

ARENAS SILÍCEAS

EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA
EN COLOMBIA, RETOS Y OPORTUNIDADES



AUTORES



MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

Edwin Palma Egea

VICEMINISTRA DE MINAS

Kelly Johana Rocha Gómez

PRESIDENTE ANM

Álvaro Pardo Becerra

DIRECTOR GENERAL UPME

Carlos Adrián Correa Flórez

DIRECTORA DE MINERÍA

EMPRESARIAL

Silvia Alexandra Cuesta Rosas

VICEPRESIDENTA

PROMOCIÓN Y FOMENTO

Laura Camila Ramos Díaz

SUBDIRECTORA DE MINERÍA

Olga Tatiana Araque Mendoza

GERENTE DE PROMOCIÓN

Esteban Felipe Castillo Jiménez

EQUIPO TÉCNICO

Christian Camilo Aguilar Villareal

Jefreey Esneider Rodríguez Sabogal

Karen Ocampo Torres

Fabio Andrés Alemán Machado

Juan Sebastián Roncancio Arévalo

Jenny Edith Rincón Pineda

Salomé Cataño Blanco

Andrés Betancur Rodríguez

Karol Lizeth Roa Bohórquez

César Mauricio Coconubo

Nelson Orlando Flórez Aza

Elisa Carrasco Rincón

Felipe Alberto Corral Montoya

Carlos Javier Leguízamo Jurado

Cristian Fabián Mariño Miranda

Yefferson Moreno Tristancho

Carlos Javier Tovar Prieto

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Sofía Rodríguez Jaramillo

TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|--|-----------|
| GLOSARIO DE SIGLAS | 7 |
| INTRODUCCIÓN | 10 |
| 1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y TRANSICIÓN ENERGÉTICA | 14 |
| 1.1. Nodo Estratégico para la Reindustrialización Nacional | 16 |
| 2. GENERALIDADES DE LA SÍLICE | 19 |
| 2.1. Potencial Mineral | 20 |
| 2.1.1. Favorabilidad geológica | 20 |
| 2.1.2. Recursos y Reservas | 25 |
| 2.1.3. Calidades | 26 |
| 2.2. Volúmenes de explotación del mineral | 27 |
| 2.3. Proyectos mineros | 30 |
| 2.4. Usos alternativos | 31 |
| 3. PANORAMA DEL MERCADO | 34 |
| 3.1. Energías Renovables | 34 |

| | |
|--|----|
| 3.2.Energía solar en Colombia | 45 |
| 3.2.1.Evolución y potencial de la energía solar en Colombia | 48 |
| 3.2.2. Proyección de paneles solares y demanda de recursos para el escenario de Transición Energética | 52 |
| 3.3. Arenas Silíceas | 58 |
| 3.3.1.Mercado internacional | 58 |
| 3.3.2.Balanza comercial | 63 |
| 3.4. Silicios (grado metalúrgico y polisilicio) | 66 |
| 3.4.1. Mercado internacional | 66 |
| 3.4.2. Balanza comercial | 70 |
| 3.5.Células fotovoltaicas ensambladas o no en módulos o paneles | 71 |
| 3.5.1.Mercado internacional | 71 |
| 3.5.2.Balanza comercial | 75 |
| 3.6. Vidrio | 77 |
| 3.6.1.Mercado internacional | 77 |
| 3.6.2.Balanza comercial | 79 |

| | |
|--|-----------|
| 4. ANÁLISIS DE LA CADENA PRODUCTIVA | 81 |
| 4.1.Beneficio mineral de las arenas silíceas | 83 |
| 4.2.Producción de silicio metalúrgico | 86 |
| 4.3.Producción de polisilicio | 92 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.Producción de lingotes | 97 |
| 4.5.Producción de obleas | 105 |
| 4.6.Producción de células fotovoltaicas | 111 |
| 4.6.1.Células convencionales por serigrafía | 112 |
| 4.6.2.Células de Contactos Enterrados | 114 |
| 4.7.Fabricación de Módulos fotovoltaicos | 114 |
| 4.8.Fabricación de microchips a partir del silicio de grado solar o polisilicio. | 117 |
| 4.8.1.Fotolitografía | 117 |
| 4.8.2.Implantación de Iones (Dopaje): | 118 |
| 4.8.3.Deposición de Metales y Creación de Conexiones | 118 |
| 4.8.4.Pruebas y Corte (Slicing) | 119 |
| 4.8.5.Empaquetado y Pruebas Finales | 119 |
| 4.9.Vidrio solar | 120 |
| 4.10.Requerimientos de energía para la producción de paneles solares | 126 |
| 4.11.Infraestructura energética para el desarrollo de la industria | 129 |
| 4.12.Logística de transporte | 132 |
| 4.12.1.Principales Corredores Logísticos | 134 |
| 4.12.2.Alternativas de transporte ferroviario | 136 |
| 4.12.3.Alternativas de transporte Terrestre | 138 |
| 4.12.4.Alternativas de transporte Intermodal | 142 |
| 4.13.Inversiones requeridas | 146 |

