proveedores para completar su abastecimiento de materias primas. Desde su lugar, ejercen influencia sobre sus proveedores a fin de garantizar los requisitos de trazabilidad que se demandan en sus mercados-destino (alimenticio, limpieza y cuidado personal).

Empresas especializadas en sustancias básicas

Existen algunas empresas que se especializan en sustancias básicas de acuerdo con el origen de su materia prima, conviviendo con otras firmas diversificadas. Como se trata de un eslabón intensivo en capital, las economías de escala se vuelven especialmente relevantes, resultando un segmento concentrado en relativamente pocas empresas que, adicionalmente, suelen estar integradas con las fuentes de aprovisionamiento de materias primas. Esto es particularmente relevante en los productos petroquímicos, donde pueden mencionarse a grandes multinacionales como *ExxonMobil* (Estados Unidos), *Chevron Phillips Chemical* (propiedad conjunta de *Chevron Corporation* y *Phillips Petroleum Company*, de Estados Unidos), *Sinopec* (China) y *Shin Etsu* (Japón). En el caso de los gases industriales, *Linde*, (Reino Unido), *Air Liquide* (Francia) y *PraxAir* (Estados Unidos) son las líderes.

Del mismo modo que ocurre en el caso de las empresas diversificadas enfocadas en sustancias básicas, si bien se trata de productos no diferenciados donde la competencia determina bajos precios unitarios, las empresas de este segmento pueden ejercer influencia sobre sus clientes mediante contratos de aprovisionamiento de mediano y largo plazo, toda vez que la cercanía resulta una variable crucial en el costo que enfrentan los clientes. Esta práctica es más frecuente si, para atender una nueva demanda, la empresa debe hundir costos para expandir su capacidad.

Vale agregar que buena parte de estas grandes empresas cuenta también con unidades de negocio en el segmento de sustancias básicas de alta pureza. No obstante, en estos casos no existen economías de escala, puesto que los volúmenes de producción son reducidos y las características finales del producto (dadas principalmente por su grado de pureza) se ajustan a las necesidades particulares de cada cliente. Esto es, aquí se deja de hablar de *commodities*, permitiendo precios unitarios más altos y una relación más cercana con los clientes. Para este segmento, la trazabilidad y los estándares de proceso y producto son claves para reducir costos de transacción⁸.

Empresas especializadas en sustancias de especialidad

Las empresas dedicadas exclusivamente a la manufactura de sustancias de especialidad funcionan de acuerdo a la lógica del mercado que atiendan. Los proveedores de la industria farmacéutica, por caso, tienen un funcionamiento muy distinto al de los productos de pinturas. No obstante, el denominador común en todos estos casos es la importancia de las actividades de I+D, que usualmente requieren de colaboración con los clientes para lograr productos que se adapten adecuadamente a los fines para los que son creados.

En general, por atender a clientes específicos, en este segmento no suele haber barreras asociadas a las economías de escala. Esta particularidad hace que haya una menor intensidad del capital (respecto de la producción de *commodities*), y que la capacidad pueda expandirse sin necesidad de grandes inversiones que impliquen saltos discretos en el nivel de producción. Si bien esto permite una mayor atomización de mercado, las principales compañías se ubican en los países desarrollados (Bamber *et al.*, 2016). Esto responde a que la presencia de requisitos técnicos, regulatorios o de contexto limita la ubicuidad de su producción.

Las patentes y la propiedad intelectual resultan factores clave: si la empresa productora del químico de especialidad es la propietaria de la fórmula de su producto, entonces podrá ejercer

⁸ Por ejemplo, algunos de los principales compradores de aceite de palma (como Unilever y P&G) lanzaron la Mesa Redonda sobre el Aceite de Palma Sostenible (<https://rspo.org/>) a fin de poder incluir a una mayor cantidad de pequeños agricultores entre sus proveedores.

poder sobre su cliente; en cambio, si es el cliente quien posee la patente de su insumo, éste podrá optar por producirlo en la localización que resulte más conveniente en costos y seguridad de provisión (toda vez que los costos de transporte resultan mucho menos relevantes en los químicos de especialidad que en el caso de los *commodities*). En este último caso, al igual que en las sustancias de alta pureza, resulta muy importante la certificación de estándares para reducir costos de transacción.

Adicionalmente, si estos productos llegan a los hogares, o son insumidos por numerosas empresas de otra cadena, los esfuerzos de *branding* y *marketing* serán particularmente relevantes para garantizar un espacio relevante en el mercado.

1.4. Distribución geográfica de la cadena

La industria química tiene sus cimientos más sólidos en Europa occidental y en los Estados Unidos, de donde provienen las actuales líderes de la industria, muchas de las cuales tienen más de un siglo operando en el negocio (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Top 15 empresas químicas a nivel mundial (2022)

Ranking		Nombre	Central	Fundación	Modelo	Sector	Ingresos por productos químicos (millones de USD)	% sobre ingresos totales
2022	2019							
1	1	BASF	Alemania	1865	Diversificado	Diversificado	92.982	100
2	2	Sinopec	China	2000	Sustancias básicas	Petroquímicos	65.848	15,9
3	3	Dow	Estados Unidos	1897	Diversificado	Diversificado	54.968	100
4	4	Sabir	Arabia Saudita	1976	Sustancias básicas	Petroquímicos	43.230	92,7
5	6	Formosa Plastics	Taiwán	1954	Sustancias básicas	Petroquímicos	43.173	72,2
6	5	Ineos	Reino Unido	1998	Diversificado	Diversificado	39.937	100
7	13	PetroChina	China	1999	Sustancias básicas	Petroquímicos	39.693	9,8
8	9	LyondellBasell Industries	Estados Unidos	2007	Sustancias básicas	Petroquímicos	38.995	84,5
9	11	LG Chem	Corea del Sur	1947	Diversificado	Diversificado	37.257	100
10	7	ExxonMobil	Estados Unidos	1999	Sustancias básicas	Petroquímicos	36.858	13,3
11	8	Mitsubishi Chemical Group	Japón	1933	Diversificado	Diversificado	30.719	84,8
12	26	Hengli Petrochemical	China	1994	Sustancias básicas	Petroquímicos	27.961	91,1
13	10	Linde	Reino Unido	1879	Sustancias básicas	Gases industriales	27.926	90,7
14	12	Air Liquide	Francia	1902	Sustancias básicas	Gases industriales	27.148	98,3
15	29	Syngenta Group	Suiza	2000	Sustancias de especialidad	Agroquímicos	24.900	81,1

Fuente: Elaboración propia con base en C&EN (2022).

La cadena de valor de los químicos, al igual que muchas otras, comenzó a volverse global de la mano de las primeras tendencias hacia la liberalización comercial y avances tecnológicos en materia de transporte de bienes, personas e información. Fundamentalmente, fue durante los '80 y los '90 del siglo pasado que las grandes líderes del mercado aumentaron fuertemente su ritmo de inversiones en países en desarrollo, incluyendo a las principales economías de América Latina (México, Brasil, Argentina y Venezuela) y países asiáticos de industrialización naciente (Singapur, Corea del Sur, Taiwán y Tailandia). A partir de esto, muchos de estos países comenzaron a desarrollar industrias químicas competitivas a nivel mundial, cuando hasta entonces tenían solo una producción nacional moderada e importaban la mayoría de sus productos químicos de países más desarrollados (ACC, 2022). Actualmente, son numerosas las compañías asiáticas que lideran los *rankings* de las empresas químicas a nivel global (Tabla 1.2).

Como se ha adelantado en apartados previos, por regla general la producción de sustancias básicas a gran escala tiende a ubicarse en torno a la fuente de materias primas, mientras que la cercanía de esta ubicación a los centros de consumo masivo son determinantes claves no solo de la rentabilidad, sino también del poder que pueden ejercer las empresas sobre sus clientes. Como resultado, la producción en este eslabón tiende a concentrarse en un número

relativamente pequeño de países. Por su parte, la producción de productos químicos intermedios tiende a estar más extendida pudiendo ubicarse junto con la producción aguas arriba o junto a los usos aguas abajo. Finalmente, la producción especializada es más diversa, debido a que las economías de escala y proximidad pierden relevancia.

De acuerdo con las estimaciones de ACC (2022) presentadas en la Tabla 1.3, las ventas globales de la industria química ascendieron a USD 4.732.1 mil millones en 2021, un 20% más que el registro previo a la pandemia por el Covid-19, en 2019. De este total, el 55% proviene de la región de Asia-Pacífico (USD 2.621 mil millones, de los cuales 38 puntos porcentuales corresponden a China). La segunda región en importancia es Europa (20%) y América del Norte (13%, de los cuales 11 puntos porcentuales corresponden a los Estados Unidos). América del Sur y Central participan con un 5% de la producción.

Tabla 1.3. Valor mundial de la producción y comercialización de productos químicos por región (2021, en miles de millones de dólares)

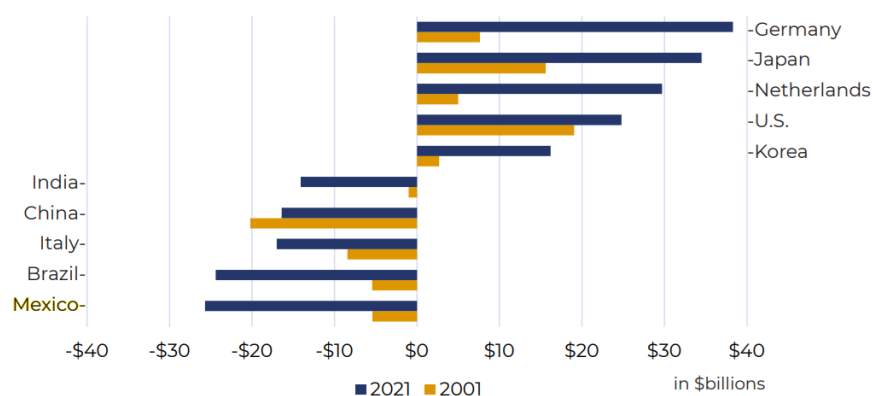
Región	Valor de la producción		Exportaciones	Importaciones	Balanza Comercial
América del Norte	603,6	13%	186,0	199,1	-13,1
América del Sur y Central	257,8	5%	32,6	78,0	-45,4
Europa	904,1	19%	708,7	706,2	2,5
Ex-Unión Soviética	134,3	3%	32,0	30,2	1,8
África y Medio oriente	211,6	4%	128,1	122,4	5,7
Asia-Pacífico	2.620,6	55%	653,5	631,1	22,4

Fuente: Elaboración propia con base en ACC (2022).

En lo que refiere al comercio global, todo el continente americano aparece como deficitario: en 2021, América del Norte presentó un déficit por USD 13 mil millones y en América del Sur y Central el balance negativo llegó a los USD 45 mil millones. México y Brasil fueron los dos países más deficitarios del mundo en 2021, con registros que se multiplican por 5 respecto de 2001 (Figura 1.3). Por su parte, los Estados Unidos aparecen como el cuarto exportador neto más importante, mejorando su resultado respecto de 2001. Europa presenta un superávit de USD 2,5 mil millones, con Alemania posicionándose como el mayor exportador neto del mundo en 2021 y los Países Bajos en tercer lugar. En Asia-Pacífico también aparece un superávit regional, por USD 22,4 mil millones. A nivel país, mientras que Japón es el segundo mayor exportador neto, China aparece como el cuarto país en cuanto a su déficit comercial.

No obstante, China es hoy el mayor exportador mundial de resinas de tereftalato de polietileno (PET), ácido de tereftalato purificado (PTA), cloruro de polivinilo (PVC) y fibras de poliéster. Adicionalmente, en los seis componentes básicos químicos (etileno, propileno, butadieno, benceno, xilenos mixtos y tolueno), la capacidad de producción china aumentó considerablemente en 2019, alcanzando un promedio del 38 % de la oferta mundial en 2022 (ICIS, 2023).

**Figura 1.3. Balance comercial de productos químicos (2011 vs 2021).
Cinco países con mayor superávit, y cinco países con mayor déficit en 2021**



Fuente: Extraído de ACC (2022)

1.5. Entorno: Los determinantes de cambio para la CGV de productos químicos

Los determinantes de Entorno son los que definen los potenciales senderos de cambio que enfrenta la estructura de la cadena de valor. A continuación, se analiza el grado de exposición que enfrenta la cadena de los químicos al comportamiento de los ciclos y a los *shocks* de diversa índole. Luego, se presentan los nuevos imperativos que enfrentan las cadenas globales de valor (en materia de resiliencia y sostenibilidad) y sus particularidades para el caso de la cadena de químicos. Finalmente, se presenta la estructura de regulaciones, normas y estándares mediante la cual estos cambios se institucionalizan en la cadena.

Exposición a ciclos y shocks

Como toda cadena global de valor, la de los productos químicos se ve afectada por una multiplicidad de *shocks*. Debido a la concentración y el carácter indiferenciado de los productos de los primeros eslabones, la cadena se ve particularmente expuesta a fluctuaciones en los precios internacionales y en las condiciones de disponibilidad de la oferta. Como se ha señalado, una estrategia de las grandes empresas para minimizar estos *shocks* fue la de la integración vertical (consolidando su posición de poder en toda la cadena), pero aun así permanece cierta exposición a eventos inesperados, como la aparición de fuentes alternativas⁹.

En los eslabones aguas abajo, asociados a los químicos de especialidad, los *shocks* siguen al ciclo económico y a las particularidades de cada segmento de mercado. Por ejemplo, los segmentos de mercado asociados a la provisión de insumos para la construcción y la industria automotriz, o aquellos asociados al consumo masivo hogareños (cuidado personal, limpieza del hogar), tienen una alta correlación con el ciclo económico.

El desempeño de la industria química, por lo tanto, está fuertemente asociado al crecimiento económico: la expansión de una cadena que abastece a prácticamente todas las cadenas de la economía es fundamental para permitir la expansión de todas éstas.

⁹ Por ejemplo, luego de la caída de los precios del petróleo crudo en 2014 (el barril de petróleo Brent pasó de US\$150 a US\$50), que afectó a la industria de derivados petroquímicos, emergieron nuevas fuentes de crudo como el *shale oil*, que posicionó particularmente a los productores estadounidenses, y fuentes alternativas como el gas natural (más accesible, debido a la aparición del *shale gas*). Esta sucesión de eventos comprometió las inversiones de largo plazo, y los productores continúan adaptándose a un escenario en permanente cambio (Davis, 2018).

Nuevos imperativos: resiliencia y sostenibilidad

Como vimos en el apartado anterior, el crecimiento de la CGV se consolidó en ciertos países asiáticos, así como también lo hizo la producción de otras cadenas. Con el *shock* global de la pandemia por el Covid-19, muchas cadenas han empezado a contemplar nuevas formas de organizarse, a fin de lograr una mayor resiliencia. En este sentido, se han vuelto populares conceptos como el *reshoring* o *nearshoring*, pero la evidencia de que las cadenas “más cortas” (en un sentido geográfico) sean más resilientes no es aún muy clara (Filippo *et al.*, 2023). De todas maneras, es de esperar que la estrategia de la CGV de los químicos se adapte a las disposiciones de localización de sus principales clientes.

Por su parte, las CGV enfrentan también un creciente imperativo de sostenibilidad, en el sentido de minimizar el impacto negativo de sus operaciones en el medio ambiente y en el entorno social en el cual se encuentran inmersas (Filippo *et al.*, 2023). En este contexto, la industria química viene siendo afectada por cambios fundamentales, con una mayor demanda de productos bajos en carbono, mayor concientización respecto al reciclado y al uso de materiales reciclados, mayor demanda por un uso eficiente de los recursos energéticos en la producción y mayores presiones regulatorias (McKinsey, 2023). De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), el sector químico es el mayor consumidor industrial de energía y el tercer subsector industrial en términos de emisiones directas de CO₂¹⁰. Esto se debe en gran medida a que alrededor de la mitad del combustible insumido por la cadena es en realidad utilizado como materia prima en el eslabón de sustancias básicas (IEA, 2023).

Adicional a la propia necesidad del sector de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la cadena se constituye también como un actor clave para el logro de los objetivos de descarbonización de las restantes industrias que se suceden a partir del consenso internacional en cuanto a la lucha contra el cambio climático (donde se incluyen hitos como la Agenda de Desarrollo Sostenible 2030 y el Acuerdo de París). Ejemplos de lo anterior son el desarrollo de plásticos a partir de recursos renovables (reduciendo la dependencia del sector petroquímico) y plásticos biodegradables¹¹, los químicos para el tratamiento de aguas, los biocombustibles, entre otras verticales que definen a lo que algunos autores denominan la “química 4.0” (Promexico, 2018). Esto implica, por ejemplo, desafíos en materia de I+D, pero también nuevas oportunidades de negocio dentro y fuera de la cadena¹². Los resultados de estas innovaciones serán fundamentales para la adaptación de las cadenas a las agendas de sostenibilidad.

Regulaciones, normas y estándares

La CGV de los químicos se ve atravesada por numerosas y crecientes regulaciones. Esto responde en parte a lo dicho anteriormente sobre la búsqueda de minimizar impactos sobre

¹⁰ Según la IEA, las emisiones directas de CO₂ de la producción química básica se mantuvieron relativamente constantes en alrededor de 935 millones de toneladas métricas (Mt) en 2022, como resultado de un estancamiento en la producción. Esto va de la mano con una intensidad de CO₂ de productos químicos básicos relativamente estable en los últimos años, en torno a 1,3 tCO₂ por tonelada de producto.

¹¹ Se prevé que el crecimiento de los productos químicos de origen fósil se desacelere al 1% anual, y que la producción de materiales fabricados a partir de materias primas sostenibles crezca alrededor del 11% anual hasta 2040, lo que representará más del 30% de la demanda total de polímeros para 2040 (McKinsey, 2023).

¹² Una forma interesante de agregar valor e innovar en la cadena es por medio de la transformación de productos en servicios. Esto es, cambiar la perspectiva desde el valor de las cosas al valor que proporcionan las cosas. En la industria electrónica, por ejemplo, un proveedor de productos químicos puede “alquilar” productos químicos a una empresa de semiconductores para procesar los chips, de modo que la empresa de semiconductores esté libre de la gestión de los productos químicos residuales. En este caso, las empresas químicas asumen el papel de consultores, resolviendo problemas y ofreciendo soluciones, mejores prácticas y garantías de rendimiento, al mismo tiempo que reducen los residuos y aumentan los ahorros de costos (ACC, 2022).

el medio ambiente y la salud de las personas, pero también por los potenciales usos perversos de los productos de la cadena (como por ejemplo en el terrorismo).

En materia de regulaciones, el enfoque planteado en 2007 por la Unión Europea (UE) ha influido en la normativa desarrollada posteriormente por otros países. El enfoque de la UE se conoce como REACH, por la sigla en inglés de “Registro, Evaluación, Autorización y Restricción” para sustancias químicas¹³. REACH tiene como objetivo garantizar que las sustancias químicas utilizadas en la Unión Europea se gestionen de manera segura y se minimice el riesgo para la salud y el medio ambiente. También promueve la innovación y la sustitución de sustancias peligrosas por alternativas más seguras, siempre que sea posible.

Los sistemas de Japón (CSCL, instaurado en 2010), China (REACH, de 2010), Taiwán (TSCA, cuya versión más reciente y acorde a REACH es de 2014) y Corea (K-REACH, de 2015) comparten parte de la estructura y objetivos del REACH europeo. En América del Norte, Canadá tiene un sistema que, si bien antecede al REACH, es consonante con sus principios (el *Chemical Management Plan*, CMP, de 2006). Esta ola de regulaciones modernas tiene en común las características de trasladar al productor (o importador) el costo o las acciones de verificación de cualidades y seguridad de las sustancias. Por tanto, se han constituido como una barrera a la entrada adicional para las empresas (European Commission, 2015). En Estados Unidos, esta carga sigue cayendo sobre el gobierno, según lo dispuesto en la *Toxic Substances Control Act* (TSCA), enmendada en 2016 y bajo la administración de la Agencia de Protección Ambiental (PEA).

Además de las regulaciones nacionales, existen tres acuerdos multilaterales que moldean el flujo del comercio de productos químicos a nivel global (Bamber *et al.*, 2016):

- Convenio de Rotterdam de 1998 sobre el Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo para Ciertos Productos Químicos Peligrosos y Plaguicidas en el Comercio Internacional;
- Convenio de Estocolmo de 2001 sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP); y
- Protocolo Regional de 1998 sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes del Convenio sobre la Contaminación Atmosférica a Larga Distancia (CLRTAP).

Estos acuerdos cubren partes diferentes, pero parcialmente superpuestas del ciclo de vida de los productos químicos, incluyendo producción, uso, emisiones, comercio y eliminación. El Convenio de Róterdam otorga a los países el poder discrecional de aceptar, rechazar o establecer condiciones específicas para la importación de ciertos productos químicos peligrosos. El Convenio de Estocolmo establece controles globales sobre la producción, uso, emisiones, comercio y eliminación de COP. Por su parte, el CLRTAP, que regula la producción y uso de sustancias reconocidas como dañinas y demostradas que presentan riesgos significativos.

