



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

**SOSTENIBILIDAD DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE LA INDUSTRIA ELECTRÓNICA Y DE  
SEMICONDUCTORES: UN ANÁLISIS CRÍTICO DE SU  
IMPACTO ECOLÓGICO Y SOCIAL EN COLOMBIA.**

Programa de Maestría en Ingeniería

Presentado por:

PAOLA MEJIA GUTIERREZ

Dirigido por:

Ph.D. OLGA LUCÍA DELGADILLO VARGAS

Pontificia Universidad Javeriana Cali  
Facultad de Ingeniería y Ciencias  
Julio de 2025

# **SOSTENIBILIDAD DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE LA INDUSTRIA ELECTRÓNICA Y DE SEMICONDUCTORES: UN ANÁLISIS CRÍTICO DE SU IMPACTO ECOLÓGICO Y SOCIAL EN COLOMBIA.**

P. Mejía <sup>a</sup>.

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería y Ciencias, estudiante de maestría Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana Cali, paolamejia@javerianacali.edu.co.

## **ABSTRACT**

This study analyzes the feasibility of strengthening the electronics and semiconductor industry in Colombia based on Law No. 047 of 2024 (Chips Law), which aims to reduce technological dependence, foster innovation, attract foreign investment, and generate skilled employment. From a critical perspective, the study assesses the environmental and social risks associated with implementing the law in the absence of sustainable measures in production processes. The findings show that, although the law includes fiscal and financial incentives, significant negative impacts may arise: high water and energy consumption, pollutant emissions, electronic waste generation, budgetary tensions, infrastructure gaps, and a shortage of qualified personnel. It is concluded that, without a comprehensive sustainability and risk management strategy, the development of the sector could worsen territorial inequalities and compromise the country's natural resources. Therefore, the adoption of industrial ecology principles and strong environmental governance is recommended to guide the sector's growth.

Keywords: Semiconductor industry; sustainability; environmental impact; technological innovation; industrial ecology; Colombia; natural resources; Law No. 047 of 2024; environmental governance; territorial development.

---

## **RESUMEN**

Este estudio analiza la viabilidad de fortalecer la industria electrónica y de semiconductores en Colombia a partir del Proyecto de Ley No. 047 de 2024 (Ley de Chips), que propone reducir la dependencia tecnológica, fomentar la innovación, atraer inversión extranjera y generar empleo calificado. A partir de un enfoque crítico, se evalúan los riesgos ambientales y sociales asociados a la implementación del proyecto en caso de que no se integren medidas sostenibles en los procesos de producción. Los resultados muestran que, aunque la ley contempla incentivos fiscales y financieros, podrían surgir

impactos negativos significativos: alto consumo de agua y energía, emisiones contaminantes, generación de residuos electrónicos, tensiones presupuestales, brechas en infraestructura y escasez de personal calificado. Se concluye que, sin una estrategia integral de sostenibilidad y gestión de riesgos, el desarrollo del sector podría agravar desigualdades territoriales y comprometer los recursos naturales del país. Por ello, se recomienda adoptar principios de ecología industrial y una gobernanza ambiental que acompañe el crecimiento del sector.

Palabras Claves: Industria de semiconductores; sostenibilidad; impacto ambiental; innovación tecnológica; ecología industrial; gobernanza ambiental; recursos naturales; desarrollo territorial; Colombia; Ley N.º 047 de 2024.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Los semiconductores son el corazón de gran parte de la tecnología moderna, los teléfonos móviles, televisores, cámaras digitales, luces LED, cajeros automáticos, equipos médicos y automóviles. El diseño y la fabricación de semiconductores son el motor clave de la industria electrónica, la cual mueve al año cerca de tres billones de dólares en ventas al consumidor final y genera alrededor de 5 billones en ventas tecnológicas que incluye servidores, redes de telecomunicaciones, sistemas industriales automatizados, centros de datos, inteligencia artificial y equipos especializados. Se estima que para el año 2027, el mercado de semiconductores alcanzará los 726.730 millones de dólares [1].

Actualmente, el 75% de la producción mundial de semiconductores se concentra en Asia

Oriental, especialmente en Corea del Sur, Japón y China, país que produce el 25% del total global. Una sola compañía, la Taiwán Semiconductor Manufacturing Company, fabrica el 90% de los semiconductores más avanzados del mundo. Paralelamente, países como Alemania y los Países Bajos han comenzado a aumentar su participación en este sector [2].

Los avances científicos y tecnológicos en esta industria han permitido el desarrollo de aplicaciones como la inteligencia artificial, la computación de alto rendimiento, las redes 5G y 6G, la conducción autónoma y el internet de las cosas. También se están explorando nuevas tecnologías como la litografía ultravioleta extrema, transistores de nueva generación, materiales innovadores y procesos que integran mejor el diseño y la tecnología.

No obstante, este crecimiento acelerado ha traído consigo un fuerte incremento de residuos eléctricos y electrónicos, motivado por la obsolescencia programada y el consumo constante. Estos residuos están creciendo tres veces más rápido que el resto de los residuos sólidos urbanos. En 2022 se generaron 62 millones de toneladas, lo que representa un aumento del 82% con respecto al año 2010. Si esta tendencia continúa, se podrían alcanzar los 82 millones de toneladas en 2030. A pesar de esto, solo el 22,3% de esos residuos fue recolectado y reciclado de forma adecuada [3].

La industria electrónica y de semiconductores representa una fuente importante de impacto ambiental. Durante su fabricación se utilizan grandes cantidades de recursos naturales y se generan residuos tóxicos. Se estima que es responsable del 0,3 % de las emisiones globales directas de carbono, a lo que se suma otro 1 % proveniente de su cadena de suministro y del uso de sus productos, siendo el consumo eléctrico responsable de más del 80 % de dichas emisiones [4].

La producción de semiconductores tiende cada vez más a concentrarse en pocas zonas del mundo, ya que esto permite reducir costos gracias a economías de escala. En los últimos años, la tecnología necesaria para fabricar estos componentes se ha vuelto más compleja, por

inversión en plantas, equipos e I+D, lo que también ha elevado significativamente los costos asociados [3].

En este contexto, Colombia busca sumarse a los avances tecnológicos globales con el proyecto de Ley No. 047 de 2024, que promueve el desarrollo de la industria electrónica y de semiconductores en el país, denominándola “la Cuarta Revolución Industrial”. Este proyecto, aprobado en primer debate por la Comisión Sexta del Senado en noviembre de 2024, se presenta como una oportunidad para atraer inversión tanto nacional como extranjera, apoyar la creación de empresas especializadas y formar talento humano en áreas clave para el futuro tecnológico del país.

Esta iniciativa encarna, no obstante, una serie de inquietudes. El despliegue de esta industria en el contexto colombiano, caracterizado por estructuras productivas incipientes y alta dependencia tecnológica exógena, plantea interrogantes de orden estratégico, ambiental y ético. A pesar del entusiasmo institucional, la sostenibilidad de la cadena de valor electrónico no ha sido abordada desde un enfoque holístico. Por lo tanto, este documento pretende Evaluar la sostenibilidad del fortalecimiento de la industria electrónica y de semiconductores en Colombia.

Para ello, en primer lugar, se analiza el comportamiento del mercado global; en segundo lugar, se identifica el estado actual de la industria Electrónica y de Semiconductores en Colombia y sus posibilidades de expansión de acuerdo con el proyecto de Ley No. 047 de 2024 y, en tercer lugar, en el marco aquí expuesto, se determina qué tan sostenible puede llegar a ser la industria Electrónica y de Semiconductores en Colombia a través de un análisis desde la ecología industrial.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### *2.1 Ecología Industrial*

El modelo industrial tradicional, basado en una lógica lineal de extracción, producción, consumo y disposición, ha provocado un uso intensivo de los recursos naturales, así como un aumento significativo de desechos y contaminación. Esta dinámica ha contribuido a la profundización de la crisis ambiental global, generando la necesidad de repensar los sistemas de producción actuales.

En respuesta a este desafío, surge la ecología industrial, un enfoque interdisciplinario que busca transformar los sistemas industriales siguiendo los principios de los ecosistemas naturales, donde los residuos de un proceso se convierten en insumos para otro, es decir que la industria funciona como un ecosistema cerrado

en el que se minimice el desperdicio y se maximice el aprovechamiento de recursos.

Uno de los pilares fundamentales de la ecología industrial es la simbiosis industrial, entendida como la cooperación entre empresas para intercambiar subproductos, energía, agua o materiales, con el fin de optimizar su uso y reducir el impacto ambiental. Este enfoque permite cerrar ciclos de materiales y energía, promoviendo una economía circular más resiliente y sostenible [5]. Un ejemplo exitoso de este modelo es el parque industrial de Kalundborg, en Dinamarca, donde varias empresas colaboran en el intercambio de recursos, logrando reducir costos, emisiones y consumo de materias primas. En este contexto, se distinguen dos enfoques: la ecología industrial fuerte, que propone cambios estructurales profundos en los sistemas productivos, y la ecología industrial débil, que plantea acciones más graduales y flexibles, aunque orientadas hacia la sostenibilidad [6].

En este contexto, la ecología industrial se establece como una disciplina esencial, al ofrecer diversas herramientas analíticas descritas en la figura 1, que son de gran utilidad para evaluar impactos y proponer estrategias de sostenibilidad en sectores complejos como el electrónico y de semiconductores. Estas metodologías permiten optimizar el

metabolismo de los sistemas industriales y comprender sus interacciones con el entorno natural.