| | |
|---|------------|
| 5. ESCENARIOS PARA EL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA EN COLOMBIA | 151 |
| 5.1. La cadena productiva en Colombia | 152 |
| 5.2. Análisis de oportunidades y debilidades | 164 |
| 5.2.1. Conocimiento del recurso | 167 |
| 5.2.2. Procesamiento y la purificación | 170 |
| 5.2.3. Integración en cadenas de valor globales | 171 |
| 5.2.4. Producción de vidrio solar para paneles | 172 |
| 5.2.5. Ensamblaje de paneles solares | 173 |
| 5.3. Análisis ambiental del proceso de fabricación | 175 |
| 5.4. Alternativas para el desarrollo de la industria en Colombia | 181 |
| <hr/> | |
| 6. RECOMENDACIONES | 186 |
| 7. CONCLUSIONES | 192 |
| 8. REFERENCIAS | 200 |
| ANEXO 1: Sistema Interconectado Nacional | 207 |
| ANEXO 2: Detalle de los corredores logísticos de Colombia | 208 |



GLOSARIO DE SIGLAS

ANI: Agencia Nacional de Infraestructura

ANM: Agencia Nacional de Minería

ASEAN: Asociación de Naciones del Sudeste Asiático

CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

CTel: Ciencia, Tecnología e Innovación

CZ: Método Czochralski

DNP: Departamento Nacional de Planeación

ECRR: Estándar Colombiano de Recursos y Reservas

EE. UU: Estados Unidos

FENOCO: Ferrocarriles del Norte de Colombia S.A

FINDETER: Financiera de Desarrollo Territorial S.A

FNCER: Fuentes No Convencionales de Energía Renovable

FZ: Zona Flotante

HQC: Cuarzo de Alta Calidad (por sus siglas en inglés)

IEA: Agencia Internacional de Energía (por sus siglas en inglés)

IED: Inversión Extranjera Directa

INVIAS: Instituto Nacional de Vías

IRENA: Agencia Internacional de energías Renovables (por sus siglas en inglés)

IPSE: Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones energéticas para las Zonas no Interconectadas

MME: Ministerio de Minas y Energía

MG-Si: Silicio de grado metalúrgico

ODS: Objetivos del Desarrollo Sostenible

PAI-PROURE: Plan de Acción Indicativo - Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía

PEN: Plan Energético Nacional

PIB: Producto Interno Bruto

Poly Si: Polisilicio

PND: Plan Nacional de Desarrollo

PwC: PricewaterhouseCoopers

RF: Radio Frecuencia

R&R: Recursos y Reservas

SD: Método de Solidificación Direccional

SGC: Servicio Geológico Colombiano

SGE: Sistema de Gestión de Energía

SIN: Sistema Interconectado Nacional

STN: Sistema de Transmisión Nacional

STR: Sistema de Transmisión Regional

TEJ: Transición Energética Justa

UE: Unión Europea

UPME: Unidad de Planeación Minero-Energética

USD: dólar estadounidense

Unidades:

GW: Gigavatio

kW: kilovatio

TW: Tera vatio

MW: Megavatio

kWh: Kilo vatios por hora

°C: grados centígrados

0 INTRODUCCIÓN



Los procesos de transición energética a nivel mundial representan una oportunidad estratégica para el crecimiento económico de las regiones. Según proyecciones internacionales, el mercado de tecnologías limpias podría triplicar su tamaño para el 2035 (IEA, 2024), destacando la tecnología solar fotovoltaica como un pilar clave para la descarbonización.

Entre 2021 y 2023, la capacidad instalada de generación solar aumentó de 450 gigavatios (GW) a 1.2 teravatios (TW) a nivel mundial (BID, 2024). Este incremento del 166% en solo dos años refleja la acelerada adopción de estas soluciones energéticas. La fabricación de tecnologías asociadas a la generación de energía solar depende de un conjunto de materias primas esenciales, entre las que destaca la sílice. Se estima que la demanda de minerales críticos como la sílice podría aumentar entre dos y tres veces los requerimientos actuales en los próximos años (BID, 2024).

El silicio (Si) es un elemento abundante en la corteza terrestre, se encuentra en la naturaleza en forma de silicatos SiO_2 y SiO_4 . Su forma más simple, la sílice o cuarzo (SiO_2), constituye un componente de rocas detríticas, félsicas e ígneas intermedias. Su transformación primero en silicio de grado metalúrgico y posteriormente en polisilicio desempeña un papel fundamental en el proceso

de descarbonización global, ya que se utiliza directamente en tecnologías bajas en carbono, como paneles fotovoltaicos, baterías de iones de litio y celdas de combustible. Además, tienen aplicaciones en otras industrias, incluyendo la fabricación de prendas de vestir, máscaras de silicona, chips de computadora, componentes electrónicos, aleaciones, materiales para motores e indirectamente en una amplia gama de aplicaciones químicas y metalúrgicas. El rol central del silicio en estas tecnologías no solo radica en su transformación, sino también en las dinámicas globales de su mercado.