Finalmente, el Sistema Globalmente Armonizado para la Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos, lanzado en 2003, ha sido adoptado por un gran número de países con el objetivo de facilitar la identificación de productos químicos específicos transportados entre dos países, reduciendo a su vez las barreras técnicas al comercio (Bamber *et al.*, 2016).

El Consejo Internacional de Asociaciones Químicas (ICCA, por sus siglas en inglés) cumple un rol clave en la coordinación regulatoria supranacional. En América Latina, las asociaciones de industria química de la región suscribieron en 2021 a la meta común de alcanzar los objetivos del Enfoque Estratégico para la Gestión Internacional de Productos Químicos

¹³ <https://echa.europa.eu/es/regulations/reach/understanding-reach>

(SAICM) a fin de minimizar los efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente y lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. Algunos de los principios claves incluyen:

- Implementar un enfoque más eficaz y eficiente para la gestión integral de las sustancias químicas combinando regulaciones basadas en ciencia con iniciativas voluntarias de la industria para proteger la salud humana y el ambiente a lo largo de su ciclo de vida y a través de la cadena de valor.
- Proseguir la implementación de modelos regulatorios basados en riesgo y compatibles entre sí en la región, que tomen en consideración tanto el peligro como la exposición.
- Planificar la implementación de nuevas regulaciones en etapas, iniciando con la identificación de las sustancias químicas en el comercio y sus principales usos, y luego procediendo a las etapas gestión de riesgos subsecuentes.
- Cumplir con los compromisos de transparencia bajo el Acuerdo de Obstáculos Técnicos al Comercio de la OMC y notificar las regulaciones propuestas de acuerdo con sus procedimientos acordados internacionalmente
- Asegurar que se lleve a cabo la evaluación de impacto regulatorio, con el objetivo de orientar y la toma de decisiones, evitando solapamientos con la normativa existente y analizando las alternativas disponibles, a fin de contribuir a que las acciones regulatorias alcancen los objetivos establecidos.
- Incrementar los esfuerzos para compartir datos mediante la adhesión al acuerdo de la OCDE sobre las normas de Aceptación Mutua de Datos (MAD) y Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL), promoviendo el uso de métodos alternativos a las pruebas en animales.
- Fomentar la convergencia regulatoria regional para facilitar las inversiones, la innovación y el comercio.

Desde el punto de vista privado, existen diversas normas y estándares de gran difusión en la cadena. Por supuesto, las normas no específicas son ampliamente utilizadas, como por ejemplo ISO 9001 (calidad), ISO 14001 (gestión ambiental), ISO 45001 u OHSAS 18001 (ambas de seguridad en el trabajo). Pero naturalmente que existen normas específicas para la industria; por caso, el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (GHS) establece estándares para la clasificación y etiquetado de productos químicos en todo el mundo, asegurando que la información de seguridad sea uniforme y comprensible. Finalmente, existen normas específicas por segmento de mercado; ocasionalmente, estas normas pueden ser impuestas por una determinada empresa o grupo de empresas.

2. Mapeando la CGV de los químicos en México

2.1. Introducción

México es un gran demandante de productos y sustancias químicas, fundamentalmente debido al gran tamaño de su industria manufacturera. Mientras que en economías como los Estados Unidos, la Unión Europea, la India o Brasil el sector manufacturero representa entre el 12 y el 17% del PIB, en México su participación está en el orden del 20% (McKinsey, 2022). En contraste, la industria química del país no solo es más pequeña que la de estos países, sino que además lleva unas tres décadas de constante retracción (mientras que en los otros países ha sido un sector en expansión). Por consiguiente, México se ha vuelto fuertemente dependiente de las importaciones de insumos químicos, y enfrenta hoy desafíos en materia regulatoria y de infraestructura para recuperar un sector que supo ser clave para su economía.

En este capítulo haremos uso del marco analítico presentado en la Parte 1 para el caso particular de la cadena de valor química en México. En la Sección 2.2 se caracteriza a la cadena a partir del valor de los ejes de producción, el comercio exterior, el empleo y la inversión extranjera. En la Sección 2.3 se caracteriza a la estructura empresarial local y su distribución geográfica. La Sección 2.4 pone el foco en las regulaciones locales y los actores gubernamentales. En la Sección 2.5 se presentan a otros actores relevantes además de las empresas y el gobierno. La Sección 2.7 actúa como resumen de las secciones previas, presentando una esquematización del mapeo de la CGV de químicos en México. Finalmente, la Sección 2.8 cavila sobre el futuro de la cadena de valor en México, destacando sus fortalezas y proponiendo posibles estrategias de *upgrading*.

2.2. Estructura de la industria química mexicana

Valor de la producción

Con un valor de US\$ 14,4 mil millones para el año 2022, la industria química mexicana representa el 9% de la producción manufacturera nacional, y el 1% del PIB (INEGI). A su vez, el país se posiciona como uno de los líderes en la producción de químicos de América Latina, ocupando el segundo lugar después de Brasil (Proméxico, 2018).

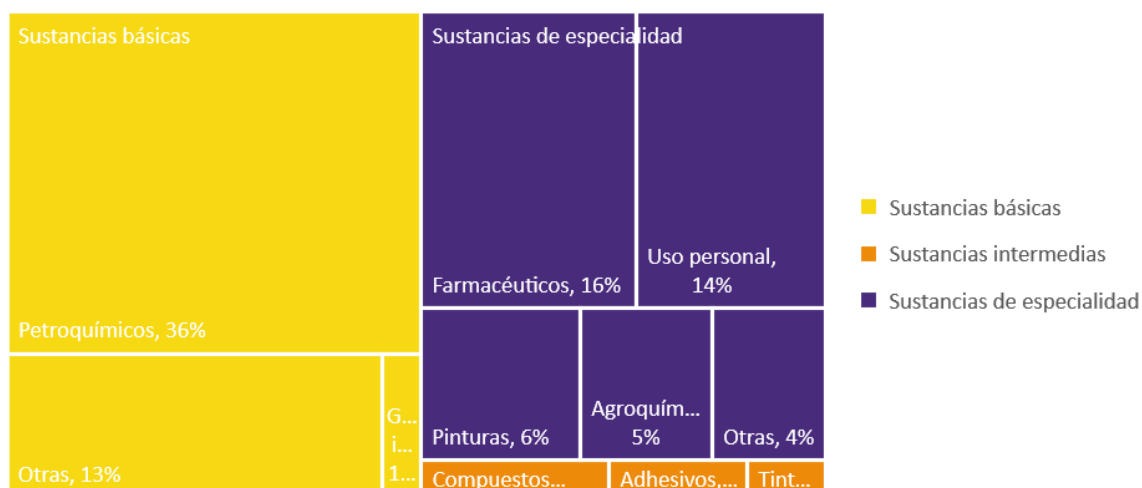
En términos de la estructura de la CGV definida en la primera parte de este documento, el 52% del valor de la producción proviene del eslabón de las sustancias básicas (Figura 2.1). Por su parte, las sustancias de especialidad contribuyen el 45%, y el 3% restante se asocia a los productos intermedios. Esta configuración se mantuvo prácticamente sin cambios durante la última década, con la excepción de 2015-2016, donde la caída en los precios del petróleo impactó negativamente en el valor de la producción de los productos petroquímicos.

En la Figura 2.1 puede apreciarse también la relevancia de los tipos de producciones dentro de cada eslabón. Los datos provienen de la Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera (EMIM) del INEGI, que desagrega la producción a nivel clase (6 dígitos) del SCIAN (Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte)¹⁴. Destacan principalmente los productos

¹⁴ Por razones de confidencialidad estadística, algunos reportes son omitidos, por lo que la distribución aquí presentada puede presentar sesgos. La agregación por eslabón puede consultarse en la Tabla A1.1 del Apéndice 1.

petroquímicos, que significan el 71% del valor generado en el eslabón de sustancias básicas, y el 36% del total de la cadena. En cuanto al eslabón de sustancias de especialidad, los principales grupos de productos los proporcionan los farmacéuticos y los de uso personal (con el 16% y 14% del valor de la cadena, respectivamente). Las pinturas y aislantes representan un 6%, y los agroquímicos y fertilizantes representan un 5%.

Figura 2.1. Composición de la producción química mexicana (2021-22)



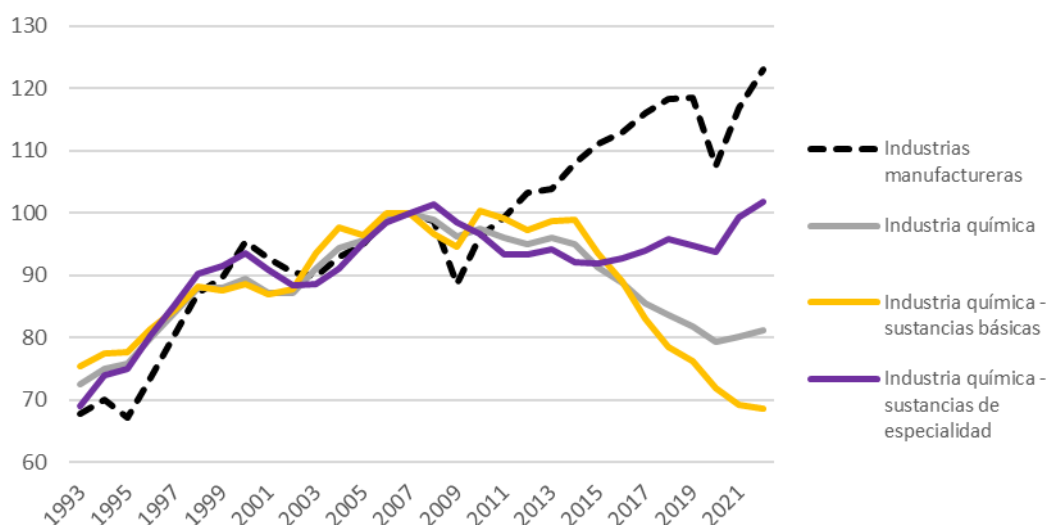
Fuente: Elaboración propia con base en EMIM-INEGI.

En lo que refiere a su evolución en el tiempo, la industria química nacional lleva más de una década de retracción. La producción de 2022 estuvo un 19% por debajo de la de 2007, mientras que la de la industria manufacturera en su conjunto estuvo un 23% por encima (Figura 2.2)¹⁵. Este desempeño responde fundamentalmente a lo que sucede en el eslabón de sustancias básicas (su producción de 2022 fue un 31% inferior a la referencia de 2007) y, en particular, a los productos petroquímicos¹⁶. Por su parte, las sustancias de especialidad, luego de un proceso de retracción asociado a la crisis global que duró hasta 2010, se estancaron en torno a un 5-10% por debajo del nivel de 2007. En 2022, no obstante, el segmento logró superar esa marca.

¹⁵ Debido a la naturaleza de la fuente de datos, las Sustancias Intermedias son agrupadas en conjunto con las Sustancias de Especialidad.

¹⁶ En México, se definió que *Petróleo Mexicanos (Pemex)* fuera el principal productor de sustancias petroquímicas básicas, dejando al sector privado los segmentos de especialidad (De María y Campos, 2017). De esta manera, *Pemex* es el principal proveedor de productos petroquímicos básicos y sus derivados, como etileno, propileno, butadieno, y polímeros como polietileno y polipropileno. Desde 2014, las condiciones del mercado global y la falta de inversiones por parte de *Pemex* llevaron a una situación de constante caída de su producción a la fecha. De acuerdo con datos de la ANIQ, actualmente este segmento opera en menos del 70% de su capacidad instalada, y la producción de etano y propileno de Pemex es de menos de una tercera parte de su máximo valor registrado en 2013.

Figura 2.2. Evolución del VAB de la industria química (2007 = 100).



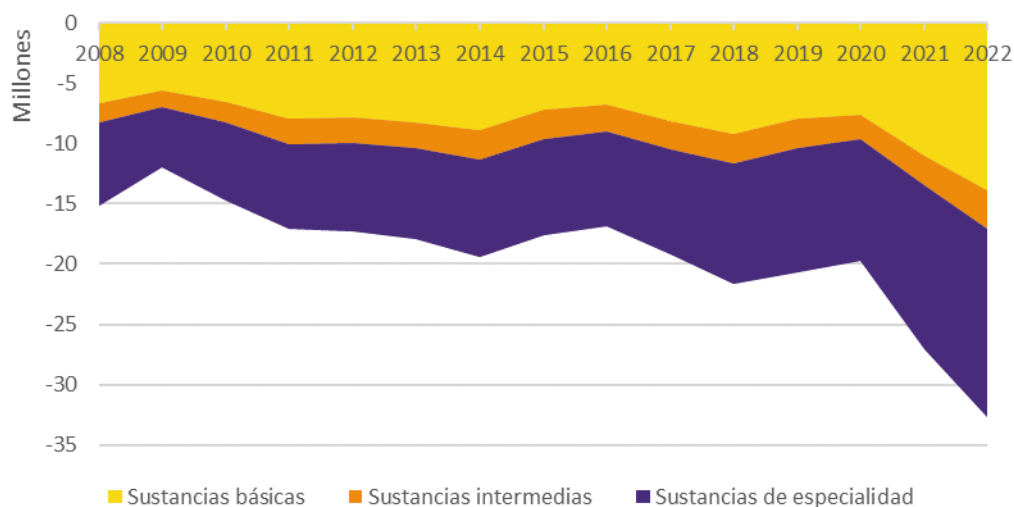
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI.

Comercio exterior

La industria química lleva al menos tres décadas de déficit en su balance de comercio exterior. Esto se ha agravado con los años, ante la reducción de la producción química nacional y el crecimiento de la demanda de productos químicos proveniente de los sectores de la economía. Según estimaciones de la ANIQ, la industria local abastece solo un tercio de la demanda local de productos químicos; el resto, debe ser importado (McKinsey, 2022).

De acuerdo con los datos de WITS–UN COMTRADE, el déficit comercial llegó a los US\$ 33 mil millones en 2022, el mayor del mundo en lo que refiere a químicos (lo cual va en línea con los datos presentados en la Figura 1.3). Como se puede apreciar en la Figura 2.3, en 2022 el 48% de este total (US\$ 16 mil millones) correspondió a sustancias de especialidad; el 43% (US\$ 14 mil millones) a químicos básicos; y el 9% restante (US\$ 3 mil millones) a sustancias intermedias. A pesar del comportamiento disímil que tuvo la producción nacional por eslabón, la distribución porcentual del déficit comercial se mantuvo relativamente estable en el periodo que va desde 2007 a 2022.

**Figura 2.3. Evolución del saldo de la cuenta comercial por eslabón
(en miles de millones de dólares corrientes)**



Fuente: Elaboración propia con base en WITS-UN COMTRADE.

Dentro de la canasta exportadora de productos químicos, las diez principales posiciones a cuatro dígitos representan el 54% del total (Tabla 2.1). El principal producto destinado a los mercados internacionales es medicamentos (HS 3004), por un valor de US\$ 1,3 mil millones, lo cual representa el 12% de la canasta química¹⁷. No obstante, el indicador de ventaja comparativa revelada (RCA, por sus siglas en inglés)¹⁸ es de apenas 0,1; esto es, México dista de tener una ventaja comparativa en ella. Dentro de este ranking, solo 3 productos presentan ventajas comparativas reveladas ($RCA > 1$); todos vinculados al cuidado personal (lociones y jabones), sumando un 17% de las exportaciones de químicos. Finalmente, solo aparecen dos sustancias básicas en la lista (ácidos fórmicos y policarboxílicos, ambos de origen orgánico, insumidos por la producción de otros productos químicos de especialidad y por otras cadenas de valor), que suman una participación del 6% (3% en cada caso).¹⁹

¹⁷ En esta sección que refiere al comercio internacional, se usan datos de comercio según el nomenclador de Código Armonizado (HS). La agregación por eslabón puede consultarse en la Tabla A1.2 del Apéndice 1.

¹⁸ Diremos que una economía produce un bien con ventaja comparativa revelada ($RCA > 1$) cuando su participación en las exportaciones del país supera la participación de ese mismo bien en las exportaciones totales a nivel global.

¹⁹ Analizada a cuatro dígitos, México no tiene productos con $RCA > 1$. Sin embargo, cuando se analiza la canasta exportadora de 6 dígitos, México tiene $RCA > 1$ en cuatro sustancias básicas. Ver más detalle en la sección 3.4.

Tabla 2.1. Diez principales productos químicos exportados por México (2022)

Posición HS4	Productos	Valor exportado (miles de US\$)	Porcentaje sobre exportaciones químicas	RCA
3004	Medicamentos	1,283,200	12%	0.10
3402	Limpiadores de superficie orgánicos	826,324	8%	0.85
3307	Lociones corporales	753,926	7%	1.91
3305	Lociones para el cabello	697,395	6%	1.62
3304	Productos de belleza	453,243	4%	0.26
3401	Jabones	409,407	4%	1.19
3808	Insecticidas	376,678	3%	0.28
2915	Ácido fórmico	361,930	3%	0.82
3824	Aglutinados industriales	347,387	3%	0.12
2917	Ácidos policarboxílicos	334,745	3%	0.89

Nota: Las filas destacadas corresponden a aquellos productos con ventajas comparativas reveladas (RCA > 1).
 Barras en violeta indican productos del eslabón de sustancias de especialidad; en amarillo, del eslabón de sustancias básicas.
 Fuente: Elaboración propia con base en WITS-UN COMTRADE.

Por el lado de las importaciones, las diez principales posiciones significan exactamente la mitad del valor comprado en 2022. El principal punto saliente de la Tabla 2.2 es que la primera posición del *ranking* (con el 8% del total) es la misma que la que lidera el de exportaciones: medicamentos. Los restantes productos (tres de los cuales son productos básicos de origen orgánico) son utilizados nacionalmente aguas abajo en la cadena, o en otras actividades (sea industriales o agropecuarias).

Tabla 2.2. Diez principales productos químicos importados por México (2022)

Posición HS4	Productos	Valor importado (miles de US\$)	Porcentaje sobre importaciones químicas
3004	Medicamentos	3,406,351	8%
3824	Ligantes industriales	2,855,399	7%
3815	Iniciadores de reacción	2,705,093	6%
2902	Hidrocarburos cíclicos	2,339,389	5%
3302	Mezclas de sustancias odoríferas	2,150,453	5%
3002	Hemoderivados	1,733,496	4%
3102	Fertilizantes simples	1,322,415	3%
2909	Alcoholes	1,263,226	3%
2903	Derivados halogenados de hidrocarburos	979,251	2%
3105	Fertilizantes compuestos	920,943	2%

Nota: Barras en violeta indican productos del eslabón de sustancias de especialidad; en amarillo, del eslabón de sustancias básicas.

Fuente: Elaboración propia con base en WITS-UN COMTRADE.

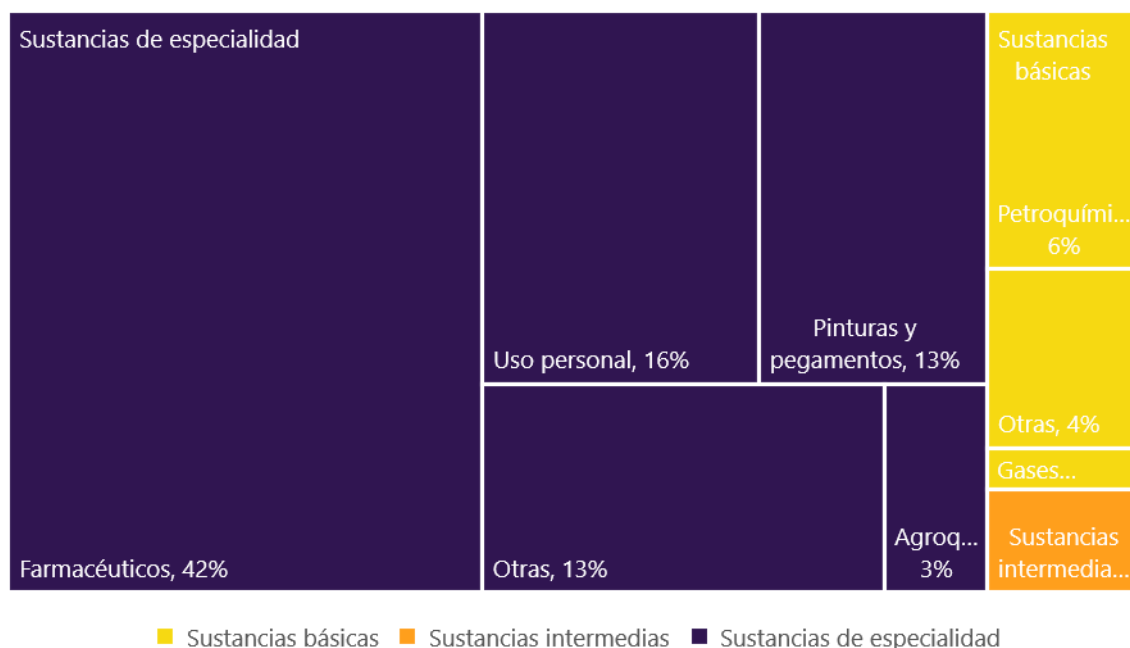
Empleo

Según la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE) del INEGI, en el primer trimestre de 2023, la población ocupada directa e indirectamente por la cadena de valor de los productos químicos fue de 339 mil personas, donde el 63% son hombres con un salario promedio mensual informado de MX\$ 6 mil, y el 37% son mujeres con un salario de MX\$ 5,5

mil. Se trata de un sector con alta formalidad (91% de los ocupados, cuando en el resto de la economía la formalidad tiende a ubicarse debajo del 50%).