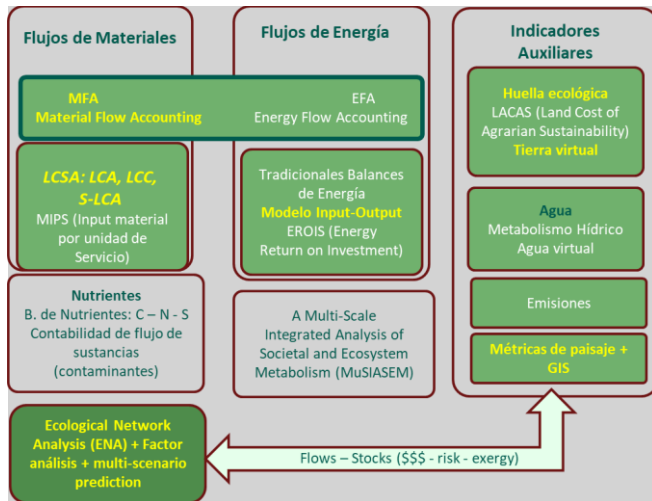


Figura 1. Herramientas para el análisis integrado de flujos de materiales, energía e indicadores ambientales.

Fuente: M. Giampietro, *The Metabolic Pattern of Societies*, 1.ª ed., Routledge, 2004 [6]

Entre las más relevantes para este análisis se encuentran: el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que cuantifica los impactos ambientales de un producto o proceso a lo largo de todas sus etapas, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final [7]; la simbiosis industrial, la cual promueve el intercambio de recursos entre empresas para optimizar el uso de materiales y energía [5]; la Dinámica de Sistemas, a través de su herramienta de mapeo de stocks y flujos (stocks and flows analysis), fundamental para la visualización y cuantificación de las entradas, acumulaciones y salidas de recursos y sustancias en un sistema [8]; y los indicadores de metabolismo industrial,

que permiten cuantificar la eficiencia en el uso de los recursos naturales [9]. La aplicación de estas herramientas posibilita la realización de diagnósticos completos y facilita la toma de decisiones fundamentadas sobre la viabilidad ecológica de políticas de desarrollo industrial, como la planteada en el Proyecto de Ley 047 de 2024 [10].

Este marco conceptual resulta especialmente útil para analizar el comportamiento de sectores con alto impacto ambiental, como la industria electrónica y de semiconductores, los cuales enfrentan retos crecientes en materia de gestión de residuos y eficiencia de recursos. La aplicación de herramientas de ecología industrial en estos sectores permite no solo optimizar procesos productivos, sino también articular políticas públicas que respondan a los desafíos ambientales actuales.

En el caso de Colombia, la legislación ha comenzado a reconocer la importancia de una gestión adecuada de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). El Decreto 284 de 2018 y la Resolución 851 de 2022 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establecen lineamientos para la gestión integral de estos residuos, bajo el principio de responsabilidad extendida del productor (REP). Estas normativas representan una oportunidad concreta para implementar estrategias de

ecología industrial en sectores clave, promoviendo alianzas entre empresas, incentivos al reciclaje y una producción más limpia [11].

### **3. METODOLOGÍA**

Este estudio se desarrolla bajo un enfoque mixto, cualitativo y cuantitativo, con un diseño exploratorio, descriptivo y analítico. Su objetivo se centra en examinar la sostenibilidad de la industria electrónica y de semiconductores en Colombia, en el contexto del Proyecto de Ley No. 047 de 2024. La investigación se fundamenta en una revisión documental exhaustiva, complementada con herramientas propias de la ecología industrial, que permiten abordar de forma sistémica y crítica los impactos ambientales y sociales asociados al desarrollo del sector.

#### *3.1 Fases del estudio*

La metodología se desarrolló en dos fases principales:

Fase 1 – Revisión documental y contextual:

Se recopilaron fuentes primarias y secundarias sobre el comportamiento del mercado global de semiconductores, la configuración de la cadena de suministro, la situación actual del sector en Colombia, y los contenidos técnicos y normativos del Proyecto de Ley No. 047 de 2024. Se consultaron informes especializados, bases

de datos internacionales, documentos legislativos y literatura científica sobre sostenibilidad, innovación tecnológica y ecología industrial.

*Fase 2 – Análisis desde la ecología industrial:*

Con base en el marco teórico de la ecología industrial, se desarrolló un análisis estructurado de los principales flujos de materia, energía y emisiones asociados a la etapa de fabricación de chips semiconductores, tomando como referencia coeficientes técnicos derivados de estudios de ciclo de vida industrial en plantas de tecnología madura. Se estimaron consumos y emisiones por unidad de chip producido (agua ultrapura, energía eléctrica y emisiones de CO<sub>2</sub>), y se proyectaron impactos acumulados para el período 2025–2030 en función del crecimiento estimado de la capacidad productiva nacional, según los lineamientos del Proyecto de Ley No. 047 de 2024.

#### *3.2 Incorporación del análisis de flujos y stocks*

En este estudio, se simuló un escenario base representativo de un sistema productivo caracterizado por su complejidad estructural y funcional, al integrar dimensiones técnicas, ecológicas y sociales interdependientes. Este tipo de sistema requiere herramientas de simulación dinámica para analizar su comportamiento acumulativo a lo largo del

tiempo. El modelo parte de supuestos de eficiencia técnica constante y crecimiento sostenido, sin incorporar tecnologías de mitigación ni ajustes al marco regulatorio. Esta configuración responde a los lineamientos generales del Proyecto de Ley No. 047 de 2024 y permite estimar los impactos acumulativos en el horizonte 2025–2030.

Las variables incorporadas en el modelo incluyen:

- Capacidad instalada de producción de chips, proyectada a partir de la inversión pública inicial y anual.
- Consumo de agua ultrapura, calculado mediante un coeficiente técnico estándar por unidad producida.
- Demanda energética y emisiones de CO<sub>2</sub>, estimadas por chip fabricado.
- Empleo directo generado, como indicador social vinculado a la intensidad laboral de la industria.

### *3.3 Alcances y limitaciones del modelo*

El modelo desarrollado tiene un enfoque exploratorio y de proyección, orientado a analizar tendencias acumulativas a mediano plazo en el contexto del crecimiento industrial simulado, limitado al período 2025–2030 y fue diseñado como herramienta de análisis

preliminar para estimar los impactos ecológicos y sociales que podrían derivarse de la implementación de una política nacional de semiconductores en Colombia, tomando como referencia los objetivos generales del Proyecto de Ley No. 047 de 2024.

En el componente ecológico, se incluyeron como variables clave el consumo de agua ultrapura, la demanda de energía eléctrica y las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), a partir de coeficientes técnicos fijos derivados de documentación técnica de la industria y estudios comparativos en procesos de fabricación de chips. En el componente social, se incorporó un indicador estimado de empleo directo, basado en la relación entre la cantidad de chips producidos y el número de trabajadores requeridos anualmente, principalmente en actividades de ensamblaje, pruebas y mantenimiento técnico. No obstante, el modelo no considera retroalimentaciones sociales ni efectos indirectos sobre la salud pública, evolución salarial, migración laboral, informalidad o distribución territorial de los impactos. Esta omisión limita su capacidad para capturar dinámicas sociales complejas y emergentes asociadas al desarrollo del sector. Tampoco se realizaron simulaciones de escenarios múltiples ni análisis formal de sensibilidad. Por ello, los resultados deben

interpretarse como proyecciones aproximadas basadas en supuestos fijos. Su utilidad radica en mostrar posibles tendencias generales y orientar decisiones estratégicas iniciales, pero no deben considerarse predicciones exactas ni recomendaciones definitivas. Aunque no se aplicó una simulación probabilística, se reconoce que variaciones razonables en parámetros como la inversión anual o la eficiencia técnica podrían generar desviaciones significativas en los resultados. Esto subraya la necesidad de interpretar los hallazgos como aproximaciones sujetas a incertidumbre.

Por esta razón, se recomienda interpretar los valores proyectados con un margen de incertidumbre conceptual estimado entre  $\pm 10\%$  y  $\pm 15\%$ . Este rango es congruente con márgenes usados en la cuantificación de incertidumbres y márgenes de diseño en modelos técnicos y de ingeniería, como se describe en metodologías QMU (Quantification of Margins and Uncertainties) utilizadas en campos que requieren evaluación rigurosa de confiabilidad [12]. Este enfoque puede complementarse en futuras investigaciones mediante el uso de escenarios múltiples, simulaciones con incertidumbre o herramientas de análisis multicriterio.

## 4. ANÁLISIS

### 4.1 *Comportamiento del Mercado Global*

En 2024, el mercado global de semiconductores alcanzó un récord de 627.6 mil millones de dólares, con un crecimiento del 19.1 % frente a 2023 [13]. Este aumento se debió a la alta demanda de chips avanzados para inteligencia artificial, servicios en la nube, procesamiento gráfico y centros de datos, así como a inversiones en unidades de procesamiento gráfico (Graphics Processing Units, GPU) y circuitos integrados de aplicación específica (Application-Specific Integrated Circuits, ASIC) [14], utilizados en dispositivos móviles, automóviles, sistemas industriales y tecnologías de energía solar.

En la última década, la industria de semiconductores creció de forma sostenida, impulsada por el uso de dispositivos móviles, con ingresos cercanos a los 600 mil millones de dólares anuales [13]. Desde 2017, tecnologías como el Internet de las Cosas y la computación en la nube fortalecieron el sector, aunque en 2019 cayó un 20 % por tensiones entre EE. UU. y China. La pandemia reactivó la demanda en 2020, generando un repunte en 2021. Las principales empresas están ubicadas en EE. UU., Taiwán, Corea del Sur y China [14].

En 2023, el mercado de teléfonos inteligentes alcanzó los 104 mil millones de dólares y se estima que superará los 146 mil millones de dólares en 2025. Como muestra la Figura 2, el mercado global presenta una tendencia al alza

en segmentos como smartphones, centros de datos, vehículos y dispositivos de consumo. En conjunto, se calcula un incremento aproximado total del 71 % en el valor del mercado entre 2025 y 2030.