A nivel mundial, el mercado del silicio se puede dividir en tres etapas principales: extracción, purificación y fabricación. Debido su abundancia en la corteza terrestre, la extracción del silicio puede desarrollarse en casi cualquier lugar del mundo. Sin embargo, las etapas de purificación y fabricación de dicha materia prima para obtener silicio metalúrgico y polisilicio, están dominadas por Asia, con China como el principal productor (IEA, 2024).

Las tensiones políticas recientes y los efectos de la pandemia del COVID-19 evidenciaron la fragilidad de las cadenas de suministro globales al estar concentradas en este continente. Ante este panorama, países de la Unión Europea (UE) y Estados Unidos (EE. UU.), han comenzado a implementar aranceles sobre los productos provenientes de China, generando una oportunidad estratégica para que Colombia se posicione en el mercado como productor de subproductos derivados de las arenas silíceas, productos finales y como un destino atractivo para la industria.

Colombia, a través del Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2022-2026 “Colombia, Potencia Mundial de la Vida” (Ley 2294 de 2023), estableció cinco ejes transformadores, entre los cuales el cuarto eje se refiere a la Transformación Productiva, Internacionalización y Acción Climática. Esta iniciativa contempla catalizadores clave como la transición energética justa, segura, confiable y eficiente, así como una economía productiva basada en la reindustrialización y la bioeconomía. Estos catalizadores tienen acción directa

en la transformación del sector minero, impulsando su contribución hacia el desarrollo de una economía carbono neutral, sostenible e incluyente. En línea con lo anterior, la Agencia Nacional de Minería (ANM), mediante la Resolución N°1006 del 30 de noviembre de 2023, determinó 17 minerales, junto con sus minerales asociados, derivados o concentrados, como estratégicos del país. Entre estos se incluyen las arenas silíceas, el Silicio (Si) y sus minerales asociados, derivados o concentrados, los cuales son materias primas esenciales para la producción de tecnologías bajas en carbono, como los paneles solares fotovoltaicos.

Adicionalmente, en diciembre de 2023, a través del documento CONPES 4129 se aprobó la Política Nacional de Reindustrialización. Este instrumento busca facilitar la transición de una economía extractiva a una economía basada en el conocimiento, con enfoque en la sostenibilidad, la productividad y la inclusión.

Los instrumentos de política aprobados en los últimos años destacan el papel estratégico de la industria minera en Colombia. Junto con otros sectores, esta industria impulsa la diversificación de la canasta productiva y exportadora, la reindustrialización, la inversión en actividades de valor agregado, la transición energética justa y la seguridad alimentaria. Además, su aporte a la infraestructura pública, mediante el desarrollo de vías, puertos y aeropuertos, fortalece sectores encadenados como la logística y la construcción, lo cual contribuye a mejorar los tiempos y reducir los costos de transporte de los productos nacionales, que a su vez fomenta los encadenamientos productivos regionales y fortalece la inserción del país en las cadenas globales de valor.

Actualmente, la creciente demanda global de materiales necesarios para la descarbonización de los sectores productivos ofrece a Colombia una oportunidad estratégica. Esta coyuntura permite crear y atraer industrias asociadas a la transformación de minerales críticos, como la sílice. Para aprovechar este potencial, es fundamental implementar mecanismos que impulsen la agregación de valor a estos minerales estratégicos, mediante una

extracción eficiente y sostenible, seguida de su posterior transformación en productos de mayor valor agregado.

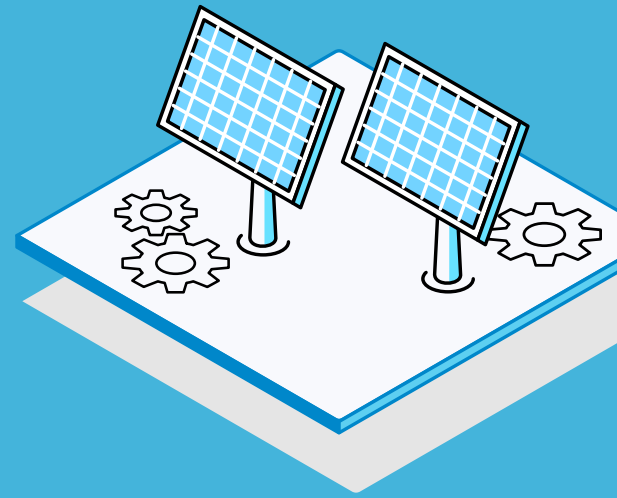
Colombia tiene una experiencia significativa en relación con el refinamiento de minerales, como el acero y el ferroníquel, que puede servir como base para desarrollar capacidades en la obtención de silicio metalúrgico a partir de la sílice. Adicionalmente, el país tiene un desarrollo consolidado en la producción de vidrio, lo que representa una ventaja competitiva para avanzar hacia productos especializados, como el vidrio utilizado en paneles solares. La transformación de las arenas silíceas no solo es crucial para alcanzar la meta de 42 GW de generación solar a 2050, sino que también constituye una oportunidad para diversificar la economía en territorios con vocación extractiva, fomentando un desarrollo más inclusivo y sostenible.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, este documento presenta un análisis de la cadena de valor del mineral estratégico **arenas silíceas, silicio (Si) y sus minerales asociados, derivados o concentrados**, orientado hacia la reindustrialización de la minería como parte de la transición energética justa (TEJ) y la diversificación económica del país.