Debido a las características de los modelos de producción de cada eslabón que revisamos en la primera parte del documento, el eslabón de los productos de especialidad es el que genera una mayor cantidad de empleo. De acuerdo con la estructura de datos de la EMIM que se presenta en la Figura 2.4, en 2023, el 85% de los ocupados de la industria se desempeñan en la producción de especialidad (creciendo 2 puntos porcentuales respecto del valor de hace una década). Al interior de este eslabón, los preparados farmacéuticos generan más de la mitad del empleo (51%). Por su parte, las sustancias básicas tienen un modelo productivo que resulta mucho más intensivo en capital. Por lo tanto, en este eslabón se genera solo el 12% del empleo de 2023 (2 puntos menos que en 2013).

Figura 2.4. Composición del empleo en la industria química mexicana (2023)

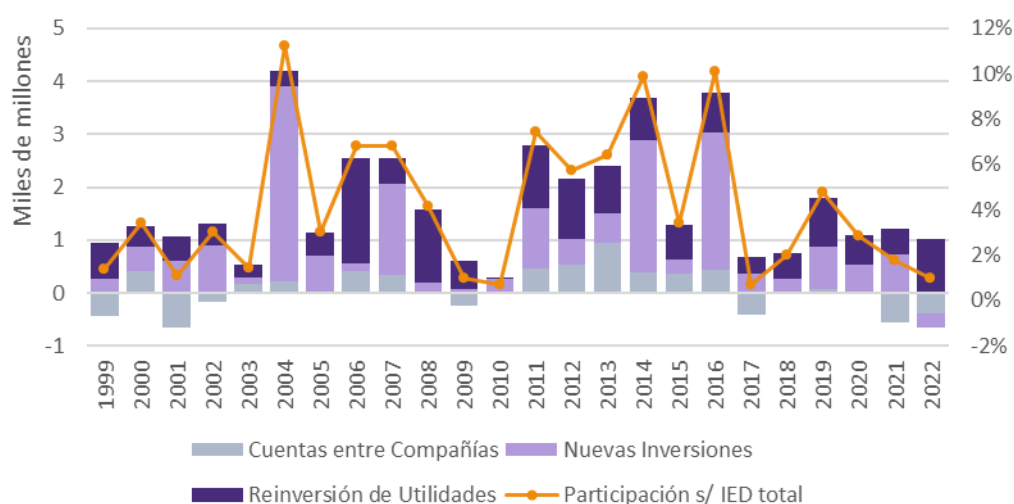


Fuente: Elaboración propia con base en EMIM-INEGI.

Inversión extranjera

Durante la década previa a la pandemia, la industria química recibió anualmente, en promedio, el 5% de la Inversión Extranjera Directa (IED) nacional, superando a la incidencia que el sector tiene en el valor agregado del país (1%). No obstante, en 2022 el indicador fue de 1%, con US\$ 1.000 millones que vinieron fundamentalmente de reinversión de utilidades, mientras que las nuevas inversiones y las cuentas entre compañías registraron movimientos negativos (Figura 2.5).

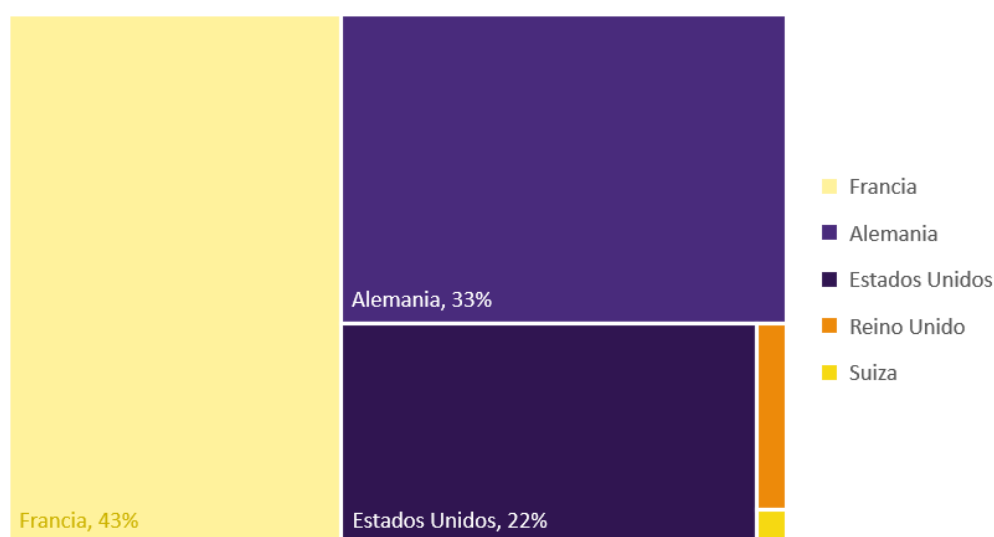
Figura 2.5. Inversión Extranjera Directa en la industria química por tipo (eje izquierdo) y porcentaje sobre el total de IED (eje derecho)



Fuente: Elaboración propia con base en DataMexico.

En cuanto al origen, Francia y Alemania aparecen como los líderes (con el 43% y 33%, respectivamente) para el bienio 2021-22 (Figura 2.6).²⁰ Por su parte, Estados Unidos participa con un 22%. El restante 2% lo completan el Reino Unido y Suiza. A su vez, hubo países con flujos negativos (Brasil, Países Bajos y España).

Figura 2.6. Inversión Extranjera Directa por origen* (2021-22)



* Se consideran solo países con flujos positivos.
Fuente: Elaboración propia con base en DataMexico.

2.3. Empresas y geografía de la cadena

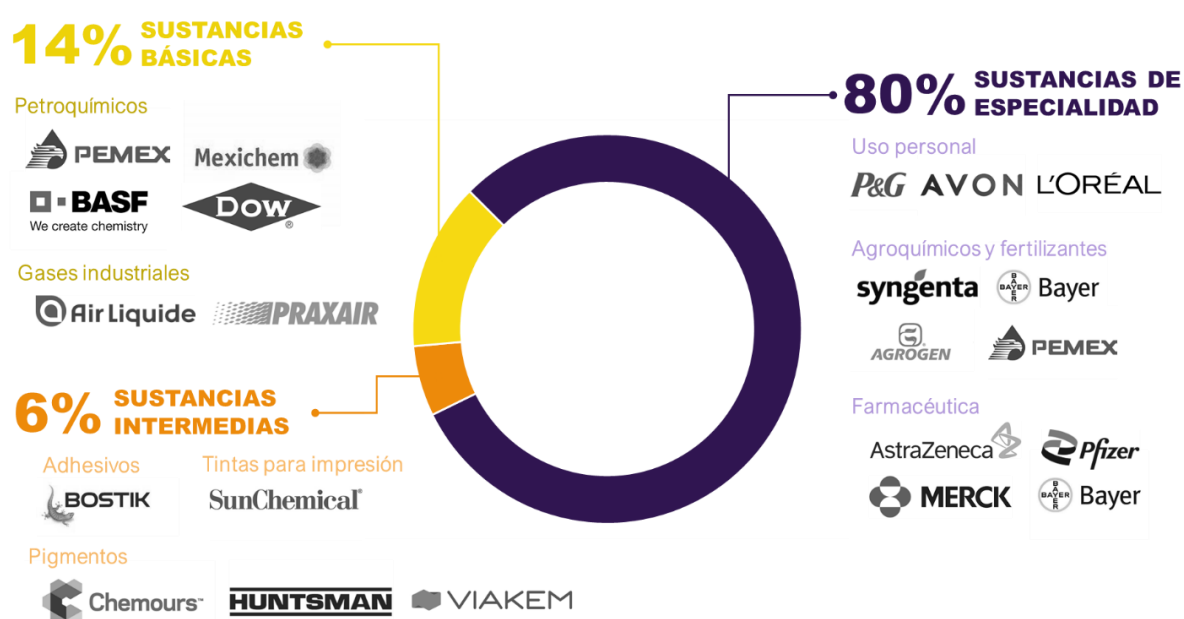
De acuerdo con el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del INEGI, en México existen 5.962 unidades económicas dedicadas a la producción de sustancias químicas. El 10% de ellas (591) se consideran grandes empresas, de acuerdo con

²⁰ Los porcentajes se calculan sobre el total de países con flujos positivos en 2021-22.

su rango de empleo.²¹ Dentro de ellas, *Petróleos Mexicanos (Pemex)* es la #1 del *ranking* 2023 de las 50 principales empresas mexicanas de la revista Expansión. Otras empresas especializadas en petroquímicos (donde se cuentan a los líderes mundiales, como por ejemplo *BASF* y *Dow*, pero también firmas nacionales como *Mexichem* y *Alpekdown*) también aparecen en este *ranking*. Por su parte, hay 28 empresas de productos de especialidad en este *ranking* (7 de las cuales son de origen mexicano).

De las restantes unidades económicas, el 5% (320) se consideran medianas. El 22% (1.285) son pequeñas, y el 63% (3.766) son microempresas. En estos dos últimos segmentos, predominan las empresas dedicadas a las sustancias de especialidad, donde la escala es menos relevante.

Figura 2.7. México. Distribución porcentual de unidades económicas de la cadena de químicos, por eslabón y principales empresas



Fuente: Elaboración propia con base en DENUE-INEGI.

Teniendo en cuenta el eslabón de la cadena en el que se especializan, existen 829 unidades económicas asociadas a la producción del eslabón de sustancias básicas. De ellas, el 41% se especializa en petroquímicos. Casi un tercio de éstas se ubica en el Estado de México y Ciudad de México. Nuevo León y Guanajuato son los siguientes Estados de mayor relevancia, cada uno con un 10% de las unidades económicas registradas.

²¹ Las empresas de más de 100 empleados se consideran grandes. Las medianas tienen entre 50 y 100 empleados. Las pequeñas entre 10 y 50. Finalmente, empresas de hasta 10 empleados se consideran micro.

Figura 2.8. Eslabón de sustancias básicas.
Cantidad de unidades económicas por tamaño y localización



Fuente: Elaboración propia con base en DENUE-INEGI.

En el eslabón de sustancias intermedias hay 349 unidades económicas especializadas, 15% de las cuales son grandes empresas. Geográficamente, en el Estado de México se ubica el 18%, en Guanajuato el 16%, en Nuevo León el 13%, en la ciudad de México otro 13%, y el 10% en Jalisco.

Figura 2.9. Eslabón de sustancias intermedias.
Cantidad de unidades económicas por tamaño y localización



Fuente: Elaboración propia con base en DENUE-INEGI.

Finalmente, el grupo más numeroso es de las empresas de sustancias de especialidad, con 4.784 unidades económicas registradas. En este caso, las microempresas tienen una gran predominancia, representando el 68% de ellas. Geográficamente, se encuentran distribuidas por todo el país, pero el territorio conjunto del Estado de México y la Ciudad de México absorben el 28% de los registros. Siguen en relevancia Jalisco (12%), Nuevo León (7%), Guanajuato (7%) y Puebla (5%). Los restantes Estados tienen participaciones inferiores al 4%.

Figura 2.10. Eslabón de sustancias de especialidad.
Cantidad de unidades económicas por tamaño y localización



Fuente: Elaboración propia con base en DENUE-INEGI.

2.4. Regulaciones y gobierno

En la parte 1 de este documento, presentamos al enfoque REACH como un abordaje integral de plantear la regulación sobre la producción y uso de sustancias químicas, delegando en los productores o importadores la carga de la prueba de las características y seguridad de tales sustancias. En México, esta carga recae parcialmente en el gobierno y, de manera importante, en las comunidades y la asumen, asimismo, algunas organizaciones civiles y la academia (CSG, 2019). A su vez, existen superposiciones y responsabilidades débilmente asignadas entre al menos 11 dependencias públicas (CSG, 2019).

Dentro de las dependencias encargadas de la supervisión de sustancias, destaca la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), que es la autoridad encargada de regular y supervisar los productos químicos y farmacéuticos en México para garantizar su seguridad y calidad. Adicionalmente, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la institución gubernamental encargada de proteger y preservar el medio ambiente en México, regulando a su vez aspectos relacionados con la industria química.

La débil gobernanza del sistema regulatorio mexicano ha llevado a que los representantes de las agencias de Estados Unidos (EPA) y la Unión Europea (ECHA) manifiesten la urgencia de que el país, como socio comercial integrado a sus CGV, cuente con un marco legal robusto y específico para el registro, etiquetado y manejo seguro de las sustancias químicas. Parte de estas preocupaciones pasan por que el país pueda honrar los compromisos asumidos en tratados y convenios internacionales, como los de Basilea sobre movimiento Transfronterizo de Residuos Peligrosos, de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes, de Minamata sobre mercurio y sus compuestos, el Protocolo de Montreal sobre sustancias que agotan la capa de ozono, así como del Enfoque Estratégico para la Gestión de Productos Químicos a Nivel Internacional (SAICM). Además, en el marco del T-MEC, será necesario realizar modificaciones para compatibilizar regulaciones con Estados Unidos y Canadá, debido a que el enfoque local se basa actualmente en un concepto de peligro, mientras que en el de los socios se construye sobre la idea de riesgo (CSG, 2019).

Actualmente, el Consejo de Salubridad General, dependiente del sector salud en México, ha declarado que pretende impulsar la aplicación de una política nacional en materia de sustancias químicas²².

La nueva normativa deberá ser contemplativa de las nuevas agendas de sostenibilidad ambiental mencionadas en la primera parte de este documento. La economía circular y la reutilización de los productos y sustancias químicas ocupan un lugar destacado en dicha agenda, debido al alto impacto que la cadena tiene en el ambiente vía sus desechos. En este sentido, el Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico en México, firmado a finales de 2019, compromete a sus firmantes a eliminar los plásticos de un solo uso innecesarios para 2030 (ANIPAC, 2021). Por último, México podría iniciar un particular camino de circularidad, puesto que, si bien el cambio climático genera pérdidas potenciales por activos deteriorados, una parte de esa infraestructura productiva podría reacondicionarse para la industria química.

2.5. Academia y otros actores

Según Promexico (2018), la oferta educativa nacional vinculada a la industria química cuenta con 9 carreras y 2 programas de educación técnica que para el ciclo 2016-2017 acumularon más de 500 egresados.

A su vez, el estudio citado identificó 68 centros de I+D para la industria química, distribuidos por todo el país. Entre éstos, destacan el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) y la Facultad de Química de la UNAM, la cual se divide a su vez en cuatro instituciones: la Unidad de Experimentación Animal (UNEXA), la Unidad de Investigación Preclínica (UNIPREC), la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria (USAI) y la Unidad de Servicios para la Industria de Alimentos (USIA).

Adicionalmente, en lo que refiere a los profesionales de las ciencias químicas, dos entidades de relevancia son el Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos (IMIQ) y la Asociación Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (AMIDIQ).

2.6. Transporte y aduana

México cuenta con un amplio sistema de infraestructura de conectividad que incluye aproximadamente 117 puertos marítimos, 370 mil kilómetros de carreteras, 27 mil kilómetros de vías ferroviarias y 76 aeropuertos complementados con aduanas y terminales ferroviarias²³.

De todas maneras, se enfrentan problemas particulares, como el hecho particular de que la Carretera 57 es la única que transporta mercaderías desde el centro del país al norte, y la elevada inseguridad en carreteras.

En la medición de 2022 del Índice de Transporte Logístico del Banco Mundial, México se ubicó en el puesto 47 entre 155 países, con una puntuación de 2,9 en una escala que va desde 1 (peor valor) a 5 (mejor valor). Este valor es similar al de otros países de la región, como Chile, Costa Rica y Colombia, pero se ubica por debajo de la nota promedio de los países de la OCDE (3,7). Este puntaje es representativo tanto de la infraestructura de

²² <https://aniq.org.mx/webpublico/Notas/Nota.asp?id=84>

²³ <https://www.pwc.com/mx/es/industrias/transpo-logistica.html>

transporte, como de los servicios logísticos disponibles en el país. En particular para la infraestructura de sustancias químicas, los entrevistados consultados en este estudio coincidieron en falta de inversión y desaprovechamiento de las instalaciones existentes bajo propiedad de *Pemex*. De acuerdo con McKinsey (2022), la inversión gubernamental en infraestructura para permitir los flujos logísticos y energéticos pasó del 0,5% del PIB en 2015 al 0,1% en 2020²⁴. En un contexto donde la producción nacional de gas ha disminuido, aparecen cuellos de botella en los gasoductos de importación, lo que limita el suministro disponible para los complejos petroquímicos en el sur de México.

Por su parte, dada la creciente dependencia del país de insumos químicos importados, las variables de facilidad fronteriza son especialmente relevantes. Si bien México tiene puntajes altos (90 puntos sobre 100) en el Índice de facilidad de Negocios del Banco Mundial (2020), en un estudio de Filippo y Guaipatin (2021) los empresarios mexicanos coinciden en que ha habido una complejidad creciente en la gestión empresarial, por ejemplo, de programas como el IMMEX. La falta de armonía regulatoria sobre químicos con los socios comerciales se traduce en un impedimento adicional.

2.7. Mapeo de la cadena de químicos en México

A modo de resumen de lo detallado hasta aquí, la Figura 2.11 esquematiza la cadena de valor de los productos químicos en México. En cuanto a su integración al mundo, se tiene que - dentro de los principales grupos de productos- México no aparece entre los principales exportadores y, en consonancia, no cuenta con ventajas comparativas reveladas en la mayoría de las posiciones arancelarias. Como se vio anteriormente (Tabla 2.1), las ventajas aparecen solo en algunas posiciones de los productos de uso personal, donde se incluyen cosméticos, fragancias, aceites esenciales, jabones, y otros. En este grupo de productos es donde aparece la mayor cantidad de unidades económicas, de acuerdo con el DINUE de INEGI.

En cuanto a las actividades de soporte, la principal tiene que ver con la I+D. De acuerdo con la última Encuesta sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico (ESIDET, 2017) de INEGI, el 11% de las empresas químicas realizan actividades de I+D intramuros, lo cual está muy por encima del promedio del total de sectores (en el orden del 3%). Con todo, las solicitudes de patentes químicas de México equivalen aproximadamente al 0,5% de las presentadas en Estados Unidos y al 15% de las de Brasil (McKinsey, 2022). Para significar los esfuerzos locales de I+D y potenciar los resultados, es importante que existan instituciones de soporte, como lo son CINESTAV, la AMIDQ y las diversas universidades del país, que cumplen un rol especialmente relevante en la ciencia básica, pero también para contribuir en el desarrollo de las adaptaciones que la industria química requiere para recalibrarse en un nuevo entorno que demanda a todas las actividades productivas comportamientos sostenibles. En total, Promexico (2018) identifica a 68 centros de I+D vinculados a la industria química distribuidos en todo el país.