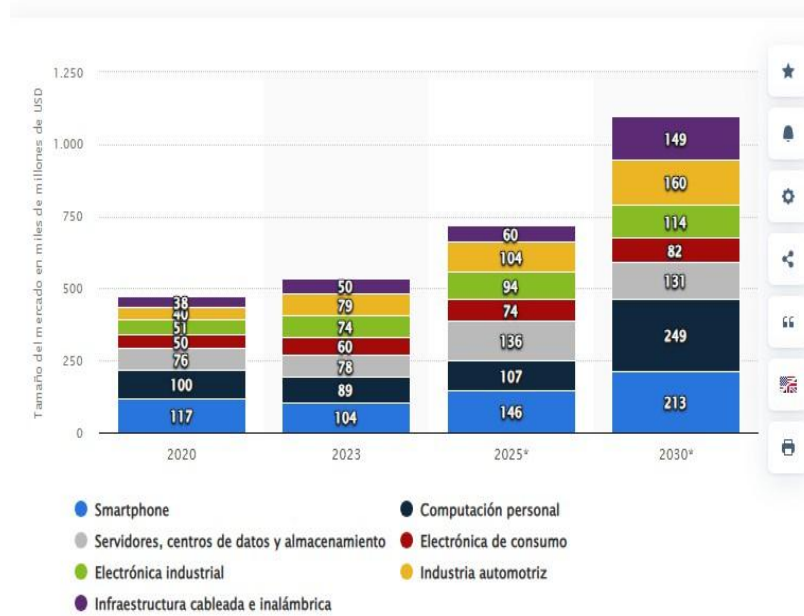


Figura 2. Tamaño del mercado de semiconductores a nivel mundial en 2020 y proyección al 2030, según destino de uso. Fuente: Estatista (2025) [13]

#### 4.2 Cadena de Suministro

Esta cadena se caracteriza por una estructura global, compleja e interdependiente, en la que intervienen actores altamente especializados que requieren el uso de tecnologías avanzadas. Se divide en tres etapas principales (ver Figura 3), La primera etapa se centran en el desarrollo de los chips, la segunda en la fabricación front-end y la tercera en el ensamble back-end. En la

fabricación front-end, se incluye la extracción de minerales críticos (litio, tantalio, cobalto, entre otros), la purificación, el procesamiento químico y la fabricación de obleas de silicio. En la fase back-end; el ensamblaje de obleas, empaquetamiento, pruebas y finalmente, la integración en dispositivos electrónicos que serán distribuidos a nivel internacional [15].



Figura 3. Etapas principales de la cadena global de suministro de semiconductores.  
Fuente: Filippo et al. (2024) [15]

La cadena de suministro global de semiconductores depende de la especialización geográfica, como muestra la Figura 4. Estados Unidos lidera el diseño, Corea del Sur y Taiwán la fabricación, y Malasia o China el ensamblaje y pruebas, lo que refleja una alta interdependencia internacional. Como resultado, ningún país es capaz de controlar la cadena de suministro por completo. En su lugar, se ha conformado una red global de colaboración e interdependencia, fruto de décadas de globalización, avances tecnológicos y decisiones estratégicas en materia de política

industrial. Cada país asume funciones específicas dentro de esta cadena, en la que participan economías clave como Estados Unidos, Corea del Sur, Taiwán, Malasia y China. Esta configuración fomenta una alta interdependencia y colaboración internacional, pero también expone a la cadena a posibles interrupciones derivadas de tensiones comerciales y diplomáticas, así como de factores externos, como se evidenció desde el inicio de la pandemia de COVID-19 [16].

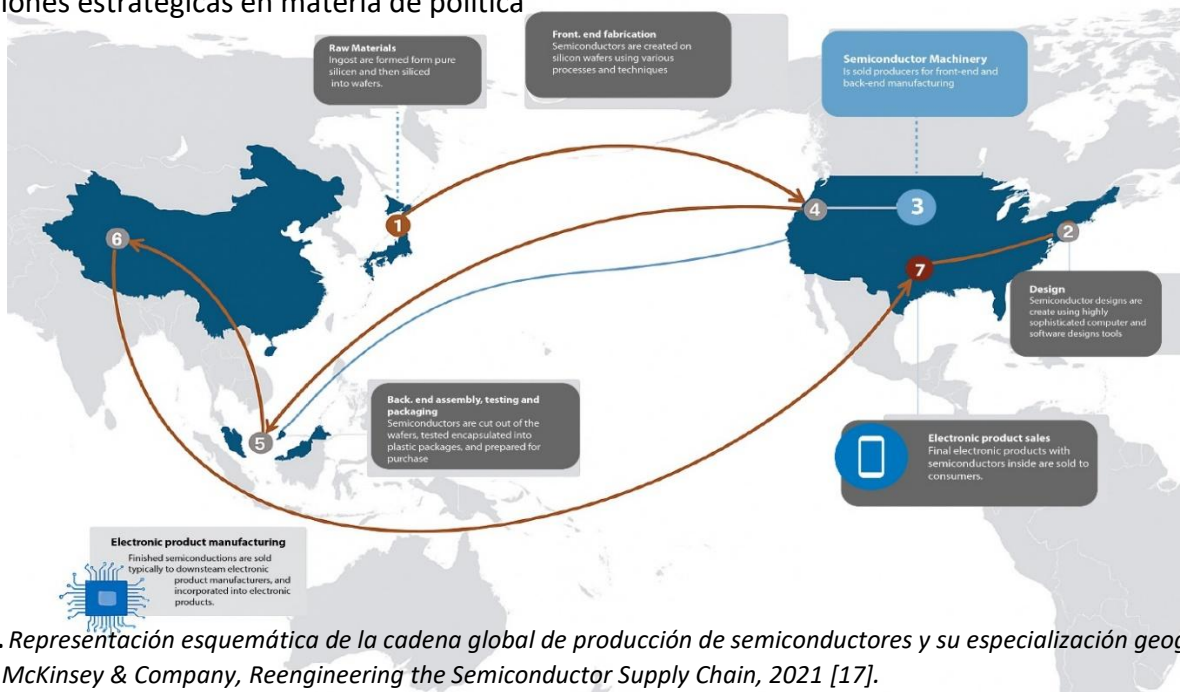


Figura 4. Representación esquemática de la cadena global de producción de semiconductores y su especialización geográfica.  
Fuente: McKinsey & Company, Reengineering the Semiconductor Supply Chain, 2021 [17].

### 4.3 El chip

Los semiconductores son el cuarto producto más comercializado del mundo, tras el petróleo crudo, refinado y los automóviles [19]. Aunque miden entre 5 y 20 mm por lado, su complejidad técnica es notable. Su fabricación, realizada en salas limpias, es altamente precisa y una de las más intensivas en recursos y energía. El proceso inicia con materias primas como silicio, cobre y agua ultrapura. El silicio de grado metalúrgico (Si-GM), base del chip, se obtiene mediante reducción carbotérmica del dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). La producción de silicio requiere hornos de arco eléctrico a más de  $2.000\text{ }^\circ\text{C}$ , con un consumo energético entre 10,8 y 13 kWh por kilogramo, es decir, hasta 13.000 kWh por tonelada [20]. La extracción de cobre se realiza por fundición eléctrica (668,78 kWh/t) o fundición tradicional (58,61 kWh/t) [21]. Estos procesos utilizan químicos altamente tóxicos como triclorosilano ( $\text{HSiCl}_3$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), arsénico (As) y plomo (Pb) [22], generando impactos por explotación de recursos no renovables, contaminación hídrica y emisiones peligrosas [23].

Durante la fabricación de obleas de silicio, se emplean reactivos corrosivos como ácido fluorhídrico, nítrico y amoníaco, además de gases contaminantes como perfluorocarbonos (PFCs), hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), tricloruro

de boro ( $\text{BCl}_3$ ) y fósforo ( $\text{PCl}_3$ ) [23]. El proceso incluye técnicas como la fotolitografía, clave para grabar circuitos integrados de alta densidad y rendimiento.

La producción de semiconductores requiere elevados volúmenes de recursos, especialmente agua ultrapura, energía y materiales no renovables. Fabricar un solo chip puede consumir más de 1.600 litros de agua ultrapura, utilizada para evitar contaminación a escala nanométrica. Dado el riguroso proceso de purificación, se requieren entre 3.200 y 4.800 litros de agua potable o industrial para obtener dicha cantidad, considerando pérdidas y consumo del sistema (Semiconductor Industry Association, 2022). A esto se suma el alto consumo energético: en Taiwán, uno de los principales productores, la industria de semiconductores utiliza aproximadamente el 6 % de la electricidad nacional al año [9], lo que equivale a 15TWh/año.

La Tabla 1 presenta una caracterización cuantitativa de los principales insumos y emisiones generadas en cada etapa del proceso de fabricación de semiconductores. Se incluyen indicadores como el consumo energético, el uso de agua ultrapura y las emisiones asociadas. Los datos permiten observar que la etapa de

fabricación de obleas concentra los mayores requerimientos de energía y agua, lo que la convierte en la etapa más intensiva

ambientalmente del ciclo productivo de los semiconductores.

Tabla 1. Consumo estimado de recursos en cada etapa de la cadena de producción de un chip semiconductor - Intensidad de recursos en la fabricación

Etapa	Consumo energético (kWh)	Agua ultrapura (litros)	Químicos peligrosos (kg)	Metales preciosos (mg)
Extracción de materias primas	50	100	N/A	N/A
Fabricación de obleas	150	200	0.05 (ácido fluorhídrico, nítrico, amoníaco, gases dopantes)	N/A
Producción de circuitos	100	50	0.02 (gases contaminantes)	N/A
Ensamblaje y pruebas	20	10	N/A	5 (oro y plata)
<b>Total, aproximado</b>	<b>320 kWh</b>	<b>360 litros</b>	<b>0.07 kg</b>	<b>5 mg</b>

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Williams et al. (2002) [24] y Deloitte (2023) [25].