En los siguientes capítulos se presenta la revisión de la disponibilidad de esta materia prima en el país, los panoramas de mercados de energía y paneles solares, y los productos industriales derivados como el silicio de grado metalúrgico, el polisilicio y las células fotovoltaicas. Además, se abordan los procesos de obtención de los diferentes productos de la cadena de valor, la infraestructura de transporte y energía disponible, los actores identificados, los escenarios para el desarrollo de esta industria en Colombia y, recomendaciones para desarrollar un plan de acción.

01

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y TRANSICIÓN ENERGÉTICA



La transición energética es un eje estratégico del Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2022-2026: Colombia, Potencia Mundial de la Vida. Actualmente, el 74% de la oferta energética del país proviene de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), lo que evidencia su dependencia económica de estos recursos: representan el 52,3% de las exportaciones, el 40,8% de la inversión extranjera y el 6% del PIB (DNP, 2022). Para superar este modelo extractivo, el PND propone una transición hacia una economía basada en el conocimiento, la sostenibilidad y la reindustrialización, con un enfoque prioritario en la diversificación productiva y el valor agregado.

La transición hacia fuentes renovables, en particular la energía solar fotovoltaica, es crucial para reducir las emisiones de carbono y fortalecer la competitividad económica de Colombia. Aunque el país cuenta con una matriz eléctrica predominantemente limpia -con el 63% de su capacidad de generación proveniente de fuentes hidráulicas y un 7% de energía solar (1365,1 MW de capacidad instalada, UPME, 2024)-, esta última cifra refleja un inmenso potencial. Con un desarrollo industrial adecuado, Colombia podría consolidarse como líder regional en la producción y exportación de soluciones tecnológicas solares.

El silicio metalúrgico, obtenido a partir de la sílice, es el insumo esencial para la fabricación de paneles solares. Sin embargo, la cadena de suministro global de este mineral está altamente concentrada en Asia, lo que representa riesgos para la estabilidad de costos y la disponibilidad de componentes. Con importantes reservas de arenas silíceas y un alto potencial energético solar gracias a su ubicación geográfica privilegiada, Colombia tiene una oportunidad estratégica para la producción local de insumos fotovoltaicos, fortaleciendo su matriz energética y su posición en el mercado global.

La actividad minera del país debe trascender la exportación de minerales sin procesar. Es fundamental impulsar proyectos industriales que transformen estas materias primas en productos de alto valor agregado, como silicio de grado metalúrgico, vidrio, obleas, módulos y paneles solares, integrando al país en la cadena global de suministro fotovoltaico, contribuyendo no solo al desarrollo industrial, sino también a la reducción de la dependencia de fuentes externas para tecnologías renovables.

La participación de la industria colombiana en el PIB ha disminuido significativamente, pasando del 20,7% en 1967 al 11,5% en 2021 (DNP, 2022). Este declive refleja una economía dependiente de la extracción y exportación de recursos naturales con escasa transformación local. Para revertir esta tendencia, el PND y el documento CONPES 4129 sobre Reindustrialización establecen metas claras: reducir brechas de productividad, diversificar la matriz productiva e integrar cadenas de valor con énfasis en la generación de valor agregado.

La energía solar fotovoltaica se perfila como un motor clave para esta reindustrialización. Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), se espera que las tecnologías solares generen el 90% de la electricidad mundial para 2050. En este contexto, Colombia tiene la oportunidad de capitalizar su ventaja competitiva en radiación solar y terrenos disponibles, como se ha explicado anteriormente.

Para capitalizar el potencial de la energía solar, es esencial invertir en tecnología y fortalecer la capacidad industrial, reduciendo así la dependencia de importaciones. Esto incluye la creación de plantas dedicadas a la producción de silicio, obleas para módulos fotovoltaicos, vidrio, células y módulos solares, además de fomentar alianzas internacionales para la cooperación técnica con países líderes en tecnología fotovoltaica, lo que permitirá la transferencia de conocimientos y el desarrollo de infraestructura local. Paralelamente, se debe impulsar la transformación de materias primas, como las arenas silíceas, en silicio metalúrgico, consolidando un ecosistema industrial que incorpore procesos avanzados de refinación y fabricación.

Finalmente, resulta clave promover el autoconsumo energético y la generación distribuida, mediante estrategias como comunidades y municipios energéticos. Además, la generación de energía limpia y de bajo costo puede atraer industrias electro intensivas, potenciando el desarrollo económico regional y la creación de empleo en zonas rurales. Paralelamente, la educación y la capacitación técnica deben consolidarse como pilares para formar profesionales en áreas como ingeniería, manufactura y diseño de tecnologías solares y asociadas a esta, asegurando una base sólida de talento humano que sustente el crecimiento sostenible esta industria emergente.