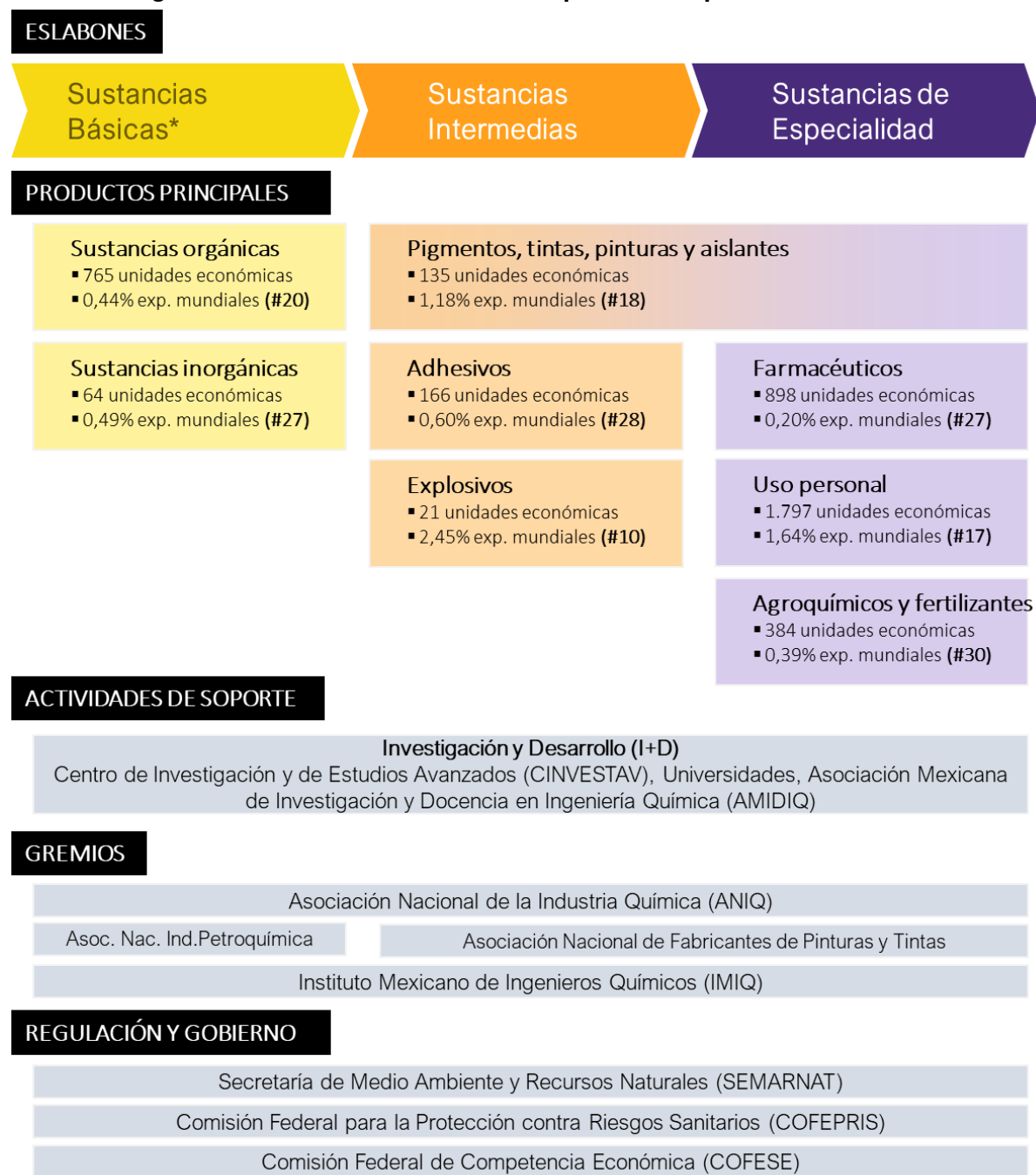
En cuanto a la gobernanza local, muchas de las grandes empresas multinacionales se encuentran presentes en el país, principalmente para abastecer a clientes locales. El mayor gremio es la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ), una Asociación Civil constituida en 1959. Del total de empresas de la industria química, aproximadamente 260, de todos los tamaños, se encuentran afiliadas a la ANIQ. Según datos de la propia entidad, estas empresas representan más del 95% de la producción química nacional. Además de ANIQ, existen otras asociaciones y cámaras que representan subsectores específicos, como la

²⁴ En comparación, China invirtió entre el 5 y el 6 por ciento del PIB en infraestructura en 2020 (McKinsey, 2022).

Asociación Nacional de la Industria Petroquímica y la Asociación Nacional de Fabricantes de Pinturas y Tintas, entre otras.

Por el lado del gobierno y las regulaciones, los principales actores identificados son la SEMARNAT y COFEPRIS, pero México no cuenta actualmente con una regulación integrada y coherente acorde a los estándares internacionales. También es fundamental la coordinación entre esos entes y la Comisión Federal de Competencia Económica (COFECE), que regula diversos aspectos relacionados con prácticas monopólicas en la producción y distribución de cualquier sustancia, incluidos los químicos (con capacidad de controlar y multar a las grandes empresas públicas, entre ellas, PEMEX, o los canales de distribución y logística, como las tarifas de ferrocarriles).

Figura 2.11. Cadena de valor de los productos químicos en México



* Las sustancias básicas pueden comercializarse como *commodities*, o bien diferenciadas según su grado de pureza (la alta pureza es requerida particularmente por la industria de semiconductores y farmacéuticas).

Nota: Los datos de exportaciones corresponde al bienio 2021-2022 (UN-COMTRADE). Unidades económicas de DENE-INEGI.

Fuente: Elaboración propia con base en fuentes varias.

2.8. Estrategias de *upgrading*: el futuro de la cadena de los químicos en México

En un estudio reciente llevado a cabo por ANIQ y McKinsey (2022), se analizan las perspectivas que enfrenta la industria química nacional. Para este análisis, se destacan las fortalezas de la industria local, a saber:

- **Gran tamaño de mercado.** Según el estudio, el consumo mexicano de productos químicos equivale a unos US\$ 40 mil millones, sostenidos principalmente por el gran tamaño de la industria mexicana²⁵. Esto coloca a México entre los 15 mayores consumidores de petroquímicos a nivel global.
- **Ubicación estratégica.** Frente a la aparición de las nuevas estrategias globales de *nearshoring*, México se encuentra muy bien posicionado geográficamente para establecer negocios con Estados Unidos y Canadá en el marco del T-MEC, pero también para ser un proveedor regional en América Latina (el transporte a la región desde México es alrededor de un 50% más barato y un 80% más rápido que desde los países asiáticos).
- **Acceso a materias primas y reservas competitivas.** México tiene grandes reservas de gas natural. Además, la potencial apertura de la refinería Olmeca en Dos Bocas (Tabasco), así como el plan de mejora de refinerías del país, podrían generar subproductos adicionales de nafta y propileno que benefician a la industria química.
- **Economía Circular.** Tomando cuenta de la agenda marcada por el imperativo de sostenibilidad ambiental y el Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico, el país se ha posicionado en el reciclaje mecánico de plásticos: alrededor del 15-20% del total de plásticos del país se reciclan, en comparación con el 10-15% de países como Brasil, India o Estados Unidos. Además, México es uno de los primeros países en adoptar el tereftalato de polietileno reciclado (rPET) de grado alimenticio, lo cual señala el potencial de expandirse a otros polímeros²⁶.
- **Recursos renovables.** México tiene un privilegiado acceso a abundantes fuentes de energías renovables, como la solar y la eólica. Los nuevos proyectos solares y eólicos hoy podrían ofrecer un costo entre un 10 y 20% más barato que el promedio mundial, lo que colocaría a México entre los cinco principales proveedores mundiales de energía solar de bajo costo.
- **Disponibilidad de mano de obra.** México cuenta con mano de obra calificada de bajo costo relativo: el salario medio es alrededor de un 90% más bajo que el de Estados Unidos y alrededor de un 65% más bajo que el de China.

A pesar de estas fortalezas, el estudio advierte que, en un escenario “*business as usual*”, sin un cambio de política sobre el sector, la industria química seguiría en el camino descendente que viene enfrentando desde hace más de una década. En particular, se proyecta una caída de entre 20 y 30% para el sector petroquímico entre 2021 y 2035, con el consecuente deterioro en la balanza comercial. Esta caída sería compensada por un sector de especialidades creciendo entre el 1 y 2%, como hasta ahora. Fuera de este escenario base poco alentador, el estudio identifica tres grandes estrategias de desarrollo sectorial para los próximos quince años.

En el marco analítico de las CGV, las estrategias de *upgrading* son aquellas acciones coordinadas que entablan empresas y gobiernos a fin de mejorar su posición en las CGV, procurando una mayor captura de valor agregado (Gereffi, 2019; Gereffi y Fernández-Stark, 2019). Cuando un país ya cuenta con actividades en una determinada CGV, las estrategias de *upgrading* pueden ser esencialmente de tres tipos (Filippo *et al.*, 2023). En orden creciente de complejidad, son las siguientes. La primera de ellas es “Mejorar eslabones”; esto es, mantener la posición en los eslabones en los que se participa, pero ganar competitividad de

²⁵ La industria manufacturera de México representa el 20% del PIB del país. Esto es más alto que en economías como Brasil, la Unión Europea, India y Estados Unidos, donde la manufactura representa entre 12 y 17% del PIB (McKinsey, 2023).

²⁶ Ver ANIPAC (2021) para los avances en materia del Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico.

acuerdo con los estándares vigentes en otras geografías. La segunda es “Mejorar la cadena”, lo cual implica moverse a eslabones de mayor valor agregado relativo en los que el país no participaba hasta el momento. La tercera es “Desarrollar nuevas cadenas”, que impliquen un mayor valor agregado que las actividades que ya se realizan. Dadas las características de las cadenas de valor de químicos, las tres estrategias pueden ser válidas con México, y se corresponden con tres posibles escenarios de desarrollo analizados en McKinsey (2022).

En la estrategia de mejoras de eslabones, México podría optar por aprovechar sus reservas de hidrocarburos, y recuperar la competitividad perdida en el eslabón de productos básicos. En términos del planteo de McKinsey (2022), esto puede entenderse como un “rejuvenecimiento de la base”. Con inversiones en este eslabón, se aseguraría materia prima petroquímica (etano, propano, nafta) suficiente para mejorar la competitividad aguas abajo, dando una solución al gran déficit comercial que enfrenta la cadena en el país. Estas inversiones incluyen aumentar la producción de los yacimientos de gas, mejorar las instalaciones de fraccionamiento para la extracción de etano, y modernizar las refinerías existentes. Las erogaciones necesarias irían en el orden de los US\$ 45-55 mil millones en 15 años.

La estrategia de desarrollar nuevos eslabones puede implicar para México el planteo de la posibilidad de realizar nuevas actividades en el eslabón de sustancias de especialidad, aprovechando su ventajosa posición geográfica y comercial con Estados Unidos. Esto es, aprovechar la reconfiguración de las CGV, tanto en términos de las estrategias de *reshoring* y *nearshoring*, como de las nuevas cadenas, productos y servicios que emergen a la luz de la necesidad de una producción más sostenible.

Las preguntas a responder aquí son dos. Por un lado, qué necesitan las cadenas de valor con potenciales estrategias de *nearshoring* en el marco del T-MEC (semiconductores, automóviles, electrónicos). Por otro lado, cuáles de estas necesidades pueden ser abordadas por la industria química mexicana.

Esta estrategia necesitará, fundamentalmente, resolver problemas de coordinación e iniciar proyectos de I+D colaborativa entre los productores locales y estos clientes. Una normativa regulatoria moderna, una alta suscripción de estándares, un adecuado sistema de derechos de propiedad, y el desarrollo de capacidades en las empresas locales son puntos clave para lograr explotar estos nichos con éxito. El estudio de McKinsey estima que este camino de desarrollo involucraría una inversión de entre US\$ 30 y 40 mil millones en los próximos quince años.

La tercera estrategia implica ir a nuevas cadenas. En el contexto de los productos químicos, ya hemos dicho que, en realidad, se trata de una cadena que es la intersección de numerosas cadenas. Para el estudio de McKinsey, este camino implica “reimaginar la industria”; esto es, posicionar a México en el futuro de la industria. Para esto, deben incrementarse los esfuerzos de I+D y capital para desarrollar los productos que contribuirán a reemplazar a las fuentes petroquímicas, y consolidar la posición del país en materia de economía circular. Aprovechando su ventajoso acceso a fuentes abundantes de energía solar y eólica, México podría también convertirse en un líder regional en hidrógeno y amoníaco verde, para ayudar a descarbonizar la industria química y de refinación. En cuanto al aprovisionamiento de materia prima, el estudio sugiere considerar la posibilidad de importar materias primas de bajo costo, dado que México está cerca de dos de las cuencas de petróleo y gas de menor costo del mundo: la Cuenca Pérmica y Eagle Ford en el suroeste de Estados Unidos. Esta estrategia, más integral y disruptiva, conllevaría inversiones por US\$ 60-75 mil millones en los próximos quince años. Además de este gran esfuerzo en capital, sería fundamental

resolver numerosos problemas de coordinación entre el gobierno, los actores existentes, y potenciales nuevos actores.

Lo que tienen en común los tres caminos es que tienen sentido solo en el actual contexto, donde se le ofrece a México la oportunidad de recuperar posiciones en una industria que resulta clave para su desarrollo de corto, mediano y largo plazo. La estrategia de política puede incluso tomar elementos de las distintas alternativas propuestas. A continuación, en la tercera y última parte de este documento, haremos foco en el aprovechamiento de la reconfiguración de la CGV de los semiconductores y el aumento de la capacidad productiva de esta cadena anunciado para los Estados Unidos, lo cual puede verse como una acción consistente con la estrategia de mejora de cadenas. Esta acción debería ser parte de una agenda más amplia que contemple a la industria química como un todo y permita un abordaje sistémico de la situación de la cadena en el país.

3. Las CGV de los químicos y de semiconductores: una conexión estratégica

3.1. Introducción

Estamos en la era de los semiconductores. Se vuelve difícil concebir nuestras propias rutinas diarias sin ellos: los semiconductores están presentes en nuestros *smartphones*, en nuestras *laptops*, en nuestras lavadoras, en nuestros *smartwatches*, en nuestros automóviles. No es difícil extrapolar esto al plano productivo, donde la automatización de procesos, la robotización y el internet de las cosas (IoT) son prácticas cada vez más habituales en la manufactura de bienes y la prestación de servicios, cada vez menos como un diferencial y cada vez más como un requisito para competir en el mundo. Teniendo en cuenta esto, no es exagerado decir que el mundo moderno descansa sobre estos diminutos chips.

A partir de las grandes disrupciones en las CGV producto de la pandemia por el Covid-19, los semiconductores pasaron a estar en el centro de las preocupaciones de todo el mundo. El teletrabajo y el *shock* de digitalización que impulsó el contexto de las cuarentenas disparó la demanda por dispositivos electrónicos, como nuevos ordenadores, *smartphones* y tabletas; todos productos que contienen grandes cantidades y variedades de semiconductores.

El problema fue que la oferta de semiconductores no pudo crecer al ritmo de la demanda, y entonces hubo escasez y largas colas de espera para acceder a dotaciones de chips que, además, pasaron a ser más caros. Como resultado de esto, asistimos a eventos impensados, como *Sony* interrumpiendo la producción de su *PlayStation5* a pocos meses de su lanzamiento mundial, o la parálisis en la producción de automóviles a lo largo del mundo, problema que pareció resolverse recién a fines de 2022, mucho tiempo después de superada la pandemia²⁷.

Las dificultades que enfrentaron los fabricantes de semiconductores para hacer frente a la demanda disparada por sus productos tienen que ver con la característica de que éstos son extremadamente complejos. Su tecnología se mide en nodos, de acuerdo al tamaño en nanómetros (nm) de la longitud de la puerta del transistor del proceso; mientras más pequeña esta longitud, mayor cantidad de transistores por milímetro cuadrado y, por tanto, mayor rendimiento del circuito. Actualmente, la frontera de la industria se encuentra en 3 nm (el famoso chip A14 del nuevo *iPhone 15*, que fue diseñado por *Apple* pero manufacturado por la taiwanesa *TSMC*). Estos chips son utilizados para optimizar el rendimiento de los *smartphones* y otros productos asociados a tecnología de punta, y servir a funciones específicas, como por ejemplo la inteligencia artificial (IA). Semiconductores de “nodos más grandes” son utilizados por una gama más amplia de sectores; por ejemplo, la industria automotriz es una gran demandante de chips de 180 nm.

Producir a escala nanoscópica requiere de muchos cuidados. Para empezar, se necesitan salas limpias (“*cleanrooms*”). Una estimación usual en la industria señala que las salas donde se lleva a cabo el proceso de producción de un semiconductor deben ser 10.000 veces más limpias que un quirófano estándar. Para lograr esto, el aire se filtra constantemente y se permite la entrada de muy pocas personas a las salas. En productos donde puede haber conexiones con apenas un átomo de diámetro, una mota de polvo, o incluso una partícula de coronavirus infiltrada, pueden causar pérdidas millonarias.

²⁷ Los detalles sobre la crisis de abastecimiento de la cadena de semiconductores pueden revisarse en nuestro informe previo (Filippo *et al.*, 2022a).

Este requerimiento de pureza que se le impone al aire, también se les exige a los insumos utilizados para la producción. El proceso insume numerosos químicos principalmente en estado líquido y gaseoso, y en menor medida sólidos²⁸. El denominador común en todos ellos es que deben poseer un altísimo grado de pureza. En la industria, ese estándar de “pureza electrónica” suele ser referido como “cinco nueves”; es decir, con una pureza del 99,999%. No obstante, los semiconductores más avanzados pueden demandar niveles aún superiores.

Estos estrictos procedimientos de producción determinan que las empresas de semiconductores tiendan a trabar relaciones de largo plazo con sus proveedores. De esta manera, establecen un vínculo relacional en el que se construye confianza y se desarrollan procedimientos que permiten minimizar estos costosos errores. Debido a esto, dentro de la industria química, son pocas las empresas que se constituyen como proveedoras de la industria de semiconductores a nivel global.

A pesar de lo anterior, la resolución de la crisis de abastecimiento de semiconductores tiene a la industria en un escenario de reconfiguración, donde países como los Estados Unidos están implementando programas de fomento sin precedentes para lograr relocalizar las actividades de producción en sus territorios. Estas nuevas tendencias pueden activar oportunidades para países como México que, si bien no cuentan con una presencia fuerte en la cadena, tienen una posición geográfica y comercial estratégica para aprovechar.

En lo que sigue intentaremos indagar sobre las posibilidades que tiene México de aprovechar este nuevo panorama global para la producción de semiconductores. Para ello, introduciremos brevemente a la CGV de semiconductores en la Sección 3.2. En la Sección 3.3 se proporcionará detalle sobre las sustancias químicas que son demandadas por la industria de semiconductores, y su tamaño de mercado, así como los estándares, regulaciones e inversiones asociados para cumplimentar estas relaciones de proveeduría. Finalmente, la Sección 3.4 procura detectar las oportunidades de México para desarrollar su rol de proveedor en el nuevo contexto.

3.2. La CGV de los semiconductores²⁹

El mercado de semiconductores tiene un valor de US\$ 584 mil millones (año 2022)³⁰. El 70% de las ventas se corresponde a lo que se conoce como circuitos digitales que son, precisamente, los que habilitan nuestra vida en el mundo digital. El 30% restante se corresponde con los dispositivos “DAO” (discretos, analógicos y otros), que tienen la particularidad de permitir la interacción con el mundo físico. Tradicionalmente los DAO han sido relevantes en el mundo de la telefonía y radiofonía, y hoy juegan un rol crucial en lo que denominamos IoT (internet de las cosas).

Si bien los semiconductores son productos extremadamente complejos, al igual que en el caso de los químicos, la cadena de valor puede resumirse a unos pocos eslabones que permiten entender muy bien su estructura y modelos de negocio asociados.

²⁸ En un estudio de caso en dos plantas de semiconductores en Corea del Sur, Kim *et al.* (2018) muestran que demandan 428 y 432 productos químicos, respectivamente, entre 52 y 65% de ellos en estado líquido, entre 33 y 43% en estado gaseoso, y entre 3 y 6% en estado sólido.

²⁹ Esta sección se basa en nuestro estudio previo, Filippo *et al.* (2022a), en donde pueden encontrarse mayores detalles sobre esta cadena de valor.

³⁰ WSTS (2023).

Figura 3.1. Cadena de valor de los semiconductores



Fuente: Elaboración propia con base en Varas et al. (2021).

En la Figura 3.1 podemos apreciar que la cadena de valor de los semiconductores se constituye esencialmente de tres eslabones centrales, además del de **consumo**, que es representado por las distintas cadenas que utilizan semiconductores en sus productos (electrónicos, automóviles, etc.):

- **Diseño.** Este primer eslabón se caracteriza por ser intensivo en I+D. Este eslabón suele ser abastecido por las actividades conexas de **Software en módulos de propiedad intelectual (IP)**, que facilitan los procesos y acorta los tiempos de diseño (lo cual es especialmente relevante para los circuitos más complejos, en la frontera del conocimiento).
- **Fabricación (Frontend).** En este eslabón el diseño pasa al plano físico. Para ello, además se necesitan **obleas o wafers crudos** de material semiconductor (en general, silicio), **equipamientos especiales** para mantener las salas de producción limpias y ejecutar el proceso de grabado de los circuitos, y **productos químicos** de altísima pureza que hacen que ese proceso sea posible. El proceso finaliza semanas luego³¹, con los mismos *wafers* de material semiconductor, pero con numerosos circuitos impresos en él. El detalle de los pasos y químicos necesarios para producir un semiconductor estándar se presenta en el Anexo 1 de este documento. Este eslabón es intensivo en capital, debido a las erogaciones requeridas para satisfacer los estándares de producción³².
- **Ensamblaje y testeo (Backend).** Los discos con los circuitos impresos son cortados en “dados” (los chips en sí) que luego son testeados masivamente y, finalmente, ensamblados en este último eslabón. En general, esta etapa es la más trabajo-intensiva de la CGV.

En cuanto a los modelos de negocio de la cadena (ver Box 3.1), una empresa puede realizar las actividades correspondientes a los tres eslabones (modelo integrado), o especializarse en alguno en particular.