La Tabla 2 presenta una estimación de tres indicadores clave de impacto ambiental asociados a la fabricación de semiconductores: aguas residuales, emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>-eq) y partículas en suspensión (PM). Los valores por chip oscilan entre 20 y 30 litros de aguas residuales, 2 y 5 kilogramos de CO<sub>2</sub>-eq, y entre 0,001 y 0,003 kilogramos de PM, reflejando el uso intensivo de recursos hídricos, energéticos y materiales químicos en las tecnologías actuales de producción.

Considerando una capacidad promedio de 500 chips por oblea de 300 mm y una producción anual estimada de 12 millones de obleas —como las reportadas por fabricantes líderes del

sector—, los impactos acumulados proyectados alcanzan entre 120.000 y 180.000 millones de litros de aguas residuales, entre 12 y 30 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente y entre 6.000 y 18.000 toneladas de partículas suspendidas por año. Estas cifras permiten dimensionar los efectos ambientales globales de la industria, en un contexto de creciente demanda tecnológica y transición hacia nodos de fabricación más avanzados.

Si bien los datos no provienen de mediciones experimentales específicas por fabricante, se basan en extrapolaciones consistentes con informes técnicos reconocidos (como Deloitte, 2023) y estudios de ciclo de vida previamente validados. Su utilidad radica en ilustrar el orden

de magnitud de los impactos ambientales acumulativos y servir como base para orientar decisiones estratégicas en políticas de

sostenibilidad, eficiencia operativa y regulación ambiental del sector.

Tabla 2. Residuos generados por unidad de chip semiconductor producido, según tipo de contaminante.

TIPO DE RESIDUO	CANTIDAD ESTIMADA POR CHIP
Agua Residual Contaminada	20–30 litros
Químicos Peligrosos Residuales	0.03–0.05 kg
Gases De Efecto Invernadero (CO <sub>2</sub> Eq.)	2–5 kg CO <sub>2</sub> eq.
Residuos Sólidos Electrónicos	0.002–0.005 kg
Partículas En Suspensión / Polvo Tóxico	0.001–0.003 kg

Fuente: *Elaboración propia con base en Deloitte (2023). [25]*

*Estos valores son aproximados y varían según el tipo de chip, la tecnología de fabricación y las prácticas ambientales de la planta.*

Por otro lado, el ciclo de vida del chip concluye con un desafío ambiental crítico: los residuos electrónicos. Según el Global E-waste Monitor 2020, se proyecta que los residuos electrónicos alcanzarán las 74.7 millones de toneladas métricas para 2030, con una tasa de reciclaje adecuada de solo el 17.4 % [26].

Según The Shift Project, el conjunto de actividades relacionadas con la producción y el uso de tecnologías digitales que incluyen componentes como los semiconductores ya representa el 3 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), con una proyección de duplicarse para 2025 si no se implementan estrategias de mitigación [27].

#### 4.4 Condiciones laborales cadena global de producción

En la dimensión social, la cadena de producción de semiconductores evidencia marcadas desigualdades laborales. En Taiwán que concentra cerca del 60 % de la producción mundial de chips y el 90 % de los más avanzados, los empleados superan las 49 horas semanales y están expuestos a sustancias como ácidos, solventes y gases dopantes, con efectos sobre la salud respiratoria, dermatológica y riesgos cancerígenos [22][26]. Las etapas de fabricación (“fabs”, por su sigla en inglés: fabrication facilities) implican alta exposición a agentes tóxicos, asociándose a síntomas respiratorios en el 71 % de los operarios según el Semiconductor Health Study [22][28]. En Taiwán, un estudio clínico realizado en una planta de semiconductores identificó anomalías pulmonares restrictivas en el 19,1 % de los trabajadores del área de fotolitografía y en el

26,3 % de los de implantación iónica, en comparación con un 0 % en el grupo control, conformado por empleados administrativos varones sin exposición directa a procesos de fabricación [29].

En países del sudeste asiático donde predomina el ensamblaje y prueba de chips como Filipinas, Malasia, Indonesia y, por similitud, Vietnam los salarios diarios de operarios suelen oscilar entre USD 6,70 y 8,60, lo cual resulta insuficiente para cubrir necesidades básicas. Esta precariedad fuerza a muchos trabajadores a vivir en dormitorios compartidos dentro del complejo industrial, con escaso acceso a seguridad social o mecanismos sindicales [30].

#### *4.5 Estado Actual de La Industria Electrónica y de Semiconductores En Colombia*

En Colombia, la industria electrónica se encuentra en etapa incipiente, con predominancia de micro y pequeñas empresas. En Bogotá, uno de los principales polos tecnológicos, el 49 % de las empresas del sector son microempresas y el 37 % pequeñas, según el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Industria Electro-Eléctrica y TIC (CIDEI) [31]. Aunque no existe un registro único, el país cuenta con actores especializados en diseño de hardware, firmware y software, manufactura de placas de circuito impreso (PCB, por su sigla en

inglés), prototipado, ensayos de certificación y formación técnica [31]. Algunas compañías han alcanzado estándares internacionales, pero enfrentan barreras como la débil articulación entre los sectores productivo, académico y estatal. En 2021, el sector representó apenas el 0,78 % de la producción industrial nacional [31].

Un elemento favorable es la disponibilidad de talento humano calificado: se estima que cada año se gradúan cerca de 3.000 ingenieros electrónicos, y más de 20.000 estudiantes están matriculados en programas afines. La mayoría de estos provienen de estratos socioeconómicos 1, 2 y 3, lo que evidencia el alcance de la oferta educativa pública y técnica en las regiones. Sin embargo, la falta de oportunidades laborales propicia la fuga de talento y limita el desarrollo de capacidades tecnológicas en el país [31] [32].

Estructuralmente, la balanza comercial de productos electrónicos es claramente deficitaria: Según datos del DANE, en 2023 Colombia importó bienes por un total de USD 62.800 millones, incluidos equipos eléctricos y electrónicos, mientras que las exportaciones especializadas del sector fueron significativamente menores, contribuyendo a un déficit comercial aproximado de USD 13.300 millones [33].

En 2024, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) contó con un presupuesto de aproximadamente COP 4,7 billones, del cual ejecutó cerca del 88 %, ubicándose como la segunda cartera con mayor grado de ejecución del país. A nivel del Presupuesto General de la Nación, la ejecución acumulada fue del 60,3 % a agosto 2024, lo que ilustra el dinamismo relativo del MinTIC, pero también evidencia que sus recursos se centraron en proyectos como conectividad, educación digital e inteligencia artificial, sin un enfoque concreto en infraestructura productiva electrónica o de semiconductores [34][35].

#### *4.6 Proyecto de Ley No. 047 de 2024*

El Proyecto de Ley 047 de 2024 Senado / 388 de 2024 Cámara, titulado “Por la cual se fomenta la industria electrónica y de semiconductores en Colombia” [10], fue radicado el 26 de julio de 2024 por el senador David Luna Sánchez junto con otros congresistas del Senado y la Cámara de Representantes. Este proyecto cuenta con el respaldo de los senadores Julio Alberto Elías Vidal, Soledad Tamayo Tamayo, Esteban Quintero Cardona, Ana María Castañeda Gómez y Guido Echeverri Piedrahita; así como de los representantes a la Cámara Ingrid Marlen Sogamoso Alfonso, Hernando González, Julián

David López Tenorio, Alejandro García Ríos y Daniel Carvalho Mejía.

Su objetivo principal es crear las condiciones que favorezcan el crecimiento de este sector, considerado estratégico para la economía nacional.

El proyecto contiene cinco títulos y un total de 23 artículos, distribuidos de la siguiente manera [10]:

- Disposiciones generales (Art. 1-4): define objeto, principios, ámbito y fines de la ley (Título I)

El proyecto considera, sin mayores detalles,

Estrategias para el desarrollo de la industria (Art. 5-10): describe incentivos, instrumentos financieros, articulación con el sector productivo y educativo (Título II), la gestión institucional (Art. 11-14): establece órganos responsables y funciones (Título III) y un régimen de transición (Art. 15-18) que plantea la gradualidad en la implementación (Título IV).

Entre sus principales objetivos están: fortalecer las empresas del sector, reducir la dependencia de tecnología importada, atraer inversión tanto nacional como extranjera, y formar personal capacitado en áreas clave como inteligencia artificial y tecnologías conectadas. También propone crear laboratorios de prueba que aseguren la calidad de los productos fabricados en

el país, facilitando su ingreso a mercados internacionales [10].

El proyecto no se enfoca únicamente en fabricar semiconductores, sino en construir todo un ecosistema: desde investigación y desarrollo, hasta la producción de componentes avanzados, la formación técnica y el desarrollo de infraestructura moderna.

El Senado aprobó este proyecto en primer debate el 13 de noviembre de 2024. Entre las medidas destacadas se encuentran el reconocimiento del sector como prioritario, la creación de programas de apoyo a empresas innovadoras, la agilización de trámites aduaneros, becas para estudios en ingeniería electrónica y el respaldo estatal para posicionar empresas colombianas en el mercado global [36].

Aspectos que no contempla el Proyecto de Ley 047 de 2024:

- Asignación presupuestaria específica:

El proyecto no define montos concretos de inversión ni una fuente presupuestal clara para su implementación. Tampoco establece un rubro dentro del Presupuesto General de la Nación ni una destinación específica por parte del MinTIC, el Ministerio de Comercio, o MinHacienda.

- Mecanismos de seguimiento, evaluación y control: Aunque asigna funciones institucionales, no crea un sistema claro de

indicadores de desempeño, ni contempla mecanismos de evaluación periódica de los impactos económicos, sociales o ambientales del fomento a la industria.

- Política ambiental o de sostenibilidad:

El texto no incorpora criterios ambientales, ni medidas relacionadas con la gestión de residuos electrónicos, eficiencia energética o la sostenibilidad del ecosistema de semiconductores. Esta omisión es especialmente crítica dada la alta huella hídrica y energética del sector.