1.1. NODO ESTRATÉGICO PARA LA REINDUSTRIALIZACIÓN NACIONAL

En Colombia, departamentos como La Guajira, Córdoba, Sucre, Magdalena, Atlántico y el Cesar poseen un gran potencial de radiación solar. La selección de un departamento idóneo para el desarrollo de una industria de transformación de materias primas en silicio de grado metalúrgico y productos relacionados con la tecnología solar fotovoltaica debe considerar factores estratégicos como la disponibilidad de infraestructura de transporte, la proximidad a puertos y centros de consumo, así como incentivos económicos y normativos.

Aquellas regiones con acceso a corredores logísticos clave y una combinación de ventajas competitivas pueden desempeñar un papel fundamental en la transición energética nacional, fortaleciendo la diversificación productiva y la competitividad industrial de Colombia en mercados internacionales (MME, 2024).

La clave del éxito radica en aprovechar el extraordinario potencial solar del Cesar para la generación de energía limpia. Este recurso no solo permite ofrecer tarifas eléctricas altamente competitivas, sino que también convierte a la región en un destino natural para industrias electro intensivas, como la del silicio. Estas industrias, que dependen de un suministro eléctrico estable, sostenible y económico, pueden reducir significativamente sus costos de producción, dado que la energía representa entre el 40 % y el 50 % de estos. Además, operar con una baja huella de carbono les permite cumplir con estrictas regulaciones ambientales (European Commission, 2019).

Para maximizar el impacto de esta transformación, es indispensable integrar la generación de energía renovable con redes eléctricas modernas, digitales y estables en la región. Esto garantizará la flexibilidad necesaria frente a la variabilidad de las fuentes renovables y evitará interrupciones, que serían altamente costosas en procesos industriales de alta intensidad energética. Además, la ubicación estratégica del Cesar facilita la creación de nodos energéticos, optimizando la infraestructura eléctrica, reduciendo pérdidas y minimizando los costos de transmisión.

El potencial del Cesar va más allá de sus recursos energéticos. Su proximidad al puerto de Ciénaga ofrece una ventaja logística incomparable, permitiendo el transporte eficiente y rentable de productos transformados, como obleas de silicio, hacia mercados internacionales. Esta conexión incrementa la competitividad exportadora del país y captura mayor valor agregado en la cadena de producción. Además, el desarrollo de estas industrias en el Cesar puede convertirse en un motor clave para la generación de empleo

de calidad, el fortalecimiento de cadenas productivas locales y la mejora de las condiciones de vida de las comunidades en un territorio afectado por el declive de los precios del carbón.

El desarrollo de una industria solar fotovoltaica en el Cesar está alineado con los objetivos de Colombia de diversificar su economía, reducir la dependencia de actividades extractivas e impulsar la producción de tecnologías avanzadas. La transformación de arenas silíceas en productos manufacturados no solo posiciona al Cesar como un pilar de la transición energética, sino también como un actor clave en la estrategia de reindustrialización y diversificación productiva nacional.

02

GENERALIDADES DE LA SÍLICE



El **silicio** (Si) es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, después del oxígeno (O), y constituye más de una cuarta parte de esta. Ambos elementos forman la **sílice** (SiO_2), un compuesto químico, comúnmente presente en la naturaleza en forma de **cuarzo** (sílice cristalina), un mineral que posee grandes propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, químicas y ópticas. Este mineral, el más abundante en la superficie terrestre, se encuentra ampliamente distribuido en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, así como en depósitos de vetas y filones.

El término **arenas silíceas** se refiere a arenas y gravas con un alto contenido de sílice, mayormente en forma de cuarzo, que suelen asociarse a formaciones geológicas sedimentarias. Estas arenas pueden hallarse tanto en rocas consolidadas como en depósitos no consolidados. Se utilizan en la fabricación de vidrio, aplicaciones de fundición, abrasivos, entre otros usos industriales. Las especificaciones para cada aplicación varían, pero los recursos de sílice para la mayoría de los usos son abundantes (U.S. Geological Survey, s.f.). A partir de lo anterior, en este documento, los términos **sílice**, **cuarzo** y **arenas silíceas** están estrechamente relacionados y se consideran parte fundamental de las fuentes para la producción de silicio.

Por otro lado, es importante mencionar que el silicio no se encuentra de forma natural como metal puro, por lo que es necesario someterlo a procesos de transformación antes de ser empleado en aplicaciones comerciales, como paneles solares fotovoltaicos, chips electrónicos (semiconductores), aleaciones de aluminio, siliconas y fibra óptica, entre otros.

Para su uso en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos, la sílice debe transformarse primero en silicio de grado metalúrgico y posteriormente en polisilicio, para finalmente conformar las células fotovoltaicas. También se utiliza en tecnologías bajas en carbono, como las baterías de iones de litio y las celdas de combustible. Este mercado ha experimentado un crecimiento acelerado en las últimas dos décadas debido a la creciente adopción de energías renovables a nivel global, en respuesta a la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático.