³¹ Dependiendo del tipo específico de semiconductor y su tecnología, el proceso de fabricación de una oblea de semiconductores puede insumir en total entre 400 y 1.400 pasos que demoran entre 3 y 5 meses de ejecución (Varas, et al., 2021).

³² Una fábrica estándar con una tecnología avanzada puede costar entre US\$ 5 mil millones (circuitos analógicos) y US\$ 20 mil millones (circuitos digitales de memoria), incluyendo el valor de la tierra, el edificio y el equipamiento (Varas et al., 2021).

BOX 3.1. LOS MODELOS DE NEGOCIO EN LA CADENA DE SEMICONDUCTORES

Hacia los años sesenta, la mayoría de las grandes empresas productoras de semiconductores tenían una estrategia de producción integrada (**IDM, Integrated Device Manufacturers**); esto es, abarcaban los tres eslabones centrales presentados en la Figura 3.1. El crecimiento de la complejidad tecnológica del proceso hizo que la cadena avance a un modelo de especialización. Ante esto, las firmas integradas pasaron a adoptar un modelo híbrido por el cual delegan parte de su proceso productivo a empresas especializadas.

Dependiendo de en qué eslabón se especialicen las empresas, se define su modelo de negocio:

- **Fabless.** Son empresas especializadas en el eslabón de diseño, que delegan la producción física a las *Foundries*. Se trata de un modelo conocimiento-intensivo, con alta inversión en I+D.
- **Foundry.** Son empresas especializadas en la etapa de fabricación (*Frontend*). Es, por tanto, un modelo caracterizado por los altos niveles de inversiones en capital físico y equipamiento (capital-intensivo).
- **OSAT (*outsourced semiconductor assembly and test*).** Son empresas especializadas en la etapa de ensamblaje y testeado (*Backend*). Por ser trabajo-intensivas, requieren de un nivel de inversión significativamente menor que en el modelo *Foundry*, pero en tiempos recientes ha aumentado la participación de los costos de capital en ventas.

Finalmente, toda la cadena es complementada por los resultados que emergen de la **investigación precompetitiva**. Se trata de una investigación de largo plazo (en horizontes mayores al ciclo de vida de los productos) que se realiza típicamente fuera de las empresas; en general en universidades, centros de investigación o proyectos conjuntos.

Cada uno de estos eslabones y actividades de soporte se fueron distribuyendo a lo largo del mundo de acuerdo con las ventajas comparativas que cada geografía podía ofrecer. En la Figura 3.2 se muestra la especialización geográfica en cada caso, teniendo en cuenta la distribución del valor agregado en 2019. Allí es fácil ver que, si bien se trata de una cadena altamente globalizada, son en realidad unos pocos países los que dominan las actividades de la misma. Así, vemos que Estados Unidos es particularmente fuerte en el eslabón de Diseño y sus proveedores, *Software* + IP. También es el principal productor de equipamiento para la producción, lo cual es decisivo para la ejecución de los diseños de los circuitos más avanzados.

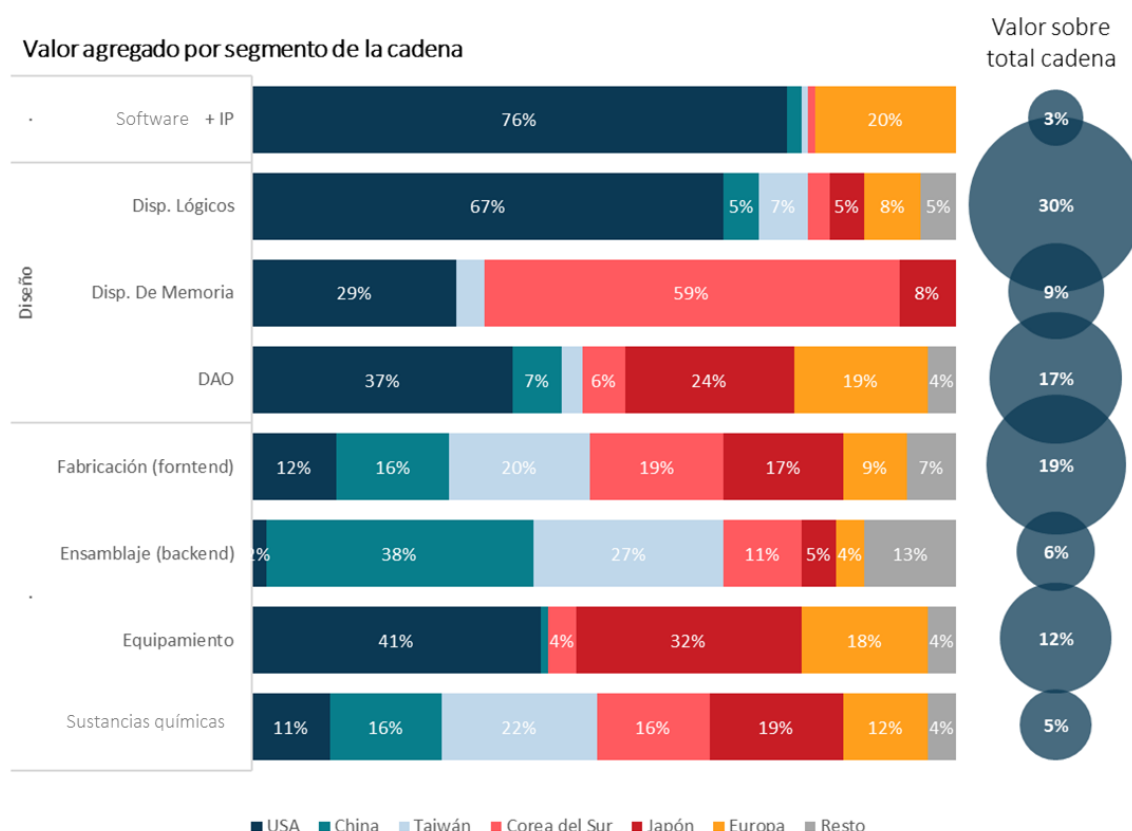
El eslabón de *Frontend* es el actual campo de disputa en el anuncio de inversiones para la próxima década³³. Este eslabón, que en los noventa fue dominado por los Estados Unidos y Europa, hoy se encuentra bastante más distribuido, pero focalizado principalmente en países asiáticos. Los países occidentales tienen participaciones en torno al 10%, mientras que Taiwán, Corea del Sur, Japón y China producen más de las dos terceras parte del valor

³³ Esto ha motivado el lanzamiento de numerosos programas de incentivo por parte de diversos gobiernos. En Estados Unidos, la *CHIPS and Science Act* destina más de US\$50 mil millones a incentivar la localización de facilidades de producción y proyectos de I+D. Por su parte, China, Japón, Taiwán, Singapur, Corea y la Unión Europea tienen sus propios programas destinados a determinar una estrategia de fortalecimiento de la cadena.

agregado global de *Frontend*. El eslabón de *Backend*, por su parte, se encuentra también focalizado en Asia, pero sobre todo en China y Taiwán.

En cuanto a las sustancias químicas, podemos apreciar también una fuerte dominancia de Asia, sobre todo de Taiwán y Japón. Estados Unidos produce solo el 11% del valor agregado de este segmento. A su vez, este segmento genera el 5% del valor agregado total de la CGV.

Figura 3.2. Especialización geográfica de la cadena, según valor agregado (2019)



Fuente: Elaboración propia en base a Varas et al. (2021).

3.3. Sustancias químicas para producir semiconductores

Los materiales y sustancias químicas para semiconductores representan el 5% del valor agregado total generado por el total de la CGV (Figura 3.2), con un valor de mercado estimado en US\$ 43 mil millones para el año 2019³⁴, y para el cual se espera un crecimiento anual promedio del 6% entre 2021 y 2028 (Fortune Business Insights, 2022). Para las sustancias químicas utilizadas en el eslabón de *Frontend* el mercado estaría en el orden de los US\$ 30 mil millones anuales, y para el eslabón de *Backend* en unos US\$ 13 mil millones (Varas et al., 2021; Khan et al., 2021). Esto es, se trata de un nicho de mercado relativamente pequeño, donde sus empresas abastecen no solo a la cadena de semiconductores, sino también a otros consumidores de químicos de alta pureza.

³⁴ Se excluyen del cómputo a otros materiales no químicos utilizados en el eslabón de *Backend*, como los bastidores y alambres, que significan en 2019 unos US\$ 6 mil millones.

Químicos para Frontend

El eslabón de *Frontend* es el que más productos químicos demanda, así como también el de mayores exigencias respecto de la calidad de los mismos. Este eslabón consume tanto sustancias básicas como de especialidad, donde las características de pureza son determinantes; es por esto que las empresas fabricantes tienden a concentrarse en pocos proveedores especializados con los que pueden establecer relaciones de largo plazo.

El insumo fundamental de este eslabón son los *wafers* u obleas de material semiconductor, sobre las cuales se imprimen los diseños de los chips. Este proceso de impresión puede clasificarse en las etapas que se presentan en la Tabla 3.1, que a su vez son descritas con mayor detalle en el Apéndice 2 de este documento. En dicha tabla se presentan algunos ejemplos de los materiales de la industria química que son demandados para llevar a cabo cada una de estas etapas.

Tabla 3.1. Productos químicos insumidos en las distintas etapas de *Frontend*

Etapas Frontend	Productos Químicos	Ejemplos
Materia prima	<i>Wafers</i> de semimetal	El más utilizado es el Silicio (Si). Para fines específicos, se pueden utilizar otras sustancias como Arseniuro de Galio (GaAs), Nitruro de Galio (GaN), Carburo de Silicio (SiC), etc.
Oxidación y recubrimiento	Aislantes	Dióxido de silicio (SiO ₂), Nitruro de Silicio (Si ₃ N ₄).
	<i>Photoresists</i> (polímeros fotosensibles)	Polímero de Novolac, Polimetilmetacrilato (PMMA), Copolímero de Estireno y Ácido Maleico, Polímero de Polimetacrilato de Metilo (MMA/PMMA), Polímero de Metacrilato de Metilo y Ácido Metacrílico (MMA/MAA)
Litografía	Fotomáscaras	Suelen ser de Cuarzo (compuesto principalmente de Óxido de Silicio, SiO ₂), con recubrimientos de Cromo (Cr), Nitruro de Silicio (Si ₃ N ₄) u Óxido de Silicio (SiO ₂).
Desarrollo	Líquidos (reveladores)	Se utilizan soluciones líquidas alcalinas (Hidróxido de Sodio, Hidróxido de Potasio) o ácidas (Ácido Acético, Ácido Fosfórico).
Grabado	Líquidos (grabado húmedo)	Ácido Fluorhídrico (HF), Peróxido de Hidrógeno (H ₂ O ₂), Ácido Fosfórico (H ₃ PO ₄), Hidróxido de Potasio (KOH), Ácido Nítrico (HNO ₃), Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄).
	Gases (grabado en seco)	Cloro (Cl ₂), Fluoro (ClF ₃), Tetrafluoruro de Carbono (CF ₄), Hexafluoruro de Azufre (SF ₆), Nitrógeno (N ₂) y Argón (Ar).
Dopaje	Gases	Boron Trifluoride (BF ₃), Fosfina (PH ₃), Arsina (AsH ₃), Boro (B), Galio (G).
Depósito y grabado de metales	Metales gaseosos	Aluminio (Al), Cobre (Cu), Tungsteno (W), Silano (SiH ₄), Disilano (Si ₂ H ₆), Tetraetilsilano (TES), Cloruro de Tricloroetileno (TCE).
Pulido químico-metálico (CMP)	<i>Slurry</i> para CMP	Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃), Ácido Fosfórico (H ₃ PO ₄), Dióxido de Cerio (CeO ₂), Carburo de Silicio (SiC) o diamante.

Fuente: Elaboración propia con base en Khan et al. (2021), Varas et al. (2021) y entrevistas realizadas.

En la Tabla 3.2 se muestra el tamaño de mercado estimado para cada una de las categorías de producto que se desprenden de la Tabla 3.1, en conjunto con una lista de las principales empresas para cada caso.

Tabla 3.2. Mercado de materiales y sustancias químicas para el eslabón de *Frontend* (2019)

Productos	Mercado (US\$ miles de millones)	Empresas líderes
Wafers	10,9	Shin-Etsu (Japón), SUMCO (Japón), GlobalWafers (Taiwán), Siltronic (Alemania), SK Siltron (Corea del Sur)
Photoresists	3,3	JSR (Japón), Tokyo Ohka Kogyo (Japón), Shin-Etsu Chemical (Japón), Fujifilm Electronic Materials (Japón), Sumitomo Chemical (Japón), Dongjin (Corea del Sur), DuPont Electronic Solutions (Estados Unidos), EMD Performance Materials (Estados Unidos), Inpria (Estados Unidos), Ruihong (China), Kempur (China), Nata Opto-electronic Material (China), JHM (China)
Fotomáscaras	4,0	Dai Nippon (Japón), Photronics (Estados Unidos), Toppan Photomasks (Japón), Hoya Corporation (Japón), Taiwán Mask Corporation (Taiwán), Intel (Estados Unidos), Samsung (Corea del Sur), TSMC (Taiwán), GlobalFoundries (Estados Unidos), SMIC (China), Shenzhen Newway (China)
Líquidos (<i>wet chemicals</i>)	2,3	KMG Chemicals (Estados Unidos), BASF (Alemania), Avantor (ESTADOS UNIDOS), Honeywell (Estados Unidos), Kanto Chemical (Japón), Runma (China), JHM (China), Jiangyin Chemical Reagents (China), Sinophorus (China), Sinyang (China), Etching Liquid (China)
Gases	6,0	Merck (Alemania), Entegris (Estados Unidos), Air Products (Estados Unidos), Air Liquide (Francia), Praxair (Estados Unidos), Linde (Alemania), BASF (Alemania), TNSC (Japón), Showa Denka (Japón), Wonik (Corea del Sur), SK Materials (Corea del Sur), Nata Opto-electronic Material (China), Haute Gas (China), Jinhong Gas (China), PERIC (China)
Metales gaseosos	1,0	JX Nippon (Japón), Honeywell (ESTADOS UNIDOS), Tosoh SMD (Japón), Linde (Alemania), Praxair (Estados Unidos), KFMI (China), Grikin (China)
Slurry para CMP	0,8	DuPont (ESTADOS UNIDOS), Cabot Microelectronics (Estados Unidos), FujiFilm (Japón), Fujimi (Japón), Hitachi Chemical (Japón), Eminess Saint-Gobain (Francia), Versum Materials (Estados Unidos), Thomas West (Estados Unidos), JSR (Japón), Merck (Alemania), CMC (Estados Unidos), Anji (China), Hubei Dinglong (China)

Fuente: Elaboración propia con base en Khan et al. (2021) y Varas et al. (2021).

A continuación, se presenta un detalle de las categorías³⁵.

- **Wafers.** Se componen de material semiconductor de alta pureza; el más difundido suele ser el silicio, pero pueden utilizarse otros como el arseniuro de galio, el nitrato de galio y el carburo de silicio, utilizados para aplicaciones específicas. Se comercializan en “lingotes” de alta pureza que luego son cortados, pulidos y oxidados para obtener su forma de plato o disco donde serán impresos los circuitos. Estos lingotes se producen en tamaños estándar: 100, 150, 200 y 300 milímetros de diámetro³⁶. Hoy en día, el estándar de la industria es el de 300 mm, lo cual significa que la mayoría de las inversiones y procesos están optimizadas para trabajar con el

³⁵ Salvo que se indique lo contrario, los datos de mercado de lo que sigue proviene de Khan et al. (2021).

³⁶ A medida que el tamaño aumenta, se pueden obtener más chips de un solo *wafer*.

mayor diámetro posible³⁷.

Se estima un mercado de aproximadamente US\$ 10,9 mil millones (año 2019). Si bien existen varias empresas en el mundo que producen *wafers* de material semiconductor, el mercado ha tendido a la concentración, siendo liderado hoy por cinco empresas, las dos principales de Japón (*Shin-Etsu* y *SUMCO*). Estados Unidos no tiene empresas en este segmento, sí hay firmas de otras banderas que tienen operaciones de producción en este país. China cuenta con varias compañías, pero de escala pequeña, y pocas produciendo actualmente en el estándar de 300 mm.

- **Photoresists.** Los *photoresists* son polímeros fotosensibles con los que se cubren las obleas crudas de silicio antes de iniciar el proceso de litografía. El tamaño de mercado se estima en el orden de los US\$ 3,3 mil millones (año 2019). Las empresas japonesas (*JSR*, *Tokyo Ohka Kogyo*, *Shin Etsu*, *Fujifilm*, *Sumitomo*) en este segmento ocupan un 90% del mercado, repartiéndose el resto entre empresas estadounidenses y surcoreanas. Si bien China tiene empresas en el segmento, no tienen la capacidad (en cuanto a materias primas y conocimientos tácitos)³⁸ de producir el tipo de polímeros utilizados para los chips más complejos, por lo que es un importador neto de estos productos.
- **Fotomáscaras.** La fotomáscara es una plantilla con forma de disco, normalmente de vidrio o cuarzo, cubierta con una delgada capa de cromo con los patrones que se quieren transferir al *wafer*. Esto es, para cada diseño de chip, existe una fotomáscara específica. Por lo tanto, las fotomáscaras son producidas a demanda. Si bien pueden ser encargadas a los *mask shops* mencionados en la Tabla 3.2 (Japón y Estados Unidos son los principales jugadores en este negocio), una práctica usual (sobre todo cuando la confidencialidad de los diseños es relevante) es que las fabricantes de semiconductores produzcan estas máscaras en sus propios *captive mask shops*³⁹. El tamaño de mercado se estima en unos US\$ 4 mil millones (año 2019).
- **Líquidos (*wet chemicals*).** Estos productos se utilizan en las etapas de desarrollo y grabado del proceso de fabricación de semiconductores e incluyen disolventes, ácidos, grabadores (*etchants*), entre otros. El tamaño de mercado se estima en US\$ 2,3 mil millones (año 2019). Las empresas estadounidenses (*KMG Chemicals*, *Avantor*, *Honeywell*), alemanas (*BASF*) y japonesas (*Kanto*) son los principales jugadores del segmento⁴⁰.
- **Gases.** Los gases son utilizados en las etapas de grabado, dopaje y depositado. En su conjunto, suman una porción importante del mercado de químicos para semiconductores, con un estimado de US\$ 6 mil millones para el año 2019. Debido a la amplitud del segmento, hay jugadores importantes en varios países, como Estados Unidos, Francia, Japón, Alemania y China. No obstante, las líderes son *Merck* (Alemania), *Air Products* (Estados Unidos) y *Air Liquide* (Francia).
- **Metales gaseosos.** Los metales de depositado son utilizados para crear las conexiones entre los transistores y componentes resultantes de la etapa de grabado.

³⁷ Este tamaño es utilizado en el 99,7% de la capacidad productiva mundial para chips de 45 nm o menos (Khan *et al.*, 2021).

³⁸ Los *photoresists* tienen características específicas dependiendo del tipo de litografía que se utilice. El más común es el que utiliza luz ultravioleta (litografía óptica), pero existen otros como el de rayos X o por inmersión.

³⁹ El término "*captive*" se utiliza para denotar que la empresa tiene el control completo y directo de este proceso en lugar de depender de terceros para proporcionar las fotomáscaras. Esto puede ofrecer ventajas estratégicas, como un mayor control sobre la calidad, la confidencialidad de los diseños y los plazos de entrega. Esta forma de producir también resulta útil para facilitar la producción entre los equipos de Diseño y Producción, que muchas veces pueden ser de distintas empresas (una *fabless* contratando la producción a una *foundry*; ver Box 3.1 para más detalle sobre los modelos de negocio de la cadena).

⁴⁰ La colaboración estratégica entre empresas está ganando popularidad en este segmento (que no solo abastece a los fabricantes de semiconductores, sino a otros productores de electrónicos y similares). Por ejemplo, en enero de 2020, *Solvay*, una empresa que opera en *wet chemicals* con sede en Bélgica, y *SGL Carbon*, una empresa especializada en la fabricación de fibra de carbono con sede en Alemania, se asociaron para crear nuevos compuestos para el sector aeroespacial (GlobalNewswire, 2022).

Son introducidos al proceso en forma gaseosa, y luego solidificados mediante dos técnicas distintas (el depositado físico de vapor, PVD; o el depositado químico de vapor, CVD). El tamaño de mercado se estima en el orden de los mil millones de dólares para 2019. El segmento es liderado por empresas estadounidenses (*Honeywell*, *Praxair*) y japonesas (*JX Nippon*, *Tosoh SMD*). No obstante, empresas chinas como *KFMI* y *Grikin* han estado ganando mercado sistemáticamente durante los últimos años.

- **Slurry para CMP.** En la etapa de pulido químico-mecánico donde, precisamente, se pule el *wafer* impreso para eliminar imperfecciones. En este proceso, se aplica una mezcla de químicos (*slurry*)⁴¹ que contiene partículas abrasivas a la superficie del *wafer*. El tamaño de mercado de este segmento está en el orden de los US\$ 790 millones (año 2019). Las estadounidenses *Dupont* y *Cabot Microelectronics* dominan el mercado, con una cuota conjunta superior al 50%.