Actualmente, el proyecto sigue en trámite legislativo y aún debe superar tres debates más antes de convertirse en ley.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSION**

Tello plantea que a lo largo de la historia se han presentado diversas crisis en las relaciones sociedad–naturaleza, provocadas tanto por presiones ambientales que degradaron su base de recursos, como por variaciones del medio ambiente, o ambas a la vez; sin embargo, su alcance fue local o regional [37]. En contraste, la humanidad se enfrenta actualmente por primera vez, a un cambio ambiental global causado por el crecimiento económico, el desarrollo tecnológico, los patrones de consumo y las formas de

ocupación territorial. El caso en estudio se enmarca claramente en esta situación. La industria electrónica y de semiconductores es una de las primeras industrias en el mundo, la cual representa grandes inversiones de capital, tensiones geoestratégicas y una enorme huella ecológica.

En primer lugar, llama poderosamente la atención que, en la formulación del Proyecto de Ley ninguna de estas consideraciones se hayan tenido en cuenta. Al comparar la situación de Colombia

con los países líderes en la industria de semiconductores, se evidencian brechas significativas en desarrollo tecnológico, infraestructura, formación de talento e inversión. Mientras economías como Estados Unidos, Corea del Sur o Taiwán cuentan con ecosistemas maduros y consolidados, Colombia cuenta con una industria incipiente.

En la tabla 3 se resaltan las principales brechas existentes al comparar la industria local y la mundial.

Tabla 3: Brechas entre Colombia y países líderes en la industria de semiconductores

Indicador	Colombia	Países líderes (Asia/EE. UU.)
Capacidad instalada de fabricación	Nula para semiconductores; incipiente en ensamble	Fabs avanzadas (TSMC, Samsung, Intel)
Inversión en I+D (% del PIB, 2022)	0.29%	> 2.5% (Corea del Sur 4.8%)
Formación especializada en microelectrónica	Baja; limitada a pocos programas académicos	Universidades con centros de excelencia e innovación aplicada
Producción de dispositivos	Ensamble de componentes; no se fabrican chips	Desde diseño hasta empaquetado de chips de última generación
Impacto ecológico evaluado	Sin sistemas de economía circular implementados en la industria	Sistemas cerrados de reciclaje y eficiencia energética

Fuente: Elaboración propia con base en [3], [4], [5], [10], [14], [15], [17], [31], [32], [34], [36].

El comparativo entre Colombia y los países líderes en la industria de semiconductores permite evidenciar las brechas estructurales en aspectos clave como infraestructura productiva, inversión en investigación y desarrollo, formación especializada, capacidad tecnológica e impacto ambiental. Esta comparación resulta útil para dimensionar el rezago del país frente a estándares

internacionales, identificar áreas críticas de mejora y orientar decisiones de política pública, inversión estratégica y planificación educativa. Además, proporciona una base objetiva para justificar la necesidad de fortalecer el ecosistema nacional de semiconductores mediante acciones integrales y coordinadas.

A primera vista, y a la luz de las motivaciones del Proyecto de Ley, estas brechas no serían impedimento para que Colombia entrara a competir en los mercados internacionales. De hecho, el mercado latinoamericano de semiconductores representa una oportunidad significativa: se estima que alcanzará ingresos por USD 88.400 millones en 2025, de los cuales USD 32.390 millones corresponderían a Sudamérica, según proyecciones de Statista [38].

### 5.1 Construcción del modelo bajo enfoque de flujos y stocks

Como parte del enfoque mixto adoptado en esta investigación, se construyó un modelo cuantitativo con base en principios de ecología

industrial y dinámica de sistemas, orientado a simular los impactos acumulados del desarrollo del sector de semiconductores en Colombia. El modelo articula variables como inversión pública, capacidad instalada de producción, consumo de agua ultrapura, energía eléctrica, emisiones de CO<sub>2</sub> y generación de empleo directo, bajo supuestos técnicos compatibles con plantas maduras ( $\geq 65$  nm) y un horizonte de implementación entre 2025 y 2030. Su propósito es estimar de forma sistémica los efectos ecológicos y sociales asociados al crecimiento proyectado del sector, a partir de coeficientes técnicos derivados de estudios de ciclo de vida industrial y conforme a los lineamientos generales del Proyecto de Ley No. 047 de 2024.

Tabla 4: Datos Base Como Premisas Del Modelo

Premisa técnica		Valor usado en el modelo	Fuente / Justificación
1	Inversión inicial pública (2025)	<b>USD 37,5 millones</b>	Presupuesto TIC nacional estimado en 2025: COP 1,5 billones $\approx$ USD 375 millones (tasa cambio promedio 2025 = COP 4.000/USD). Porcentaje razonable para una iniciativa estratégica (piloto + clúster inicial) sería entre 8 % y 12 % del presupuesto TIC [34] Se toma el 10 % del presupuesto
2	Costo de capacidad instalada por chip/año	<b>USD 12 / chip</b>	SIA, McKinsey – plantas maduras ( $\geq 65$ nm) [14], [39].
3	Capacidad instalada proyectada (2025)	<b>3.125.000 chips/año</b>	Derivada de la inversión inicial: 37,5M / 12. Cálculo directo del modelo.
4	Coficiente técnico de inversión	<b>83.333 chips/año por millón de USD</b>	1.000.000 / 12 Plantas maduras en nodos $\geq 65$ nm con costos totales entre USD 1.5–3 mil millones por cada USD 1 millón invertido

			agrega aproximadamente 83 333 chips/año de capacidad [14].
5	Tasa de crecimiento endógeno (sistema)	<b>30 % anual</b>	Supuesto de desarrollo sostenido basado en experiencias como las de Costa Rica (con Intel), Vietnam o Malasia muestran que, al iniciar desde cero, las capacidades pueden duplicarse cada 2–3 años, lo que corresponde a un crecimiento compuesto anual (CAGR) de entre 25 % y 35 %. [15] [40]*.
6	Inversión adicional anual sostenida	<b>USD 10 millones por año</b>	Política pública o cofinanciación privada. en Dinámica de Sistemas se simulan comportamientos en el tiempo. Y en un sistema real, no basta con una inversión inicial única, con el fin de reflejar un compromiso continuo del Estado con la expansión de capacidad productiva [10], [8].
7	Tiempo simulado	<b>2025 a 2030</b>	Marco temporal de implementación de la ley [10].

Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones del presupuesto TIC nacional (MinTIC, 2025), informes de McKinsey & Company sobre costos de plantas maduras ( $\geq 65$  nm) [14], [39], literatura de experiencias comparadas en países emergentes (Vietnam, Costa Rica, Malasia) [15], [40], y fundamentos de modelación dinámica de sistemas aplicados a inversión pública sostenida [8], [10].

\* La elección de una tasa de crecimiento endógeno del 30 % anual se fundamenta en la experiencia de Costa Rica, cuyo desarrollo en la industria de semiconductores se inició con la instalación de la planta de Intel en 1997. Al igual que Colombia, Costa Rica es una economía de ingreso medio que ha apostado por zonas francas, incentivos fiscales y un sistema educativo mixto orientado a la formación técnica en ingeniería y tecnologías de la información. Ambas naciones comparten retos estructurales similares, como la dependencia de inversión extranjera directa (IED), la necesidad de diversificar su base exportadora y una institucionalidad relativamente estable. Gracias a una articulación efectiva entre Estado, academia e industria, Costa Rica logró duplicar su capacidad productiva cada 2–3 años, alcanzando un crecimiento compuesto anual (CAGR) del 30 %, partiendo de una infraestructura incipiente. Estas condiciones resultan comparables a las de Colombia, donde un marco regulatorio atractivo, programas de formación alineados con la demanda del sector y una estrategia nacional de atracción de IED podrían permitir una expansión equivalente en el horizonte 2025–2030.

A partir de estas premisas, se diseñó un modelo conceptual bajo el enfoque de flujos y stocks, que permite representar de forma estructurada la dinámica interna del sistema proyectado para el desarrollo de la industria de semiconductores en Colombia. El objetivo del modelo no es únicamente cuantificar resultados, sino también visualizar los encadenamientos causales entre las decisiones de inversión y sus efectos acumulativos en dimensiones ecológicas y sociales.

La Figura 5 presenta una síntesis visual del sistema simulado, que integra los flujos de capital (inversión inicial y anual), el crecimiento progresivo de la capacidad instalada y los impactos asociados al proceso de fabricación de chips. Estos impactos se expresan mediante indicadores clave como consumo de agua ultrapura, demanda energética, emisiones de CO<sub>2</sub>, generación de RAEE y empleos directos. Aunque el componente de RAEE está representado estructuralmente, no fue cuantificado por falta de un coeficiente específico.

Esta representación permite identificar puntos críticos de intervención, relaciones causales y recursos estratégicos que deben gestionarse para

avanzar hacia una industria de semiconductores sostenible y competitiva en Colombia durante el periodo 2025–2030.