2.1. POTENCIAL MINERAL

2.1.1. FAVORABILIDAD GEOLÓGICA

Respecto a la información pública sobre arenas silíceas, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en el marco del evento: “Cadenas Productivas: Arenas Silíceas en la Industria Colombiana, Paneles Solares y Transición Energética” realizado por la ANM el 23 de abril de 2024, presentó el análisis de las **“Zonas con favorabilidad geológica para arenas silíceas en Colombia”**.

Según la información presentada por el SGC, los criterios para identificar las áreas con mayor favorabilidad geológica en la prospección de arenas silíceas incluyen los siguientes:

- **Unidades litoestratigráficas:** Información geocientífica en planchas y memorias de la cartografía geológica del territorio colombiano a escala

1:100.000. Incluye información sobre litología, estructuras geológicas, textura y composición mineralógica de las formaciones que albergan arenas silíceas o rocas ricas en cuarzo.

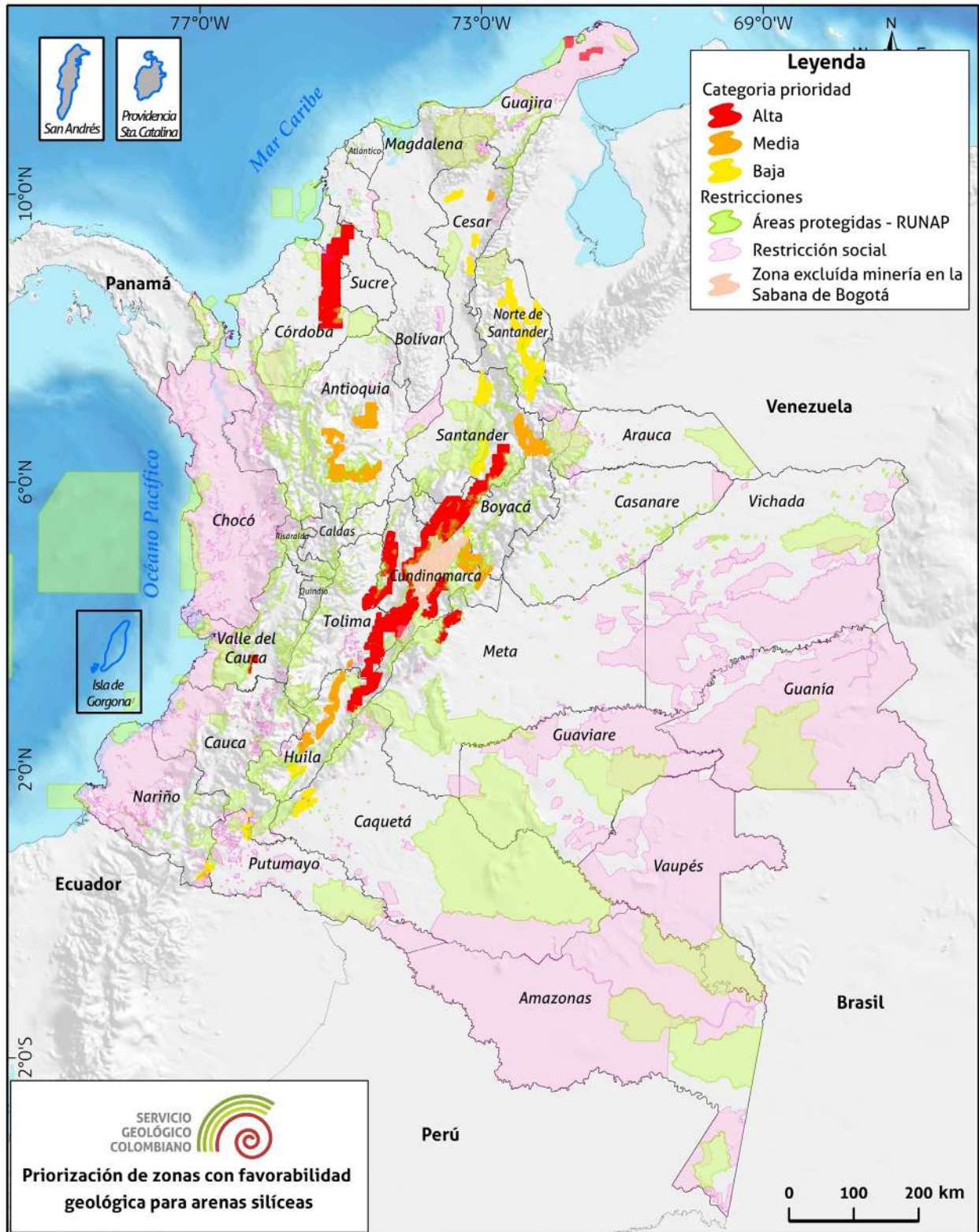
- **Anomalías geoquímicas:** Unidades litológicas potenciales con valores mayores a 80 % de contenido de SiO_2
- **Proximidad a depósitos y ocurrencias minerales:** Proximidad geográfica a depósitos y ocurrencias minerales ya identificados, así como a títulos y solicitudes mineras para arenas silíceas.