Químicos para Backend

El eslabón de *Backend* se caracteriza por tres etapas centrales que demandan distintas sustancias químicas: encapsulado (*packaging*), Testeo y Montaje⁴² (Tabla 3.3). Este eslabón tiene una mayor dependencia de químicos de especialidad o formulados (como las resinas epoxi, los flujos y pastas de soldadura, entre otros), pero se mantiene el mismo requerimiento de pureza de grado electrónico que está omnipresente durante las fases de *Frontend*.

Tabla 3.3. Productos químicos insumidos en las distintas etapas de Backend

Etapa Backend	Productos
Encapsulado (<i>packaging</i>)	Pegamentos
	Resinas
	Plásticos
	Cerámica
Testeo	Disolventes (isopropilalcohol, acetona, tricloroetileno)
	Gases (nitrógeno, helio) y líquidos (glicol de etileno, glicol de propileno, fluorinerts) de enfriamiento
Montaje	Sustratos para PCB (fibra de vidrio, resina epoxi, cerámica, vidrio)
	Flujos y pastas de soldadura
	Disolventes (isopropilalcohol, acetona, tricloroetileno)

Fuente: Elaboración propia con base en Khan et al. (2021), Varas et al. (2021) y entrevistas realizadas.

El tamaño de mercado (Tabla 3.4) es menor que el de insumos para *Frontend*, sobre todo porque se trata de un proceso sustancialmente más corto, con demandas específicas. Aproximadamente el 70% de las ventas de la industria a este eslabón tienen que ver con los sustratos para las placas de circuito impreso (PCB), que son los que proporcionan la estructura física y las conexiones eléctricas para los chips y otros componentes, de manera tal que puedan ser directamente incorporados en su uso final en productos electrónicos

⁴¹ El *slurry* es una combinación de líquidos, generalmente agua o algún solvente, y partículas sólidas abrasivas suspendidas en él. Las partículas abrasivas pueden estar compuestas de diferentes materiales, como óxido de silicio (SiO₂), óxido de aluminio (Al₂O₃), dióxido de cerio (CeO₂), carburo de silicio (SiC) o diamante, dependiendo del material que se esté eliminando y las características específicas del proceso de CMP.

⁴² Para más detalles sobre las etapas de *Backend*, consultar el Apéndice 2 de este documento.

diversos. En este segmento lideran firmas japonesas (*Ibiden*, *Shinko*) y la taiwanesa *NanYa*. Muchas de las empresas que producen estos sustratos también son productoras de otros productos como resinas y cerámicas para encapsulado, o productos de soldadura.

Tabla 3.4. Mercado de materiales y sustancias químicas para el eslabón de Backend (2019)

Productos	Mercado (US\$ miles de millones)	Empresas líderes
Resinas	1,9	Sumitomo (Japón), Henkel (Alemania), Hitachi (Japón), Sinopaco (China), HHCK (China)
Cerámica	1,1	Amkor (Estados Unidos), Quik-Pak (Estados Unidos.), NGK (Japón), Alent (Reino Unido), Hitachi (Japón), Kyocera (Japón), LG (Corea del Sur), Sumitomo (Japón), BASF (Alemania), Mitsui High-Tec (Japón), Henkel (Alemania), Toray (Japón), Tanaka (Japón), Zhongwei (China), Yixing (China)
Productos para soldadura	1,1	Ibiden (Japón), NanYa (Taiwan), Shinko (Japón), Samsung (Corea del Sur), Shennan Circuits (China), Zhu Hai Yueya (China), AKM (China)
Sustratos para PCB	9,1	Ibiden (Japón), NanYa (Taiwan), Shinko (Japón), Samsung (Corea del Sur), Shennan Circuits (China), Zhu Hai Yueya (China), AKM (China)

Nota: Los disolventes, y líquidos y gases de enfriamientos se incluyen dentro de las categorías de la Tabla 3.2.
Fuente: Elaboración propia con base en Khan et al. (2021) y Varas et al. (2021).

Materias primas

En la Figura 3.3 se muestra una lista (que no es exhaustiva) de las principales materias primas no gaseosas que utilizan los químicos demandados por la industria de los semiconductores. De allí sobresale la gran importancia de China como proveedora de estas materias primas. No obstante, la mayoría de estos materiales se estiman en gran abundancia respecto de su demanda.

En este sentido, recientemente China empezó a implementar restricciones a sus exportaciones de galio y germanio, elementos de los cuales posee el 80% y 60% de la producción mundial, respectivamente (Figura 3.3). No obstante, según las consultas a fuentes calificadas, esta medida no traería grandes efectos de largo plazo sobre la industria de los semiconductores, debido a que se trata de elementos que tienen sustitutos en los procesos para los cuales son utilizados. De hecho, no es la primera vez que China intenta algo similar: hace algo más de una década, el país decidió restringir sus exportaciones de minerales raros (*rare earth minerals*), donde el país ostentaba un 98% de la producción global. Esto motivó la aparición de nuevos actores, y hoy la posición de China cayó al 63%. A pesar de estos antecedentes, ciertos analistas advierten que esta medida puede ser un “adelanto” de otras acciones potencialmente más problemáticas en el futuro que comprometen los fundamentos de la cadena global de valor⁴³.

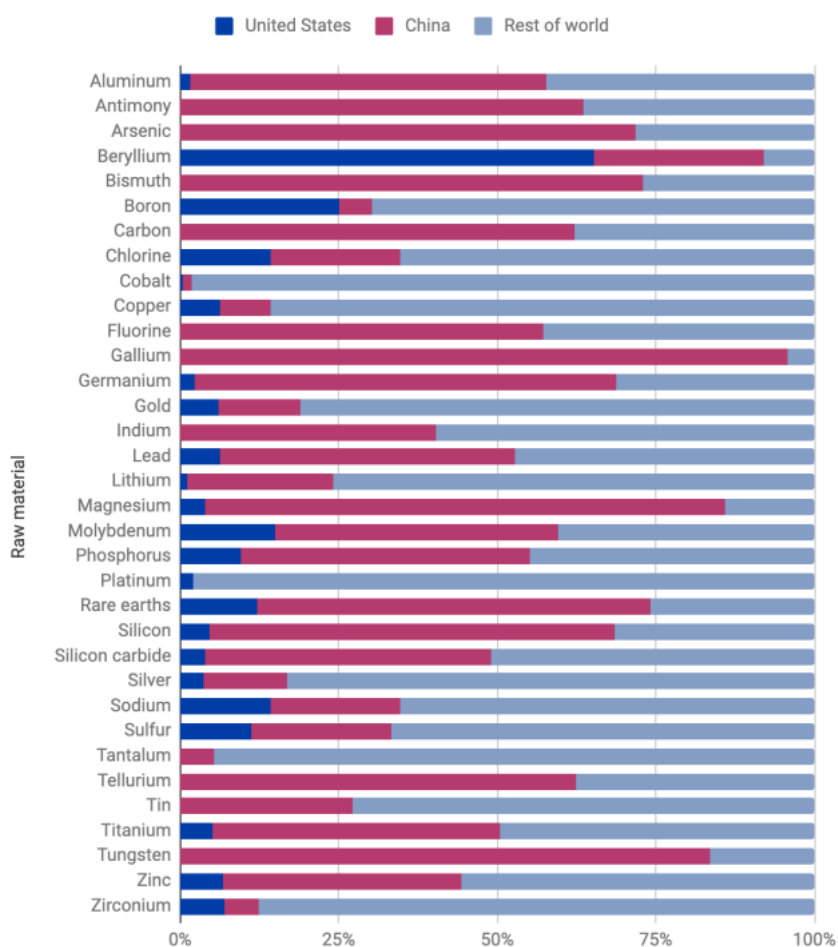
Por todo esto, la dotación de las materias primas no suele ser la variable fundamental en el análisis. Por ejemplo, el silicio es el material más utilizado para producir las obleas crudas donde luego se imprimen los chips. Esto responde a ciertas características intrínsecas del material, pero también a su gran abundancia: luego del oxígeno, es el material más abundante

⁴³ <https://www.bbc.com/news/business-66118831>.

en la corteza terrestre. De esta manera, la cadena reduce vulnerabilidades frente a uno de sus principales insumos.

Lo importante, entonces, no es tanto contar con los recursos, sino contar con la capacidad de procesarlos en los altos grados de pureza requeridos por la industria. Retomando el caso del silicio, China cuenta hoy con casi el 70% de la producción mundial del semimetal; sin embargo, ninguna de las cinco empresas que concentran el mercado de obleas crudas es de origen chino⁴⁴.

Figura 3.3. Distribución de la producción primaria de materias primas de la industria química para semiconductores (2019)



Fuente: Extraído de Khan et al. (2021).

Estándares y regulaciones

Como cualquier otro producto químico, las sustancias utilizadas en la industria deben cumplir con las regulaciones y estándares que fueron detallados en la Parte 1 de este documento. No obstante, debido a los requerimientos de pureza, aparecen imposiciones adicionales, que en muchos casos pueden pactarse de manera privada entre las partes involucradas, pero que también han dado lugar a la aparición de estándares específicos. Estos estándares están destinados a proporcionar pautas y especificaciones que ayudan a asegurar la calidad y la

⁴⁴ Ver detalle más arriba, en Químicos para *Frontend*.

confiabilidad de los productos químicos utilizados en los procesos de fabricación de semiconductores.

El principal conjunto de estándares de la industria está coordinado por SEMI, una asociación internacional que agrupa a las empresas de semiconductores. Estos estándares corren para diversos insumos de la cadena, incluyendo a los químicos. Para este segmento en particular, SEMI tiene un comité específico conocido como el Comité de Tecnología de Materiales (*Materials Technology Committee*)⁴⁵. Los estándares desarrollados son numerosos, y abarcan temas como especificaciones de pureza, métodos de prueba, seguridad, compatibilidad con los equipamientos, reciclaje y eliminación, entre otros.

A su vez, el uso de ciertos químicos peligrosos ha llevado a que el sector enfrente regulaciones especiales. Por ejemplo, la exposición crónica a concentraciones de polvo proveniente del silicio (sílice cristalina) puede causar enfermedades pulmonares, como la silicosis, así como aumentar el riesgo de enfermedades respiratorias crónicas y cáncer de pulmón. Por ello, las agencias de salud y seguridad ocupacional de Estados Unidos (OSHA) y de la Unión Europea (EU-OSHA), amparados en pautas emitidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), han establecido nuevas regulaciones que limitan la exposición ocupacional a la sílice para proteger a los trabajadores (Carver, 2023).

Algo similar sucede con los denominados PFAS (per- y polifluoroalquilos) que no se degradan con facilidad (son sustancias persistentes) y además son bioacumulativas (persisten en los tejidos de los organismos vivos), razones por las cuales pueden estar presentes en el aire, el agua, el suelo, los animales, la vegetación e incluso la sangre de las personas. Se ha demostrado que la exposición a algunos PFAS puede estar relacionada con efectos nocivos para la salud humana y animal, como por ejemplo el aumento del colesterol, la alteración hormonal, el debilitamiento del sistema inmunológico, el cáncer y los problemas reproductivos y de desarrollo.⁴⁶ Por lo tanto, hay una creciente preocupación al respecto, motivando acciones para minimizar los usos no indispensables de PFAS, y reemplazarlas en los casos que sea posible. La industria de semiconductores no utiliza PFAS directamente, pero éstos pueden estar presentes en los productos químicos utilizados, como por ejemplo en líquidos fotorresistentes, gases para grabado, así como en los contenedores en los que estos productos se comercializan⁴⁷. En este contexto, la industria de semiconductores está trabajando en varios frentes para abordar el tema de los PFAS, entre los que se encuentran: un grupo de trabajo de SEMI, un consorcio de la Asociación de la Industria de Semiconductores (SIA), y el Consejo Mundial de Semiconductores (WSC). Estas entidades han publicado varios documentos informativos sobre los usos y los impactos de los PFAS en la industria.

Estos nuevos estándares y regulaciones tienen un impacto de corto plazo tanto sobre los costos de la cadena, como en la selección de proveedores.

Inversiones y costos

La cumplimentación de estas regulaciones y de los estándares de pureza implica que las plantas de producción de los químicos para semiconductores son más costosas de lo que podrían ser sus iguales para productos sin requerimientos de pureza. No obstante, esta producción se puede montar a la par de la producción convencional por inversiones que estarían en el orden de las decenas o centenas de millones de dólares.

⁴⁵ <https://store-us.semi.org/collections/standards/lang-english>

⁴⁶ <https://www.epa.gov/pfas/pfas-explained>

⁴⁷ https://www.semi.org/en/ehs/PFAS/PFAS_in_Semiconductor_Mfg

El gasto de capital anual de los principales proveedores mundiales de obleas de silicio, *photoresists* o gases electrónicos suele oscilar entre el 13 y el 20% de sus ingresos. En general, los proveedores de materiales contribuyeron con el 6% del gasto de capital total y representaron el 5% del valor agregado de la CGV de semiconductores en 2019 (Varas *et al.*, 2021).

A pesar de que las crecientes regulaciones previamente mencionadas han aumentado los costos de producción, la tendencia reciente ha sido a la baja debido a la creciente automatización de los procesos de producción⁴⁸.

3.4. Detección de oportunidades para México

Nuevas inversiones en Estados Unidos

Como hemos adelantado en la introducción, en 2020 la CGV de semiconductores entró en una crisis de abastecimiento. Esto respondió, por un lado, al gran aumento de la demanda de los productos electrónicos (*smartphones*, *tablets* y *laptops*, necesarias para facilitar el distanciamiento social y el teletrabajo y *e-learning*) y a los errores de pronóstico en demandantes habituales, como las automotrices⁴⁹. Por otro lado, hubo fricciones de oferta: construir nuevas plantas de semiconductores puede llevar años, además de inversiones en el orden de los miles de millones de dólares. De todas maneras, los fabricantes reaccionaron aumentando el uso de la capacidad instalada, pasando de valores en torno al 80% en 2019 a niveles de casi el 100% durante 2021, pero eso no alcanzó para hacer frente al *shock* de demanda.

Es aquí donde empezaron a aparecer problemas por el lado de los insumos de la cadena, que estuvieron también afectados por las restricciones de circulación por el Covid-19, y posteriormente por los efectos de la guerra entre Rusia y Ucrania. Por ejemplo, la industria enfrentó escasez de gas neón, que es esencial para los láseres que se usan para grabar patrones en las obleas de silicio y dar forma a los chips. Ucrania producía alrededor del 70% de las exportaciones mundiales de este gas, y el 90% del que se utiliza para los semiconductores estadounidenses⁵⁰. Si bien las reservas de las empresas fueron suficientes para que la situación fuera contenida, la afectación del recurso se vio como una alerta sobre la resiliencia de la cadena.

Esta situación se puede extrapolar al mediano plazo, cuando las inversiones anunciadas a nivel global para aumentar la capacidad de producción de semiconductores entren en operación. En Estados Unidos, se espera que la capacidad de producción se eleve en al menos un 45% dentro de los próximos cinco años (TEHCET, 2023). La pregunta lógica es cómo logrará el país cubrir su nueva demanda de insumos. Por ejemplo, el mismo estudio de TEHCET estima un aumento del 50% en la demanda de ácido sulfúrico, utilizado en la etapa de grabado (ver Sección 3.3).

En la Figura 3.4 se muestra un mapa con la localización de las fábricas de semiconductores en Estados Unidos, en conjunto con la de los proyectos anunciados (SIA, 2023). Estados Unidos tiene dos grandes polos de fabricación de chips; uno en el noreste y otro en el sureste.

⁴⁸ <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/electronic-chemicals-market/>

⁴⁹ Para un mayor detalle, ver Filippo *et al.* (2022a).

⁵⁰ https://as.com/diarioas/2022/03/06/actualidad/1646569656_210071.html#:~:text=Ucrania%20produce%20alrededor%20del%2070,utiliza%20para%20los%20semiconductores%20estadounidenses.&text=El%20ne%C3%B3n%20es%20miembro%20de,para%20la%20fabricaci%C3%B3n%20de%20microchips.

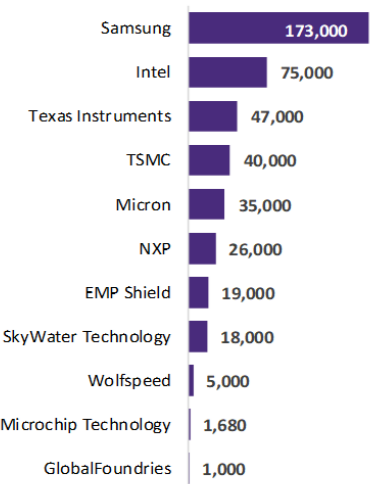
Apalancado en *Silicon Valley*, California es el Estado que a la fecha tiene mayor cantidad de plantas de producción (19 de las 78 existentes). Los anuncios de inversiones y expansiones en la capacidad de fabricación exceden los US\$ 440 mil millones (SIA, 2023). Estos proyectos se desparrraman a lo largo de todo el país, pero recaen fuertemente en el estado de Texas, con 3 proyectos de expansión y 2 de nuevas instalaciones que concentran más de la mitad de la inversión esperada (US\$ 235,2 mil millones) de la mano de Samsung (US\$ 173 mil millones), Texas Instruments (US\$ 36 mil millones), NXP (US\$ 26 mil millones) y X-FAB (US\$ 200 millones). Por su parte, Arizona iniciaría dos nuevos proyectos por parte de TSMC (US\$ 40 mil millones) e Intel (US\$ 20 mil millones), quien también tiene un proyecto de expansión de su planta en Nuevo México por US\$ 35 mil millones. De esta manera, estos tres Estados en el suroeste suman el 75% de la inversión anunciada en el país para capacidad productiva.

Figura 3.4. Ubicación de las fábricas de semiconductores en Estados Unidos



Estado*	Plantas existentes	Inversión anunciada (millones de US\$)	Expansiones	Nuevos Proyectos
Texas	9	235,200	3	2
Arizona	5	60,000	0	2
Nuevo México	0	35,000	1	0
Nueva York	5	21,050	1	2
Ohio	0	20,000	0	1
Kansas	0	19,004	1	1
Indiana	0	18,270	0	4
Idaho	2	15,000	0	1
Utah	0	11,000	0	1
Carolina del Norte	2	5,000	0	1
Oregon	5	1,844	2	1
Colorado	0	880	1	0
Carolina del Sur	0	443	0	1
Minnesota	2	420	1	0
California	19	412	2	1
Florida	3	25	1	1
Total	52	443,548	13	19

Top 10 empresas según inversión anunciada (millones de US\$)



Fuente: Elaboración propia con base en SIA (2023).

¿Cómo se acompaña lo anterior con inversión en materiales e insumos químicos? En la Figura 3.5 podemos apreciar que la gran parte de las instalaciones y nuevos proyectos en este segmento se ubican mayoritariamente en la región este de Estados Unidos.

El monto anunciado hasta el momento supera los US\$ 10 mil millones, pero la mitad corresponde a un único proyecto de *Global Wafers*, la taiwanesa líder en producción de obleas crudas de silicio, en el Estado de Texas. Los restantes proyectos, tanto en expansiones (12) como en nuevas operaciones (15) están casi todos en el orden de los cientos de millones de dólares. Arizona es el Estado que mayor cantidad de proyectos nuevos tiene anunciados (10), con una inversión total por US\$ 1,7 mil millones repartida entre 9 empresas; destacan *Linde* (US\$600 millones), *Chang Chun Group* (US\$400 millones), *Kanto/Chemtrade JV* (US\$250 millones), *Sunit Chemical* y *LCY Chemical* (cada una con US\$100 millones), y *Air Liquide* y *Solvay* (cada una con US\$60 millones).

Figura 3.5. Ubicación de las fábricas de materiales e insumos químicos para semiconductores en EE. UU.



● Existente ● Expansión ● Nueva

Estado*	Plantas existentes	Inversión anunciada (millones de US\$)	Expansiones	Nuevos Proyectos
Texas	3	5,000	0	1
Arizona	3	1,686	1	10
Michigan	2	755	4	0
Georgia	1	600	0	1
Colorado	0	600	0	1
Nueva York	2	458	1	1
Oregon	2	372	1	0
Misuri	0	300	2	0
Pensilvania	5	300	1	0
Ohio	2	70	2	0
Delaware	0	50	0	1
Total	20	10,191	12	15

Top 15 empresas según inversión anunciada (millones de US\$)



* Se incluyen solo los estados con inversiones anunciadas.
Fuente: Elaboración propia con base en SIA (2023).

Semiconductores en México⁵¹

De lo anterior se desprende que, si bien Estados Unidos ha encarado una estrategia de amplio alcance geográfico en la aplicación de su capacidad nacional para producir semiconductores, el centro gravitacional de estos esfuerzos son los Estados al suroeste del país. Esto es válido también para el segmento de proveeduría de materiales y sustancias químicas.