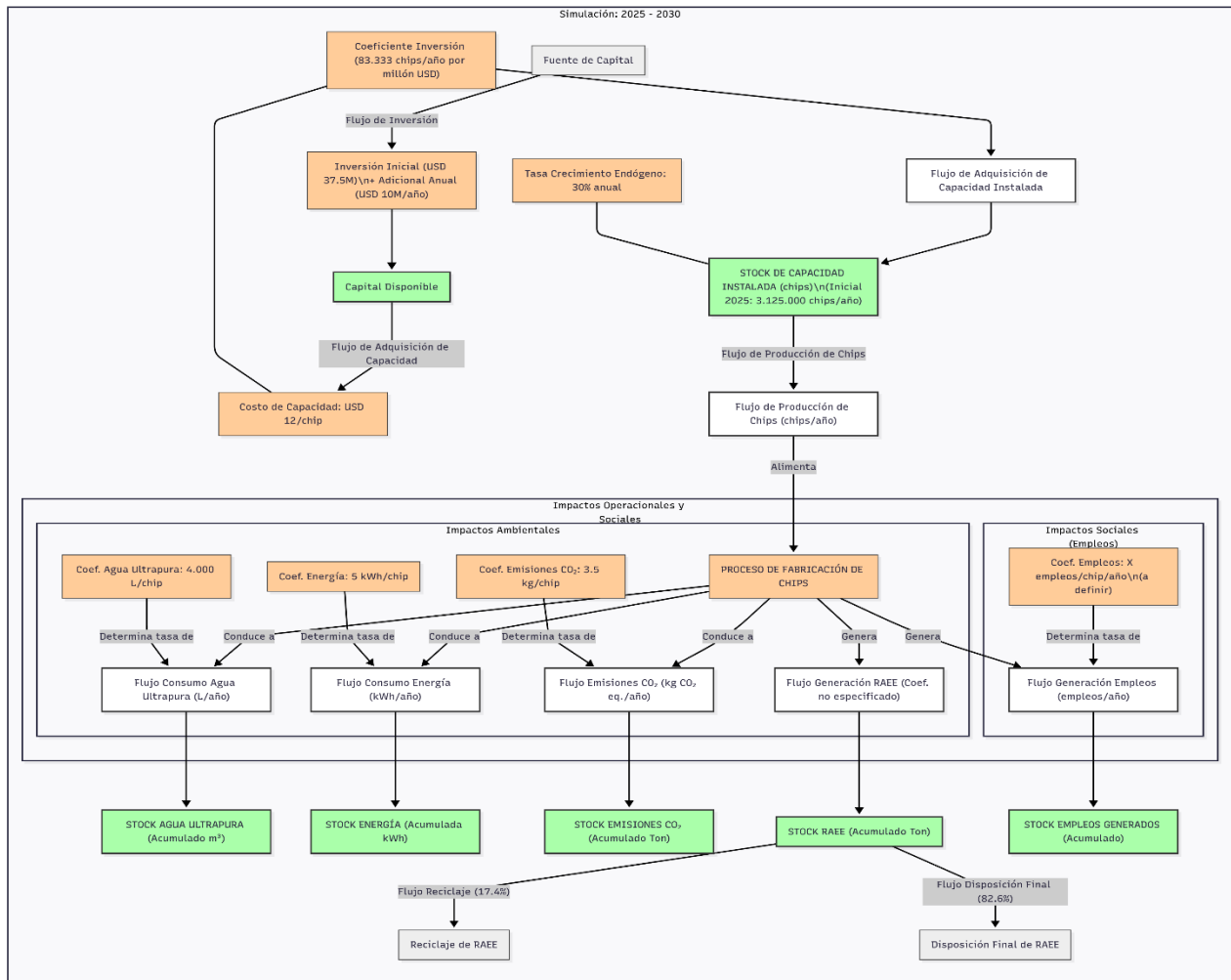


Figura 5. Diagrama de flujos y stocks del sistema proyectado para la industria de semiconductores en Colombia (2025–2030), modelado con base en dinámica de sistemas.

Fuente: Elaboración propia con base en el Proyecto de Ley No. 047 de 2024 [10], SIA [39], McKinsey & Company [14], y visualización construida mediante Mermaid Chart [43].

El diagrama presentado en la Figura 5 constituye la estructura central de la simulación desarrollada. Cada flujo e interacción representado en el modelo fue traducido a parámetros cuantitativos, definidos a partir de las premisas técnicas detalladas en la Tabla 4. A

partir de este diseño, se calcularon los stocks acumulativos de capacidad instalada, consumo de agua ultrapura, consumo energético, emisiones de CO<sub>2</sub> y generación de empleo directo para el periodo 2025–2030. Estos resultados se derivan del flujo de producción de

chips, al que se aplicaron coeficientes técnicos estándar: 4.000 litros de agua, 5 kWh de energía y 3,5 kg de CO<sub>2</sub> por chip producido, así como un empleo directo generado por cada 200 chips fabricados. Los valores presentados a continuación constituyen la proyección cuantitativa resultante de este modelo.

## 5.2 Producción proyectada de chips

Con base en las premisas técnicas establecidas, se realizó una simulación dinámica utilizando la herramienta Insight Maker, mediante un modelo de flujos y stocks diseñado específicamente para este estudio. La simulación consideró una inversión inicial pública de USD 37,5 millones en 2025, junto con una inversión adicional sostenida de USD 10 millones anuales, bajo una tasa de crecimiento del 30 % anual. Se utilizó un coeficiente técnico de USD 12 por chip/año, estimado a partir de referencias industriales para procesos tecnológicos maduros ( $\geq 65$  nm) [10], [14], [39].

El resultado es una proyección acumulada de capacidad instalada de producción de chips en Colombia, mostrada en la Tabla 5.

Tabla 5. Proyección acumulada de capacidad instalada de producción de chips (2025–2030)

Año	Capacidad instalada (chips/año)
2025	3.125.000
2026	3.958.333
2027	5.041.667
2028	6.450.000
2029	8.280.833
2030	10.660.917

Nota: Esta proyección parte de un crecimiento sostenido de la inversión pública y depende de la eficiencia tecnológica y la disponibilidad de infraestructura industrial.

Fuente: Elaboración propia con base en simulación desarrollada en Insight Maker [44], utilizando parámetros técnicos derivados del Proyecto de Ley No. 047 de 2024 [10], McKinsey & Company (2020) [14] y la Semiconductor Industry Association [39].

## 5.3 Impactos ecológicos y sociales derivados de la simulación

La proyección anual de capacidad instalada permite estimar los impactos ambientales y sociales asociados a la producción de chips en Colombia, mediante la aplicación de coeficientes técnicos ampliamente utilizados en estudios de ciclo de vida y evaluación ambiental de plantas con tecnología madura ( $\geq 65$  nm). Estos coeficientes se aplican sobre el flujo acumulado de producción para el periodo 2025–2030, y son los siguientes: Agua ultrapura:

### 4.000 L/chip

- Energía eléctrica: **5 kWh/chip**
- Emisiones de CO<sub>2</sub>: **3,5 kg/chip**

- Empleo directo: **1 persona cada 200 chips**

Estos valores permiten cuantificar los impactos acumulados en dimensiones críticas de sostenibilidad: recurso hídrico, huella energética, emisiones de gases de efecto

invernadero y generación de empleo en función del crecimiento proyectado del sector. Las cifras derivadas constituyen una aproximación útil para evaluar escenarios de expansión industrial desde una perspectiva ecológica y social.

#### 5.4 Impactos ambientales acumulados

Tabla 6. Consumo acumulado de agua, energía y emisiones de CO<sub>2</sub> por producción de chips (2025–2030).

Año	Agua ultrapura (millones L)	Energía (millones kWh)	Emisiones CO <sub>2</sub> (toneladas)
2025	12.500	15,625	10.937
2026	15.833	19.792	13.854
2027	20.167	25.208	17.646
2028	25.800	32.250	22.575
2029	33.123	41.404	29.983
2030	42.644	53.305	38.314

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación dinámica desarrollada en Insight Maker [44], con base en datos técnicos de SIA [39], McKinsey & Company [14], Intel [41], TSMC [42] y el Proyecto de Ley No. 047 de 2024 [10].

El resultado proyectado en cuanto al consumo de agua ultrapura evidencia una presión significativa sobre los recursos hídricos, especialmente considerando que la fabricación de semiconductores requiere aproximadamente 4.000 litros por chip producido. Esta demanda puede representar un riesgo relevante para

regiones del país que ya enfrentan condiciones de estrés hídrico. De acuerdo con el IDEAM (2022), varias zonas de Colombia presentan disponibilidad crítica de agua, lo cual refuerza la necesidad de incorporar este aspecto en la planificación industrial y en la evaluación de sostenibilidad del sector.

## 5.5 Impacto Social: Empleo directo

Tabla 7. Proyección de empleo directo generado por la industria de semiconductores (2025–2030)

Año	Empleo directo (personas)
2025	15.625
2026	19.792
2027	25.208
2028	32.250
2029	41.404
2030	53.305

Fuente: Elaboración propia con base en simulación en Insight Maker [44], aplicando coeficientes técnicos de empleo reportados por McKinsey & Company [14], SIA [39] y estudios industriales de plantas maduras.

El empleo directo se estimó a partir de un coeficiente técnico de productividad que considera la generación de un puesto de trabajo por cada 200 chips producidos anualmente. Este valor se basa en estimaciones operativas típicas de instalaciones industriales, en las que se requiere personal para operación, mantenimiento, logística y control de calidad. Bajo esta premisa, y en correspondencia con el crecimiento proyectado de la capacidad instalada, se estima un incremento sostenido en el empleo directo, desde 15.625 personas en 2025 hasta más de 53.000 en 2030. En el contexto colombiano, estas cifras permiten dimensionar la magnitud del potencial efecto

multiplicador en el mercado laboral que tendría una expansión controlada del sector de semiconductores. El dato no solo refleja una posibilidad de absorción de mano de obra calificada y técnica, sino que también sirve como insumo clave para estimar necesidades de formación profesional, adecuación institucional y planificación territorial en zonas donde eventualmente se localicen estos centros de producción. Asimismo, el crecimiento proyectado del empleo funciona como un indicador útil para evaluar la viabilidad social del sector en relación con políticas públicas de desarrollo productivo.