Las áreas con favorabilidad geológica fueron clasificadas con prioridad alta, media y baja, y considerando los siguientes factores:

- Mayor conocimiento geológico (cartografía geológica, geoquímica, metalogenia).
- favorabilidad geológica de las unidades litológicas.
- Accesibilidad y cercanía a las posibles zonas de procesamiento.
- Se excluyeron áreas con restricciones de carácter ambiental y social.

Del análisis realizado se obtuvo el mapa (Figura 1), el cual señala que los departamentos con favorabilidad geológica alta son: La Guajira, Sucre, Córdoba, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Tolima y Huila.

Figura 1. Priorización de zonas con favorabilidad geológica para arenas silíceas.



Fuente: SGC 2024

Según la información del SGC, las unidades con potencial geológico para arenas silíceas son principalmente sedimentarias, con litologías que incluyen cuarzoarenitas y areniscas cuarzosas, entre otras. También se identifican algunas unidades que contienen cuarcitas, así como el Batolito Antioqueño, donde, de manera general se encuentran tonalitas y granodioritas. (Figura 2).

Es importante indicar que en La Guajira y el Cesar también se ha identificado información de arenas con concentraciones superiores a 95% de SiO₂. Sin embargo, en estos departamentos se presentan algunas restricciones de tipo social.

Figura 2. Unidades con potencial geológico para arenas silíceas en Colombia. Fuente: SGC 2024

| PERIODO | UNIDADES GEOLÓGICAS |
|--------------------|---|
| Neógeno | Formación Sincelejo Formación Tiltatá Grupo Real |
| Paleógeno | Formación Amaga Formación Guachinte Formación Santa Teresa Formación Diablo Formación Picacho Formación La Paz Formación Areniscas del Limbo Formación Hoyón Formación Ciénaga de Oro Formación Bogotá Formación Regadera Formación Lisama Formación Areniscas de Socha Formación Cacho |
| Cretácico | Miltonita Granítica de Tapajarin Formación San José Grupo Palmichal Formación La Tabla Grupo Guadalupe Grupo Olini (Olini Medio) Formación Areniscas de Chiquinquirá Formación Une Formación Caballos Formación Alpujarra Formación Río Negro Formación Areniscas de Cáqueza Formación Areniscas de Las Juntas Cuarteta de Carpintero Batolito Antioqueño |
| Jurásico | Formación Arcabuco |
| Triásico | |
| Pérmico | |
| Carbonífero | Grupo Farallones |
| Devónico | Formación Areniscas de Ámbica |
| Silúrico | |
| Ordovícico | Metasedimentarias de La Virgen |

2.1.2. RECURSOS Y RESERVAS

En la información sobre Recursos y Reservas (R&R) de arenas silíceas, suministrada por el Grupo de Evaluación de Estudios Técnicos de la Vicepresidencia de Seguimiento y Control de la Agencia Nacional de Minería, se destaca lo siguiente: al 28 de octubre de 2024, se reportan R&R de siete (7) títulos mineros, distribuidos en los siguientes departamentos y cifras:

Tabla 1. Recursos y Reservas reportados bajo el ECCR

| DEPARTAMENTO | RECURSOS INFERIDOS (M³) | RECURSOS INDICADOS (M³) | RECURSOS MEDIDOS (M³) | RESERVAS PROBABLES (M³) | RESERVAS PROBADAS (M³) |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| Bogotá D.C., Cundinamarca | 14.419.300,00 | 4.423.480,00 | | 1.081.935,00 | |
| Boyacá | 112.458,00 | 84.632,00 | 27.826,00 | 27.826,00 | |
| Meta | 562.000,11 | 3.602.275,84 | 4.320.271,58 | 649.219,00 | |
| Santander | | | 303.594,58 | | 207.376,90 |
| Valle del Cauca | 15.374.985,00 | 18.076.526,00 | 85.527.945,0 | 747.771,00 | 45.070.590,00 |
| TOTAL GENERAL | 30.468.743,11 | 26.186.913,8 | 90.179.637,16 | 2.506.751,00 | 45.277.966,90 |

Fuente: construcción propia con datos de la ANM, 2024

Es importante mencionar que estos recursos y reservas se asocian a unidades geológicas sedimentarias y que solo hacen referencia a siete (7) títulos mineros de los 59 que cuentan con un instrumento técnico aprobado para “arenas silíceas” dentro de los minerales autorizados por la ANM. Si bien la Resolución 100 de 2020 establece las condiciones para la presentación de la información de los recursos y reservas minerales en el área concesionada, y define que

cada año el titular debe presentar la información actualizada, a la fecha no todos los títulos han presentado los reportes bajo el ECRR. Por lo tanto, se espera que el volumen de reservas probadas aumente significativamente a medida que se disponga de más información.

Ahora bien, si se tiene en cuenta la cantidad explotada en 2023^{Pr} (705.673 m³/año) y se toma como base las reservas probadas calculadas con el ECRR (ver Tabla 1), se podría decir que a esa misma tasa de producción se contaría con 60 años de explotación.