Este centro gravitacional ejerce su influencia también en México, que ha desarrollado en sus Estados fronterizos un ecosistema complementario al estadounidense en industrias intensivas en conocimiento. Dentro de este ecosistema, en el Estado de Baja California se

⁵¹ Para más detalle, ver Filippo *et al.* (2022b).

cuentan dos operaciones de *Backend* por parte de la europea *Infineon* (en Tijuana) y la estadounidense *Skyworks* (en Mexicali). De acuerdo con los registros de SIA (2023), a la fecha ninguna de estas dos empresas tiene anunciadas inversiones en Estados Unidos.

El ecosistema de semiconductores en México se completa con otra planta de *Backend* en Aguascalientes, perteneciente a *Texas Instruments*. A su vez, en el eslabón de Diseño, *Intel* tiene un centro de investigaciones con más de veinte años en Guadalajara donde se emplean a casi 2.000 personas. Pero también hay actividades en dos importantes centros públicos, como lo son el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en Puebla, y el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Finalmente, en lo que refiere al eslabón de producción (*Frontend*), México supo tener operaciones que fueron luego migradas a Asia⁵². No obstante, hoy en día vuelven a aparecer anuncios para la producción de semiconductores, en segmentos de baja complejidad. En 2022, *Vishay Intertechnology* (fabricante de componentes para la industria automotriz, aeronáutica y de comunicaciones) anunció una planta para producir chips para automóviles en Durango por un monto de US\$ 45 millones⁵³. Esta inversión se suma a otras tres (también dirigidas a la industria automotriz) anunciadas en Jalisco y Baja California⁵⁴. Adicionalmente, 2023, *Therm-X* anunció una planta en Tamaulipas que provee sistemas de gestión de temperatura para las fábricas de semiconductores, con miras a los nuevos desarrollos en Estados Unidos⁵⁵.

Sustancias químicas: las ventajas reveladas de México

En lo que refiere al segmento de químicos para semiconductores, los análisis de datos de comercio pueden resultar engañosos. Esto es porque, como se explica en Filippo *et al.* (2024), las posiciones arancelarias, así como cualquier otro clasificador de productos y actividades, no distinguen el grado de pureza involucrado en los productos. Esto es, en el sistema armonizado a seis dígitos (HS6) el ácido sulfúrico se identifica con el código 280700. Esta sustancia es utilizada por diversas verticales para una multiplicidad de fines: sirve de insumo para detergentes y colorantes, para el proceso de refinación del petróleo crudo, para el proceso de fabricación de papel, para la fabricación de baterías de plomo-ácido, y también para el grabado húmedo de chips, entre otros usos. Para cada caso, el grado de pureza requerido varía, siendo un estándar por encima de los cinco nueves para el caso del proceso de semiconductores. Como hemos visto, no todo el mundo puede producir en niveles de pureza de grado electrónico, pues requiere de inversiones específicas. Esta distinción de pureza no es observable en las estadísticas de comercio, por lo cual no puede inferirse a partir de ellas la capacidad efectiva de que un país produzca o consuma sustancias en alta pureza.

De todas maneras, y de acuerdo con el análisis de Filippo *et al.* (2024), durante el período 2011-2022 México aparece como exportador neto de solo 4 de las 38 posiciones a seis dígitos que potencialmente pueden vincularse a la cadena de semiconductores. Estas son el antes mencionado ácido sulfúrico (HS6 280700), el ácido fluorhídrico (281111), sales complejas de

⁵² Hace décadas se tuvo actividad en Guadalajara, de la mano de *Motorola (OnSemi)*. Esta fue una de las empresas que se radicó en México bajo el esquema de maquilas en la década del sesenta, y tenía en Guadalajara una división de producción de semiconductores de baja complejidad. Estas actividades fueron finalmente migradas a Asia (ver Filippo *et al.*, 2022b).

⁵³ <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Mexico-se-enfocara-en-5-de-6-etapas-de-produccion-de-semiconductores-20220420-0065.html>

⁵⁴ <https://www.forbes.com.mx/anuncian-instalacion-de-tres-fabricas-de-chips-para-autos-en-jalisco-y-baja-california/>

⁵⁵ *Ibidem*.

fluoruro (28690), y el cloro (280110). Todas ellas, además, se exportan con capacidades probadas (esto es, con RCA > 1). Nuevamente, y como en el ejemplo anterior, se trata de posiciones de amplio uso en otras industrias que no requieren grado electrónico.

De acuerdo con las entrevistas realizadas para este reporte, México no cuenta aún con las capacidades para producir productos de alta pureza. De hecho, en los ensayos de desarrollo que se realizan en el INAOE, la totalidad de las sustancias químicas utilizadas son importadas. Dada la crisis de abastecimiento, la importación de ciertas sustancias se vio comprometida en el último tiempo. Además, existen factores propios de México que dificultan el proceso de abastecimiento. Esto se debe a que los envases en los que se comercian los líquidos y gases de grado semiconductor pueden acabar contaminando al producto si éste permanece allí demasiado tiempo. Las trabas en la aduana nacional, y la potencial apertura de los contenedores podrían resultar en la pérdida completa de ciertos cargamentos.

A pesar de lo anterior, las buenas noticias son que las capacidades requeridas para la producción de alta pureza pueden ser construidas a partir de inversiones alcanzables, en el orden de los cientos (o incluso decenas) de millones de dólares. Para construir capacidades, México podría optar por una estrategia gradual, insertándose inicialmente un *tier* debajo en la cadena (Filippo *et al.*, 2024). Es decir, acumular capacidades y realizar las inversiones para producir químicos cuya calidad pueda eventualmente alcanzar el grado electrónico.

En caso de optar por esta inserción, sería deseable además apostar por aquellos productos que reporten un mayor índice estratégico. En la jerga de la complejidad económica, el valor estratégico de un producto o actividad se asocia con su capacidad para “abrir camino” hacia productos más complejos que permitan mejorar la competitividad de la economía; por su parte, la “complejidad” se asocia con su valor agregado, dificultad de producción (que concentra productores en países desarrollados) y mayores salarios (Hausmann e Hidalgo, 2009). En el estudio de Filippo *et al.* (2024) se sugiere que podría ser de interés para la política productiva el desarrollo de: Óxido Nitroso, Ácido Nítrico, Tungsteno y Óxido de Silicio.

De las 20 empresas que han anunciado expansiones o nuevos proyectos en Estados Unidos, 6 son multinacionales que cuentan con operaciones en México, con una distribución geográfica que es coincidente con la presentada en las Figuras 2.8 a 2.10. No obstante, dado que se trata mayormente de empresas con una gran base de productos, es difícil aseverar que produzcan en el país dentro de los segmentos requeridos para semiconductores.

- **Air Liquide**⁵⁶. Es una empresa francesa dedicada fundamentalmente a los gases industriales, que atiende a diversas industrias, desde la alimenticia hasta la de semiconductores. Tiene presencia en más de 70 países, incluido México (desde 2011). En Monterrey, el Grupo opera 4 ASU (unidades de separación de aire), 2 SMR (unidades de producción de hidrógeno), así como instalaciones de producción y envasado de acetileno. A su vez, a través de su filial *Airgas*, ofrecen también gases envasados o a granel, así como equipos y consumibles, especialmente para soldadura.⁵⁷
- **Solvay**⁵⁸. Es una empresa belga con una estructura integrada, de manera que su cartera cubre una gran gama de productos. Para la industria de semiconductores, provee químicos utilizados en prácticamente todas las etapas de *Frontend* y

⁵⁶ <https://www.airliquide.com/group/mexico>

⁵⁷ El Gobierno de México decidió la expropiación de una planta de hidrógeno de esta empresa, ubicada dentro de la refinería de Tula (perteneciente a Pemex). El hidrógeno es empleado en la refinación para reducir el contenido de azufre en los derivados de petróleo.

⁵⁸ <https://www.solvay.com/en/solvay-around-the-world/mexico>

*Backend*⁵⁹. En México, Solvay Flúor opera en Ciudad Juárez (Chihuahua), donde produce principalmente fluoruro de hidrógeno y bifluoruro de amonio, que pueden ser utilizados para la fabricación de semiconductores. Esta planta trabaja en conjunto con la planta de *Solvay Fluorides* en Illinois y la de *Solvay Specialty Polimers* en Nueva Jersey. A su vez, Solvay Flúor importa y distribuye una amplia gama de productos fluorados para el mercado mexicano.

- **Linde**⁶⁰. Es una empresa alemana especializada en gases industriales y medicinales. Sus operaciones en México, ubicadas en Monterrey y bajo el nombre de Praxair, están principalmente vinculadas a salud.
- **Merck**⁶¹. Es un grupo alemán que opera en tres grandes áreas de negocio: salud, ciencias de la vida, y materiales de alto rendimiento, que es el segmento en donde provee a la cadena de semiconductores entre otras. Merck tiene operaciones en México desde hace más de 90 años, realizando operaciones en sus tres líneas de negocio. Su sede está en Ciudad de México.
- **DuPont**⁶². Es otra de las grandes empresas integradas que tiene productos en numerosas verticales, incluidos los semiconductores. Es de origen estadounidense, y en México opera desde Ciudad de México, atendiendo a sectores afines a los semiconductores, como el electrónico y el aeroespacial.
- **Fujifilm Electronic Materials**. Se trata de una división de la japonesa *Fujifilm*, que se especializa en proporcionar una variedad de productos químicos y materiales avanzados utilizados en aplicaciones electrónicas y de semiconductores. Esta división específica no está presente en México, ya que las operaciones de *Fujifilm* en el país se especializan en insumos médicos⁶³.

⁵⁹ <https://www.solvay.com/en/solutions-market/electronics/semiconductors>

⁶⁰ <https://www.linde.mx/contact-us>

⁶¹ <https://www.merckgroup.com/mx-es/company/who-we-are.html>

⁶² <https://www.dupont.mx/>

⁶³ <https://global.fujifilm.com/en/all-regions/na/mx>

4. Conclusiones

México tiene un enorme sector industrial y un alto grado de integración a las cadenas globales de valor. Esto lo convierte en un gran demandante de distintos productos y sustancias químicas. A pesar del valor estratégico que la industria química tiene para el país, la realidad es que actualmente es un sector pequeño que, además, lleva más de tres décadas de constante retracción. Por consiguiente, el país se ha consolidado como uno de los más deficitarios del mundo en su comercio de químicos, abriendo grandes y urgentes desafíos de desarrollo. Debido a la heterogeneidad inherente a estos productos, las acciones de política pueden (y deben) ser múltiples y complementarias.

Desde la perspectiva de las CGV, un país tiene tres tipos de estrategias genéricas para mejorar su posición en las redes productivas: mejorar la competitividad en eslabones en los que ya participa, moverse a eslabones de mayor valor agregado, o desarrollar cadenas hasta ahora poco exploradas por las empresas locales.

Dentro de las estrategias de mejora de eslabones, quizás la más relevante y urgente es la asociada al sector de hidrocarburos y productos químicos básicos derivados. Con inversiones en este eslabón, se aseguraría materia prima petroquímica (etano, propano, nafta) suficiente para mejorar la competitividad aguas abajo, dando una solución al gran déficit comercial que enfrenta la cadena.

En lo referente al desarrollo de nuevos eslabones, México puede aprovechar las oportunidades que se desprenden del proceso de reorganización geográfica que están atravesando varias CGV y explotar su cercanía con los Estados Unidos. Una oportunidad concreta en este grupo es la de químicos para semiconductores. Dentro de las distintas actividades que hacen a la CGV de los semiconductores, Estados Unidos tiene una posición débil en el segmento de materiales y productos químicos, hasta ahora fuertemente dominado por Asia. A través del Fondo Internacional de Innovación y Seguridad Tecnológica (ITSI), Estados Unidos ha iniciado esfuerzos formales para detectar oportunidades para cubrir su demanda en este segmento y otros en los que tiene baja presencia (como, por ejemplo, el eslabón de *backend*) con aliados en occidente. México tiene ventajas comparativas en al menos cuatro productos insumidos para la fabricación de semiconductores, y podría desarrollar las capacidades para producirlos con pureza de grado electrónico de acuerdo con los estándares requeridos por los fabricantes de chips. Esta estrategia necesitará, fundamentalmente, resolver problemas de coordinación e iniciar proyectos de I+D colaborativa entre los productores locales y estos clientes. Una normativa regulatoria moderna, una alta suscripción de estándares, un adecuado sistema de derechos de propiedad, y el desarrollo de capacidades en las empresas locales son puntos clave para lograr explotar estos nichos con éxito.

Finalmente, en la visión de desarrollar nuevas cadenas dentro de la industria química, México tiene también grandes potencialidades de cara a cadenas emergentes en el mundo, como la economía circular y aquellas vinculadas a la transición verde de las economías. Para este escenario, deben incrementarse los esfuerzos de I+D y capital para desarrollar los productos que contribuirán a reemplazar a las fuentes petroquímicas, y consolidar la posición del país en materia de economía circular. Aprovechando su ventajoso acceso a fuentes abundantes de energía solar y eólica, México podría también convertirse en un líder regional en hidrógeno y amoníaco verde.

En resumen, el mensaje fundamental que emerge del análisis presentado en este documento es que estrategias aisladas, como la de crear capacidades para la producción de químicos de grado electrónico que puedan aprovisionar a empresas de semiconductores, no podrán ser plenamente exitosas si no se encuadran en una visión más amplia que busque resolver los problemas que la industria química mexicana ha ido acumulando en las últimas décadas, lo cual incluye un amplio rango de puntos, desde acondicionamiento de la infraestructura hasta desafíos en materia regulatoria.

Bibliografía

- ACC (2022). 2022 Guide to the Business of Chemistry. American Chemistry Council.
Recuperado de: <https://www.americanchemistry.com/chemistry-in-america/data-industry-statistics/resources/2022-guide-to-the-business-of-chemistry>
- ANIPAC (2021). 2° Informe del Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico en México. Diciembre de 2021. Asociación Nacional de Industrias del Plástico.
Recuperado de: <https://anipac.org.mx/wp-content/uploads/2021/12/2o-INFORME-Acuerdo-Nal-Plasticos-6-12-21.pdf>
- Bamber, P., Frederick, S., y Gereffi, G. (2016). The Philippines in the Chemical Global Value Chain. Duke Center on Globalization, Governance and Competitiveness at the Social Science research Institute. Recuperado de:
https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/12486/2016-05_Duke%20CGGC%20study_Philippines_Chemical%20GVC.pdf
- Carver, C. (2023). Exposure To Silica Dust Has Serious Health Consequences. Recuperado de: <https://sps.honeywell.com/us/en/support/blog/safety/exposure-silica-dust-serious-health-consequences>
- Chemical & Engineering News (2022). C&EN's Global Top 50 chemical firms for 2022. Recuperado de: <https://cen.acs.org/business/finance/CENs-Global-Top-50-2022/100/i26>
- CSG (2019). Política Nacional Integral para la Gestión de Sustancias Químicas. Consejo de Salubridad General. Recuperado de:
http://csg.gob.mx/descargas/MundoQuimico/Acuerdo_CSG_SQ_csb_lrb-2_12_19.pdf
- Davis, L. (2018). The shale oil and gas revolution. *Engineering*, 4(4), 438-439.
- De María y Campos, M. (2017). Auge, caída y oportunidades de la industria química y petroquímica en México. Diario El Financiero. Recuperado de:
<https://www.elfinanciero.com.mx/opinion/mauricio-de-maria-y-campos/auge-caida-y-oportunidades-de-la-industria-quimica-y-petroquimica-en-mexico/>
- European Commission. (2015). Monitoring the Impacts of REACH on Innovation, Competitiveness and SMEs.
- Filippo, A. y Guaipatín, C. (2021). Modelo de intervención en las cadenas globales de valor de las industrias pesadas y otros sectores estratégicos en México. Nota técnica del Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de:
<http://dx.doi.org/10.18235/0003756>
- Filippo, A., Jiménez Gallardo M. A., Guaipatín, C., y Piedra, E. (2024). Capacidades de México para desarrollar su industria química para semiconductores (documento borrador).
- Filippo, A., Guaipatín, C., Navarro, L., Wyss, F. (2022a). Cadena de Valor de Semiconductores: Estructura y perspectivas de cara al nuevo escenario global. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.18235/0004277>

- Filippo, A., Guaipatín, C., Navarro, L., Wyss, F. (2022b). México y la cadena de valor de los semiconductores: oportunidades de cara al nuevo escenario global. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.18235/0004276>
- Filippo, A., Guaipatín, C., Navarro, L., Wyss, F. (2023). Las Políticas de Desarrollo Productivo frente a los nuevos imperativos de las Cadenas Globales de Valor. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.18235/0005148>
- Fortune Business Insights (2022). The global electronic chemicals and materials market impact analysis. Recuperado de: <https://www.fortunebusinessinsights.com/electronic-chemicals-and-materials-market-106619>
- Gereffi, G., Cattaneo, O., Miroudot, S., y Taglioni, D. (2013). Joining, Upgrading and Being Competitive in Global Value Chains: A Strategic Framework. World Bank Policy Research Working Paper 6406. Disponible en: <https://ssrn.com/abstract=2248476>
- Gereffi, G., Humphrey, J., y Sturgeon, T. (2005). The governance of global value chains. Review of international political economy, 12(1), 78-104. Recuperado de: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09692290500049805>
- Gereffi, Gary. (2019). Economic upgrading in global value chains. Handbook on global value chains (pp. 240-254). Edward Elgar Publishing. Recuperado de: <https://www.elgaronline.com/display/edcoll/9781788113762/9781788113762.00008.xml>
- Global Newswire (2022). The rise in demand for semiconductors. Recuperado de: <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/05/10/2440023/0/en/The-Rise-In-Demand-For-Semiconductors-In-Various-Industries-Is-Expected-To-Drive-The-Growth-Of-The-Electronic-Wet-Chemicals-Market-At-A-Rate-Of-5-As-Per-The-Business-Research-Compa.html>
- Hausmann, R. y Hidalgo, C. (2009). The building blocks of economic complexity. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 106, No. 26, pp. 10570–10575.
- ICCA (2019). The global chemical industry: Catalyzing growth and addressing our world's sustainability challenges. Recuperado de: <https://www.oxfordeconomics.com/resource/the-global-chemical-industry-catalyzing-growth-and-addressing-our-world-sustainability-challenges/>
- IEA (2023). Chemicals. International Energy Agency. Recuperado de: <https://www.iea.org/energy-system/industry/chemicals>
- Khan, S., Mann, A., y Peterson, D. (2021). The Semiconductor Supply Chain: Assessing National Competitiveness. CSET Issue Brief. Recuperado de: <https://cset.georgetown.edu/publication/the-semiconductor-supply-chain/>
- McKinsey (2022). Reimagining Mexico's chemical industry. Recuperado de: <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/reimagining-mexicos-chemical-industry>
- McKinsey (2023). Decarbonizing the chemical industry. Recuperado de: <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/decarbonizing-the-chemical-industry>
- Promexico (2018). La industria química mexicana: hacia la química 4.0. Promexico, Unidad de Inteligencia de Negocios. Recuperado de: https://irp-cdn.multiscreensite.com/0b2ce1fd/files/uploaded/Prom%C3%A9xico_La%20Industria

[a%20Qu%C3%ADmica%20Mexicana%20hacia%20la%20Qu%C3%ADmica%204.0.pdf](#)

SIA (2023). U.S. Semiconductor Ecosystem Map. Semiconductor Industry Association.