Tabla 8. Resultados consolidados del modelo de simulación para variables clave (2025–2030)

Año	Producción (chips/año)	Agua ultrapura (millones L)	Energía (millones kWh)	Emisiones de CO <sub>2</sub> (toneladas)	Empleo directo (personas)
2025	3.125.000	12,500	15,625	10.937	15.625
2026	3.958.333	15,833	19,792	13.854	19.791
2027	5.041.667	20.167	25.208	17.646	25.208
2028	6.450.000	25.800	32.250	22.575	32.250
2029	8.280.833	33.123	41.404	29.983	41.404
2030	10.660.917	42.644	53.305	38.314	53.305

Fuente: Elaboración propia con base en simulación realizada en Insight Maker [44], aplicando coeficientes técnicos de agua, energía, emisiones y empleo derivados de SIA [39], McKinsey & Company [14], Intel [41], TSMC [42] y el Proyecto de Ley No. 047 de 2024 [10].

Los resultados obtenidos a partir del modelo de simulación basado en dinámica de sistemas permiten evidenciar que el crecimiento proyectado para la industria nacional de semiconductores en Colombia, aunque viable desde un enfoque técnico inicial, plantea serias tensiones ecológicas, sociales, económicas, institucionales y políticas que no han sido suficientemente consideradas en el diseño del Proyecto de Ley No. 047 de 2024 [10].

Desde una perspectiva ambiental, el consumo de agua ultrapura estimado para 2030 supera los 42.000 millones de litros, en un país donde el 21 % de los municipios ya enfrenta riesgo de desabastecimiento hídrico durante temporadas secas, según el IDEAM [45]. Esta presión sobre el

recurso hídrico es especialmente preocupante, ya que la industria de semiconductores compite por agua con sectores vitales como la agricultura, el abastecimiento humano y los ecosistemas estratégicos. A ello se suma un riesgo crítico asociado a la calidad del agua residual: los procesos de fabricación utilizan compuestos químicos altamente contaminantes —como disolventes, ácidos, metales pesados y agentes grabadores— que pueden comprometer los cuerpos hídricos receptores si no se cuenta con sistemas avanzados de tratamiento y reúso. La ausencia de lineamientos sobre localización, tecnologías de control de vertimientos o planes de compensación hídrica eleva el riesgo de

conflictos socioambientales, particularmente en regiones vulnerables como el Caribe seco o los valles interandinos [45].

En materia energética, se proyecta que la industria demandará más de 53 millones de kilovatios-hora (kWh) anuales para 2030, lo que representa un incremento superior al 240 % respecto a 2025. Este aumento supone un desafío significativo para un sistema eléctrico nacional que depende en un 63 % de fuentes hidroeléctricas, altamente sensibles a eventos extremos asociados al cambio climático [46]. La situación se agrava debido a la incapacidad actual de las energías renovables no convencionales (solar, eólica y biomasa) para abastecer procesos industriales de alta demanda y operación continua como los de semiconductores. Estas fuentes, si bien estratégicas para la transición energética, presentan limitaciones técnicas de escala, intermitencia y almacenamiento, que impiden suplir de forma estable y suficiente la demanda proyectada. Esto genera un riesgo de presión adicional sobre la red eléctrica nacional y un probable incremento en las emisiones indirectas si se recurre a fuentes térmicas o importaciones de energía [47].

Simultáneamente, las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) derivadas de la producción de chips superarían las 38.000 toneladas anuales

para 2030, una cifra que pone en entredicho el cumplimiento de la Contribución Nacional Determinada (NDC, por sus siglas en inglés), mediante la cual Colombia se comprometió a reducir en un 51 % sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al año 2030. Dado que el Proyecto de Ley No. 047 de 2024 no contempla mecanismos de limitación, compensación ni mitigación de este impacto climático —ni fija metas de eficiencia energética ni requisitos de uso de energía limpia—, se corre el riesgo de promover un modelo industrial que, lejos de apoyar la transición energética del país, termine profundizando la dependencia de fuentes fósiles y comprometiendo los objetivos nacionales de descarbonización.

*En lo social*, el modelo proyecta la generación de más de 15.000 empleos directos en 2025 y más de 53.000 para el año 2030, como resultado del crecimiento de la capacidad instalada de producción de semiconductores. Aunque esta cifra representa apenas el 0,21 % de la población económicamente activa (PEA) —estimada en 25,9 millones de personas—, su impacto puede ser relevante si se trata de empleo calificado y formal, en un país donde más del 57 % de la fuerza laboral trabaja en condiciones de informalidad.

No obstante, esta posible ganancia social debe leerse con cautela. A nivel internacional, la

industria de semiconductores ha sido duramente cuestionada por sus condiciones laborales intensivas, repetitivas y extenuantes, especialmente en países asiáticos. Los trabajadores suelen enfrentar turnos de hasta 12 horas diarias, jornadas extendidas sin descansos adecuados, y en muchos casos trabajan semanas completas sin fines de semana libres. Además, viven hacinados en dormitorios dentro de los mismos complejos industriales, con acceso limitado a salud ocupacional, tiempo libre y mecanismos de protección laboral. Estas condiciones, lejos de representar una “industria del futuro”, reproducen formas modernas de explotación industrial donde el rendimiento económico prima sobre el bienestar humano.

Colombia, en cambio, avanza en sentido contrario. Con la entrada en vigor de la reducción progresiva de la jornada laboral de 48 a 42 horas semanales (Ley 2101 de 2021), el país se orienta hacia una jornada máxima legal de 8,4 horas diarias, distribuidas en cinco días. A esto se suma la reforma laboral aprobada en 2024, que fortalece la contratación formal, la protección del trabajo decente y los derechos colectivos. En este contexto, pretender competir internacionalmente bajo las mismas reglas de una industria que prospera sobre el desgaste humano no solo resultaría impensable, sino éticamente inadmisibles. Si el crecimiento del

sector no se alinea con estos principios, existe el riesgo de consolidar una industria tecnológicamente moderna, pero socialmente regresiva.

*Desde una perspectiva fiscal*, el proyecto propone una inversión pública inicial de USD 37,5 millones (equivalente al 10 % del presupuesto del Ministerio TIC en 2025), complementada con aportes anuales de USD 10 millones hasta 2030. Aunque esta asignación resulta significativa en el contexto colombiano, es marginal frente al volumen de recursos que destinan las grandes potencias tecnológicas al mismo sector. En Estados Unidos, el CHIPS and Science Act asigna más de USD 52.000 millones a subsidios, investigación y formación especializada [48], mientras que Corea del Sur ha comprometido más de USD 450.000 millones para el periodo 2021–2030 como parte de su estrategia nacional de semiconductores [49].

La desproporción estructural es evidente al comparar las dimensiones económicas de estos países. Mientras Colombia tiene un PIB aproximado de USD 330.000 millones, Estados Unidos supera los USD 27 billones y Corea del Sur alcanza cerca de USD 1,8 billones [50][51]. Estas diferencias abismales condicionan la capacidad real de inversión pública y revelan que la escala del esfuerzo colombiano es

simbólica frente a la magnitud de los desafíos del sector.

Esta realidad financiera plantea inquietudes en el ámbito local, regional y global, debido a los límites estructurales que enfrenta el país, lo cual podría derivar en una creciente dependencia de inversión extranjera directa para dinamizar el sector, comprometiendo su autonomía tecnológica, independencia estratégica y soberanía económica.

Desde una perspectiva política, la formulación del proyecto no incorporó procesos de consulta multisectorial ni se articuló con los instrumentos de planificación ambiental ni con las estrategias nacionales de transición energética. Esta desconexión pone en evidencia un enfoque institucional centrado en variables técnicas y presupuestales, sin integrar principios de sostenibilidad intersectorial ni mecanismos efectivos de participación democrática. La toma de decisiones se limitó a círculos técnicos cerrados, sin vinculación con autoridades ambientales, actores territoriales o comunidades locales, lo que restringe la legitimidad del proyecto y su capacidad de generar consensos sociales duraderos.

Además, esta ausencia de articulación contradice los mandatos de la Ley 152 de 1994 (Ley Orgánica del Plan de Desarrollo), que

establece la planificación participativa y la coordinación territorial, así como de la Ley 1931 de 2018, que exige transversalizar la gestión del cambio climático en todas las políticas públicas. Al margen de estos marcos, el proyecto se presenta como una iniciativa desconectada de las prioridades ambientales y sociales del país, lo que compromete su alineación con los objetivos nacionales de desarrollo sostenible, debilita la coherencia interinstitucional y reduce su viabilidad política a mediano plazo.

## **6. CONCLUSION**

La simulación de escenarios y el análisis cuantitativo aplicado en este estudio resultaron herramientas útiles para identificar con mayor claridad los impactos y las tensiones que implica proyectar una industria de semiconductores en Colombia. A través del uso de coeficientes técnicos y premisas propias de la ecología industrial, fue posible estimar consumos de agua, demanda energética, emisiones de CO<sub>2</sub> y generación de empleo, así como contrastar estos resultados con las capacidades reales del país. Los datos obtenidos permitieron dimensionar brechas estructurales entre las aspiraciones del Proyecto de Ley y los límites técnicos, ambientales, financieros e institucionales que enfrenta Colombia en este sector. Estos hallazgos, lejos de limitarse a un ejercicio numérico, ofrecieron una base

concreta para reflexionar sobre la viabilidad, coherencia y sostenibilidad del modelo propuesto.

Proyectar una industria nacional de semiconductores en Colombia exige mucho más que voluntad política o inspiración tecnológica. Requiere examinar con profundidad las condiciones reales del país frente a las exigencias globales del sector. Este análisis permitió dimensionar las brechas existentes entre las aspiraciones de política industrial y las capacidades técnicas, institucionales, ambientales y financieras con las que actualmente se cuenta. Al comparar escenarios, estimar impactos y contrastar referencias internacionales, fue posible identificar con mayor claridad el grado de preparación y posicionamiento estructural del país, así como los factores que hoy obstaculizan una inserción viable y sostenible en esta industria.

Los resultados evidencian que, bajo el modelo propuesto por el Proyecto de Ley 047 de 2024, la implementación de una industria de semiconductores en el país no solo es incierta, sino inviable en el corto y mediano plazo. La falta de planificación estructurada, metas cuantificables, mecanismos claros de financiación, integración ambiental y marcos regulatorios sólidos con enfoque ESG (ambiental, social y de gobernanza) limita su

legitimidad y dificulta el acceso a inversiones responsables desde el punto de vista climático, social y financiero. Además, la desconexión con planes de transición energética, ordenamiento territorial y formación técnica compromete la articulación necesaria entre industria, ciencia y sociedad.

Sin embargo, esta mirada también abre posibilidades. Avanzar no significa imitar modelos de países con condiciones radicalmente distintas, sino construir un camino propio. Un modelo gradual, territorialmente inteligente, basado en innovación local, economía circular y desarrollo de capacidades endógenas puede representar una alternativa realista. Para ello, es fundamental vincular el diseño de procesos con tecnologías limpias, establecer indicadores específicos de sostenibilidad y fortalecer la gobernanza ambiental e intersectorial desde una visión de largo plazo.

Colombia aún tiene la oportunidad de decidir cómo quiere insertarse en la economía tecnológica global: si como ensamblador subordinado o como país que transforma su realidad con criterio, inteligencia colectiva y respeto por sus límites ecológicos. Elegir un modelo industrial sostenible no es solo una opción técnica; es una decisión ética, política y generacional. Esa decisión, sin embargo, no

puede seguir postergándose ni improvisándose entre ciclos de gobierno. Requiere coherencia, continuidad institucional y una visión de Estado capaz de priorizar el interés público sobre la

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] F. Business Insights, Semiconductor Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, <https://www.fortunebusinessinsights.com/semiconductor-market-102365>, 2023.

[2] Y. J. Mii, Semiconductor Industry Outlook and New Technology Frontiers, CONF IEEE Int. Electron Devices Meet. (IEDM), 2024, 1–6.

[3] U. N. University, The Global E-waste Monitor, <https://www.globalewaste.org/reports/global-e-waste-monitor-2024/>, 2024.

[4] B. Consulting Group, Transparency, Ambition and Collaboration: Advancing the Climate Agenda of the Semiconductor Value Chain, <https://discover.semi.org/rs/320-QBB-055/images/Transparency-Ambition-and-Collaboration-BCG-SEMI-SCC-20230919.pdf>, 2023.

[5] M. Lujan, Simbiosis Industrial: el camino hacia la economía circular, <https://innovaromir.com/simbiosis-industrial-camino-economia-circular/>, 2025.

[6] M. Giampietro, The Metabolic Pattern of Societies: Where Economists Fall Short, 1.<sup>a</sup> ed., Routledge, 2004.

urgencia electoral. Solo así será posible construir un futuro industrial que no contradiga, sino que fortalezca, la sostenibilidad y la democracia.

[7] J. Guinée, Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards, 1.<sup>a</sup> ed., Springer, 2002.

[8] J. D. Sterman, Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World, 1.<sup>a</sup> ed., McGraw-Hill, 2000.

[9] M. Fischer-Kowalski y H. Haberl, "Metabolism and colonization: Modes of production and the physical exchange between societies and nature", Int. J. Polit. Econ., 35 (2006) 10–27.

[10] Congreso de la Republica Colombia, Proyecto de Ley N.º 047 de 2024: Por la cual se fomenta la industria electrónica y de semiconductores en Colombia, Senado de la República, <https://senado.gov.co/>, 2024.

[11] Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Resolución 0851 de 2022, Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible sobre la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y se dictan otras disposiciones*, <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/08/Resolucion-851-de-2022.pdf>, 2022.

- [12] L. Aven, Quantitative risk assessment: Probabilistic models and representations of uncertainty, *J. Risk Res.*, 25, (2022), 1271–1287.
- [13] Statista, Semiconductor companies market share, <https://www.statista.com/statistics/266143/global-market-share-of-leading-semiconductor-vendors/>, 2025.
- [14] McKinsey & Company, Semiconductor design and manufacturing: Achieving leading-edge capabilities, <https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/semiconductor-design-and-manufacturing-achieving-leading-edge-capabilities>, 2020.
- [15] A. Filippo, C. Guaipatin, L. Navarro, F. Wyss, Cadena de valor de semiconductores: estructura y perspectivas de cara al nuevo escenario global, Monografía del BID, N° 1016, 2024.
- [16] M. Zeng, Global semiconductor supply chains and geopolitical risks, *Technol. Forecast. Soc. Change*, 183, (2022), 121905–121912.
- [17] McKinsey & Company, Reengineering the Semiconductor Supply Chain, <https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/reengineering-the-semiconductor-supply-chain>, 2021.
- [18] D. Wei y G. Chen, Semiconductor industry growth and supply chain vulnerability in the post-pandemic era, *Technol. Forecast. Soc. Change*, 185, (2023), 122125–122134.
- [19] O. Tentori y A. Guidi, Semiconductors: Key Intermediate Goods for International Trade, <https://www.ispionline.it/en/publication/semiconductors-key-intermediate-goods-international-trade-30709>, 2024.
- [20] Formas de obtener silicio, Obtención del silicio, [https://formasobtenersilicio.blogspot.com/2016\\_](https://formasobtenersilicio.blogspot.com/2016_), 2016.
- [21] Agencia de sostenibilidad energética, <https://www.energiaenmineria.cl/procesos/fundicion>, 2015.
- [22] S. Kim, C. Yoon, S. Ham, J. Park, O. Kwon, D. Park, S. Choi, S. Kim, K. Ha, W. Kim, Chemical use in the semiconductor manufacturing industry, *Int. J. Occup. Environ. Health*, 24, (2018), 109–118.
- [23] S. Kim et al., Chemical use in the semiconductor manufacturing industry, *Int. J. Occup. Environ. Health*, 24, (2018), 109–118.
- [24] E. D Williams, R. U Ayres, M. Heller, The 1.7-kilogram microchip: Energy and material use in the production of semiconductor devices, *Environ Sci Technol*, 36(24), 2002, 5504-10.

- [25] D. Stewart, K. Ramachandran y B. Mitra, Semiconductor sustainability: Chips take a smaller byte out of resources, <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/2024/semiconductor-sustainability-forecast.html>, 2023.
- [26] B. Forti, V. Baldé, R. Kuehr, C. Bel, The Global E-waste Monitor 2020, United Nations University (UNU), <https://ewastemonitor.info>, 2020.
- [27] The Shift Project, Lean ICT: Towards Digital Sobriety, <https://theshiftproject.org/en/article/lean-ict-our-new-report/>, 2019
- [28] J.-C. Luo, L.-L. Hsieh, M.-J. Chang, K.-H. Hsu, Decreased white blood cell counts in semiconductor manufacturing workers in Taiwan, *Occup Environ Med* 59 (2002) 44-48.
- [29] T. Wang, Lung function and general illness symptoms in a semiconductor manufacturing facility, *Catal. Today*, 52, (1999), 207–212.
- [30] N. Harada, Relocating labour-intensive manufacturing firms from China to Southeast Asia: a preliminary investigation, *Bandung J. Global South*, 3, (2016), 1–18.
- [31] G. Posada, Fomento a la industria electrónica y semiconductores en Colombia: clave para soberanía tecnológica y desarrollo económico, *Revista ACIEM* 1552, 024, p.47-50.
- [32] D. A Tibaduiza, E.J Barajas, L. Pamplona, Estado actual de la Ingeniería Electrónica en Colombia: perspectivas y tendencias, *Revista ACIEM* 152, 2025, p.35-42.
- [33] DANE, Importaciones y exportaciones totales de bienes en Colombia 2023, <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/importaciones-y-exportaciones>, 2024.
- [34] MinTIC, *Con resultados como una ejecución del 88 % y cerca de tres millones de nuevas personas conectadas, el Ministerio TIC rindió cuentas de 2024*, <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/399125>, 2024.
- [35] Ministerio de Hacienda y Crédito Público, *Recursos comprometidos del PGN 2024 alcanzan 60,3 % de ejecución*, <https://www.minhacienda.gov.co/w/recursos-comprometidos-del-pgn-2024-alcanzan-60-3-de-ejecucion>, 2024.
- [36] Senado de la República de Colombia, Colombia se prepara para la Cuarta Revolución Industrial: aprobado proyecto de ley que fomenta la industria electrónica, <https://www.senado.gov.co/colombia-se->

[prepara-para-la-cuarta-revolucion-industrial-aprobado-proyecto-de-ley-que-fomenta-la-industria-electronica](#), 2024

[37] M. A. Alió, H. Perxacs, E. Tello, ¿Por qué la crisis ambiental? Contribuciones desde la ecología social, 1.ª ed., Universitat de Barcelona, 2023.

[38] Statista, Semiconductors – Latin America Market Forecast, <https://www.statista.com/outlook/tmo/semiconductors/latam>, 2025.

[39] SIA – Semiconductor Industry Association, 2023 State of the U.S. Semiconductor Industry, <https://www.semiconductors.org>, 2023.

[40] M. McLaughlin, Dr. Semiconductor Readiness: How State Policy Can Build a U.S. Workforce for Chip Fabrication, ITIF, <https://itif.org/publications/2024/01/29/dr-semiconductor-readiness/>, 2024.

[41] Intel, Water and Energy Use in Semiconductor Manufacturing, <https://www.intel.com/environment>, 2023.

[42] TSMC, 2023 Sustainability Report, <https://esg.tsmc.com>, 2023.

[43] Mermaid Chart, Lenguaje de código abierto para diagramación de flujos y sistemas, <https://mermaid.js.org>, 2024.

[44] Insight Maker, Herramienta de simulación dinámica y modelado de sistemas, <https://insightmaker.com>, 2024.

[45] IDEAM, Informe Nacional del Agua 2022, <https://www.ideam.gov.co>, 2022.

[46] UPME, Plan de Expansión Generación– Transmisión 2020–2034, <https://www1.upme.gov.co>, 2021.