Disponible en: <https://www.semiconductors.org/u-s-semiconductor-ecosystem-map/>

TEHCET (2023). Semiconductor Supply Chain Problems Running Rampant? Solutions to mitigate future materials supply vulnerabilities. Recuperado de:

https://criticalmaterials.org/2023-techcet-news/#September27_2023

Varas, A., Varadarajan, R., Goodrich, J. & Yinug, F. (2021). Strengthening the global semiconductor supply chain in an uncertain era. Boston Consulting Group for Semiconductor Industry Association, April 2021. Recuperado de

https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/05/BCG-x-SIA-Strengthening-the-Global-Semiconductor-Value-Chain-April-2021_1.pdf

WSTS (2023). World Semiconductor Market Forecast, World Semiconductor Trade Statistics (WSTS), en https://www.wsts.org/esraCMS/extension/media/f/WST/5263/WSTS_nr-2021_11.pdf

Apéndice 1. Clasificación de productos químicos en los eslabones de la cadena de valor

Tabla A1.1. Clasificación de sustancias químicas según SCIAN6

Eslabón	Productos	SCIAN	Descripción
Sustancias básicas	Petroquímicos	325110	Fabricación de petroquímicos básicos del gas natural y del petróleo refinado
		325211	Fabricación de resinas sintéticas
		325212	Fabricación de hules sintéticos
	Gases industriales	325120	Fabricación de gases industriales
	Otras sustancias básicas	325180	Fabricación de otros productos químicos básicos inorgánicos
		325190	Fabricación de otros productos químicos básicos orgánicos
		325220	Fabricación de fibras químicas
Sustancias intermedias	Compuestos intermedios	325130	Fabricación de pigmentos y colorantes sintéticos
		325411	Fabricación de materias primas para la industria farmacéutica
	Adhesivos	325520	Fabricación de adhesivos
	Tintas	325910	Fabricación de tintas para impresión
	Otras sustancias intermedias	325920	Fabricación de explosivos
Sustancias de especialidad	Fertilizantes	325310	Fabricación de fertilizantes
	Agroquímicos	325320	Fabricación de pesticidas y otros agroquímicos, excepto fertilizantes
	Preparaciones farmacéuticas	325412	Fabricación de preparaciones farmacéuticas
	Pinturas y recubrimientos	325510	Fabricación de pinturas y recubrimientos
	Artículos de uso personal	325610	Fabricación de jabones, limpiadores y dentífricos
		325620	Fabricación de cosméticos, perfumes y otras preparaciones de tocador
		325991	Fabricación de cerillos

	Otras sustancias de especialidad	325992	Fabricación de películas, placas y papel fotosensible para fotografía
		325993	Fabricación de resinas de plásticos reciclados
		325999	Fabricación de otros productos químicos

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A1.2. Clasificación de sustancias químicas según HS4

Eslabón	Productos	Códigos HS4
Sustancias básicas	Químicos inorgánicos	0628
	Químicos orgánicos	0629
Sustancias intermedias	Tintas	0632
	Adhesivos	0635
	Explosivos	0636
Sustancias de especialidad	Preparaciones farmacéuticas	0630
	Agroquímicos y fertilizantes	0631
	Artículos de uso personal	0633, 0634
	Otras sustancias de especialidad	0637, 0638

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 2. Cómo se hace un semiconductor

Materias primas

Cuando hablamos de semiconductores, en realidad estamos refiriendo a una propiedad de ciertas sustancias que no son ni conductoras (como por ejemplo el cobre) ni aislantes (como por ejemplo el vidrio). De esta manera, su conductividad eléctrica puede ser alterada bajo ciertas condiciones, que necesitan de productos químicos que las faciliten.

En electrónica, el material semiconductor por excelencia es el silicio⁶⁸. El silicio es un semimetal, o metaloide, que tiene la particularidad de ser muy abundante: luego del oxígeno, es el material más abundante en la corteza terrestre. Si bien actualmente es China quien concentra el 68% de la producción (valor de 2022), se considera que las reservas mundiales superan ampliamente a la demanda (USGS, 2023). Por lo tanto, lo importante no es la dotación del recurso, sino la capacidad de refinarlo a “nivel electrónico”⁶⁹. Es así que el mercado de fabricación de *wafers* “crudos”⁷⁰ de silicio se encuentra hoy concentrado en cinco empresas⁷¹, ninguna de ellas de origen chino: *Shin-Etsu* y *SUMCO* son ambas japonesas y ostentan casi el 60% del mercado; luego, con participaciones de entre el 10 y 15% están *GlobalWafers* (Taiwán), *Siltronic* (Alemania), y *SK Siltron* (Corea del Sur).

Frontend

Una vez que los fabricantes de semiconductores reciben los *wafers*, inicia un proceso que clasificaremos en 7 pasos relativamente genéricos que se repiten cientos de veces con variaciones en los tipos de químicos utilizados en cada caso, caracterizando al eslabón de *Frontend*. Dependiendo del tipo específico de semiconductor y su tecnología, el proceso de fabricación de una oblea de semiconductores puede insumir en total entre 400 y 1.400 pasos que demoran entre 3 y 5 meses de ejecución (Varas *et al.*, 2021). Este proceso se resume en la Figura A2.1, y lo describimos en detalle a continuación.

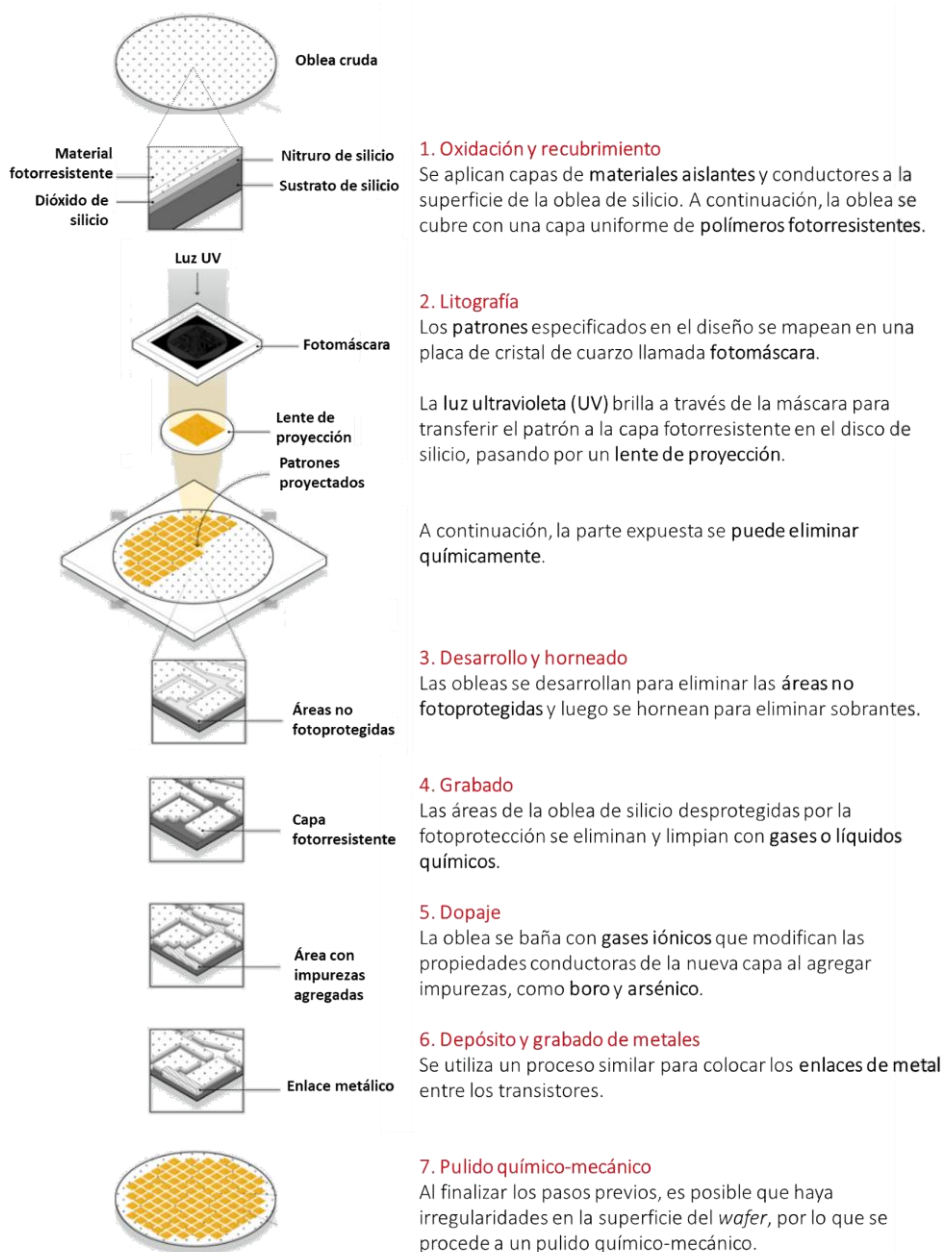
⁶⁸ Si bien el silicio es el material semiconductor más utilizado para la fabricación de chips, existen otros más incipientes o insumidos para aplicaciones específicas, como el arseniuro de galio, el nitruro de galio y el carburo de silicio (Filippo *et al.*, 2022). El silicio también juega un papel crucial en la tecnología fotovoltaica, ya que se utiliza en la fabricación de células solares para la conversión de energía solar en electricidad. No obstante, el material requerido para la producción de semiconductores requiere un nivel de pureza 1.000 veces mayor que el requerido en la producción de paneles solares (Varas *et al.*, 2021).

⁶⁹ Fundamentalmente, nos referimos a la remoción de imperfecciones y partículas metálicas, que son las que ponen en peligro las propiedades semiconductoras del silicio.

⁷⁰ Entenderemos por *wafer* u oblea de silicio a los discos de este material con pureza de grado electrónico sobre los cuales luego se imprimirán los chips. Se agrega el calificativo de “crudo” para indicar que los chips aún no han sido impresos en él.

⁷¹ El mercado de los *wafers* crudo ha tendido a una fuerte concentración. En 1990, el mercado se dividía entre más de 20 proveedores (Kleinhans y Baisakova, 2020).

Figura A2.1. Paso a paso: cómo se hace un semiconductor



Los pasos se repiten cientos de veces con diferentes productos químicos para crear más capas, según las características deseadas del circuito.

Cada oblea completa contiene cientos de circuitos integrados idénticos.
Las obleas se envían para ensamblar, empaquetar y testeo, lo que incluye cortar la oblea en chips individuales (dados).

Fuente: Adaptado de Bloomberg (2021)

Oxidación y recubrimiento

En esta etapa, se hace crecer una fina capa de *dióxido de silicio* (SiO_2), la cual actuará como aislante. Esto típicamente se logra de dos formas:

- **Oxidación térmica:** La oblea de silicio se expone a altas temperaturas, en presencia de oxígeno o vapor de agua. A estas temperaturas, el silicio de la superficie reacciona frente a la presencia del oxígeno, formando la capa de dióxido de silicio.

- **Depositado químico en fase de vapor (CVD):** Es una técnica más precisa, que utiliza *silano* (SiH_4) u otros gases que contienen silicio para crear el dióxido de silicio en reacción con oxígeno u ozono.

Luego, esta capa es cubierta con un material fotorresistente (*photoresist*). Se trata de una película sensible a la luz que actúa como una máscara en fases posteriores, dejando algunas áreas expuestas y otras protegidas. Los *photoresist* son sustancias químicas de especialidad cuyo formulado varía de acuerdo con las necesidades de cada chip en particular.

Litografía

La litografía es la fase central en la fabricación de semiconductores que implica la transferencia de patrones a la oblea de silicio⁷². Esta etapa no insume químicos *per se*, sino que trabaja sobre las capas creadas anteriormente, quemando patrones con luz ultravioleta extrema (que se genera naturalmente solo en el espacio exterior). Esta luz pasa por una fotomáscara (donde se encuentra establecido el patrón del circuito) y un lente de proyección.

Desarrollo y horneado

Después de la exposición, la oblea pasa por un proceso de desarrollo (*development*). Esto consiste en eliminar las partes de la oblea que no estaban protegidas por la máscara de *photoresist*. Para ello, se utilizan químicos que se denominan “*developers*”⁷³.

Después del proceso de desarrollo, la oblea será “horneada”: es calentada a una temperatura específica durante un período definido para estabilizar el patrón desarrollado en la fotoprotección. A su vez, el proceso de horneado ayuda a eliminar cualquier resto de solvente revelador del fotoprotector, lo que evita que interfiera con los pasos posteriores.

Grabado

El proceso de desarrollo, que consiste en eliminar las partes de las capas superiores no fotoprotegidas, aquí se extiende a la oblea de silicio en sí, con el proceso de grabado (*etching*). Hay dos tipos principales de procesos de grabado:

- **Grabado húmedo:** Implica sumergir la oblea semiconductora en una solución química (*etchant*)⁷⁴, que reacciona selectivamente con las áreas expuestas de la superficie de la oblea. El *etchant* disuelve químicamente el material expuesto luego del proceso de desarrollo.
- **Grabado en seco (grabado con plasma):** Se trata de una técnica más moderna y compleja, que implica el uso de gases reactivos para eliminar material de la superficie de la oblea⁷⁵. La oblea se coloca en una cámara de vacío y se genera un plasma aplicando energía de radiofrecuencia (RF) o microondas al gas. El plasma reacciona químicamente con las áreas expuestas de la oblea, lo que lleva a la eliminación de material.

⁷² Solo hay un proveedor en el mundo para las máquinas que realizan este proceso (*ASML Holding NV*, con sede en Países Bajos) (Varas *et al.*, 2021).

⁷³ En rigor, la fotorresistencia puede ser positiva o negativa. Una fotorresistencia positiva indica que las áreas expuestas a la luz se vuelven más solubles y son removidas durante la fase de desarrollo con soluciones alcalinas. En el caso de la fotorresistencia las áreas expuestas son menos solubles y, por lo tanto, son las que prevalecen en el proceso de desarrollo (donde se utilizan soluciones ácidas).

⁷⁴ Los *etchants* más comunes incluyen ácidos o soluciones alcalinas adaptadas al material específico que se va a grabar.

⁷⁵ Los gases reactivos comunes incluyen gases a base de flúor (p. ej., CF_4 , SF_6) para el grabado de silicio, y gases a base de cloro (p. ej., Cl_2) para materiales como el metal y el dióxido de silicio.

Después del grabado, el *photoresist* restante se elimina de la oblea utilizando eliminadores de resistencia (soluciones químicas diseñadas para disolver el *photoresist*).

Dopaje (implantación iónica)

La fase de dopaje implica la introducción de impurezas específicas (dopantes) en el material semiconductor a fin de modificar sus propiedades eléctricas. El dopaje permite que los dispositivos semiconductores muestren los comportamientos conductivos deseados, lo que les permite funcionar como transistores.

Durante el proceso de dopaje, los gases dopantes se introducen en una cámara que contiene la oblea semiconductora. Los átomos dopantes se difunden en el material semiconductor y se incorporan a la red cristalina, introduciendo las propiedades eléctricas deseadas. Hay dos tipos principales de dopaje:

- **Dopaje tipo N:** introduce átomos con electrones adicionales (átomos donantes) en el material semiconductor. Los dopantes comunes para el dopaje de tipo N son elementos del Grupo 15 de la tabla periódica, como el *fósforo* (P) o el *arsénico* (As); los cuales son obtenidos a partir de gases como la *fosfina* (PH₃) y la *arsina* (AsH₃), respectivamente. Cuando estos átomos dopantes reemplazan algunos átomos de silicio en la red cristalina, crean un exceso de electrones, lo que resulta en un exceso de portadores de carga negativa (electrones) en el material.
- **Dopaje tipo P:** introduce átomos con menos electrones (átomos aceptores) en el material semiconductor. Los dopantes comunes para el dopaje de tipo P son elementos del Grupo 13 de la tabla periódica, como el *boro* (B) o el *galio* (Ga), también obtenidos a partir de gases que los componen. Cuando estos átomos dopantes reemplazan algunos átomos de silicio, crean “agujeros” o vacantes en la red cristalina, lo que lleva a un exceso de portadores de carga positiva (agujeros) en el material.

Depositado y grabado de metales

En este paso se crean las conexiones metálicas entre los transistores y componentes resultantes del grabado. Para ello, se crean capas de metal sobre la superficie de la oblea y luego graba selectivamente el exceso de metal para formar los patrones y conexiones deseados. Existen dos técnicas principales:

- **Depositado físico de vapor (PVD):** consiste en vaporizar un material metálico y luego condensarlo en la superficie de la oblea para formar una película delgada. Los metales comunes utilizados en PVD incluyen *aluminio* (Al), *cobre* (Cu) y *tungsteno* (W). Los átomos o iones metálicos viajan en una cámara de vacío y se condensan en la superficie de la oblea, formando una capa metálica uniforme.
- **Depositado químico de vapor (CVD):** utiliza reacciones químicas para depositar películas de metal en la superficie de la oblea. Los precursores de metales gaseosos, como los compuestos metalorgánicos, se introducen en la cámara del reactor y las reacciones químicas crean una película de metal sólido en la oblea. CVD se utiliza para depositar metales como *tungsteno* (W).

Una vez depositada la capa de metal, es necesario eliminar el exceso de metal para formar los patrones e interconexiones deseados. Si bien las estrategias de grabado (*etching*) son las mismas que en el caso del silicio (grabado húmedo y seco), los procesos difieren debido a que los metales son menos reactivos químicamente que los semimetales.

- **Grabado húmedo para metales:** implica sumergir la oblea en una solución química (*etchant*) que disuelve selectivamente el metal en las áreas expuestas. Los *etchants*

comunes para aluminio incluyen soluciones a base de *ácido fosfórico*. Para el cobre, se utilizan *persulfato de amonio* u otros agentes oxidantes.

- **Grabado en seco para metales:** generalmente se realiza mediante un proceso de grabado con plasma, similar al grabado en seco que se usa para los semimetales. Los gases reactivos se utilizan en una cámara de vacío para reaccionar químicamente y eliminar el metal expuesto.

Pulido químico-mecánico (CMP)

Al finalizar los pasos previos, es posible que haya irregularidades en la superficie del *wafer* debido a la formación de estructuras en diferentes niveles y la eliminación selectiva de materiales. Estas irregularidades podrían afectar negativamente el rendimiento y la confiabilidad de los dispositivos si no se corrigen.

El pulido químico-mecánico (CMP, por sus siglas en inglés) se utiliza para eliminar las irregularidades y lograr una superficie plana y uniforme en el *wafer*. Durante el proceso de CMP, el *wafer* se coloca sobre una almohadilla de pulido que se mueve en relación con un plato giratorio. Se aplica una mezcla de químicos (*slurry*) que contiene partículas abrasivas a la superficie del *wafer*⁷⁶.

Después del CMP, el *wafer* está listo para el depositado de capas adicionales, que formarán los componentes activos y las interconexiones del circuito integrado.

Backend

Una vez finalizada la impresión de la oblea, inician las actividades que caracterizan al eslabón de *backend*. Aquí, las obleas serán cortadas en pequeños trozos que constituyen a los chips individuales. Luego, los chips son encapsulados y testeados masivamente antes de integrarse definitivamente en una placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés), donde vuelven a ser testeados antes del empaque final. Revisamos estos cinco pasos, junto con los productos insumidos en cada uno, a continuación.

Corte (dicing)

Este paso consiste en tomar las obleas impresas y cortar los pequeños dados donde están impresos los circuitos. Este corte puede realizarse de manera mecánica, con una sierra especial, o utilizando un láser. No se utilizan químicos de manera directa.

Encapsulado (packaging)

Cada chip se es encapsulado o empaquetado para protegerlo del entorno y facilitar su manipulación. El encapsulado puede ser en cerámica o plástico, y proporciona conexiones eléctricas a través de alambres de oro o aluminio. En este paso se utilizan epoxis, resinas y adhesivos.

⁷⁶ El *slurry* es una combinación de líquidos, generalmente agua o algún solvente, y partículas sólidas abrasivas suspendidas en él. Las partículas abrasivas pueden estar compuestas de diferentes materiales, como *óxido de silicio* (SiO₂), *óxido de aluminio* (Al₂O₃), *dióxido de cerio* (CeO₂), *carburo de silicio* (SiC) o diamante, dependiendo del material que se esté eliminando y las características específicas del proceso de CMP.

Testeo

Los chips son sometidos a pruebas pasivas para corroborar su correcto funcionamiento; los que no cumplen con el desempeño estándar, son descartados.

Por su característica, se trata de una fase intensiva en capital. Dentro de los químicos que se insumen, pueden mencionarse a los disolventes para limpiar los chips luego del proceso de encapsulado, y los gases y líquidos de enfriamiento (como el helio) para mantener la temperatura controladas durante las pruebas.

Montaje

Los chips encapsulados se montan, junto con otros chips, en placas de circuito impreso (PCB). Las PCB proporcionan la estructura física y las conexiones eléctricas para los chips y otros componentes electrónicos. Es bajo esta forma que los chips son finalmente incorporados en los aparatos electrónicos para su uso.

Las PCB están hechas típicamente de materiales orgánicos compuestos, principalmente de fibra de vidrio y resina epoxi. Esta combinación de materiales orgánicos proporciona una base sólida y aislante para los componentes electrónicos en un circuito. Sin embargo, en ciertas aplicaciones, como en entornos de alta temperatura o alta frecuencia, los PCB también pueden estar hechos de materiales inorgánicos, como cerámica o materiales compuestos cerámicos-vidrio, para cumplir con requisitos específicos de rendimiento.

Se utilizan sustancias formuladas, como los flujos y pastas de soldadura. Los flujos de soldadura son líquidos que se aplican sobre las superficies a ser soldadas a fin de remover impurezas. Por su parte, la pasta de soldadura es una mezcla semisólida de polvo de soldadura (aleación de estaño y plomo o aleación sin plomo) y un flujo de soldadura; durante el proceso de soldadura esta pasta se calienta y se funde, permitiendo que el componente se adhiera a la almohadilla de la PCB.

Otras sustancias utilizadas son distintos líquidos limpiadores, como por ejemplo el IPA (isopropilalcohol) para eliminar contaminantes y residuos de las superficies de los dispositivos y las PCB.

Empaque final

Las PCB terminadas son empaquetados en cajas, listas para ser enviadas y utilizadas en dispositivos electrónicos finales. Se utilizan distintos elementos de embalaje clásico, como espumas y plásticos.