2.1.3. CALIDADES

Para el análisis de la calidad de los yacimientos, se consideró principalmente el porcentaje de SiO₂ reportado en los documentos técnicos y en cinco (5) informes del ECRR. En total, se cuenta con información de calidad de 38 títulos mineros, para los cuales se realizó una clasificación por rangos así:

Tabla 2. Rangos de porcentaje de SiO₂ en títulos mineros

| Rangos de porcentaje SiO ₂ | Cantidad de títulos | Departamentos |
|---------------------------------------|---------------------|--|
| < 90 | 4 | Cundinamarca, Tolima y Valle del Cauca |
| 90-94,9 | 6 | Boyacá, Cundinamarca, Santander y Tolima |
| 95-98,9 | 18 | Bogotá D.C., Cundinamarca, Boyacá, Meta, Norte de Santander, Santander, Tolima y Valle del Cauca |
| > 99 | 10 | Bogotá D.C., Boyacá – Santander, Cundinamarca, Meta y Norte de Santander |

Fuente: construcción propia con datos de la ANM, 2024

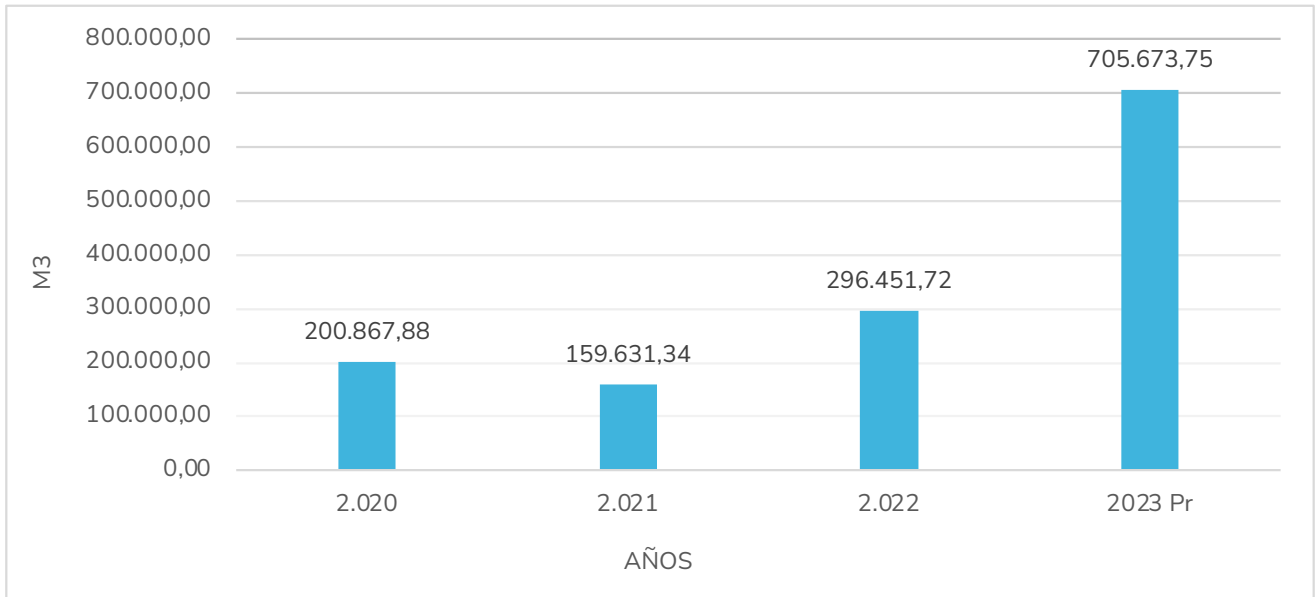
Como se puede observar en la Tabla 2, en el país se cuenta con yacimientos que reportan superiores al 95% de SiO₂ los cuales deben ser objeto de análisis más detallados y rigurosos en términos de calidad, así como de pruebas físicas y químicas, incluyendo posibles mezclas, con el fin de determinar la viabilidad de su uso en la industria fotovoltaica, ya sea encaminado a la producción de silicio de grado metalúrgico hasta obleas de silicio o para vidrios de protección del panel solar. Así mismo, existen reportes del SGC en los se indica que en el departamento del Cesar se encuentran seis zonas con potencial geológico para prospección de arenas silíceas. El potencial geológico de estas zonas está asociado principalmente a las unidades litoestratigráficas sedimentarias como la formación Río Negro, en las que existen capas de rocas con porcentajes de cuarzo (SiO₂) superiores al 95%, por lo tanto, deben ser objeto de actividades rigurosas para el desarrollo minero.

2.2. VOLÚMENES DE EXPLOTACIÓN DEL MINERAL

Con respecto a los volúmenes de explotación, en promedio, durante los últimos 4 años se han explotado cerca de 340.656 m³ anuales. En la Figura 3 se presentan las cifras de producción desde el año 2020 hasta el 2023^{Pr1}. Por otro lado, la Figura 4 evidencia que el departamento con mayor participación en la explotación de arenas silíceas asociada al pago de regalías es Cundinamarca, con un 59%. Le siguen Antioquia con un 24% y Bolívar con un 6%, mientras que otros departamentos presentan porcentajes menores al 2%.

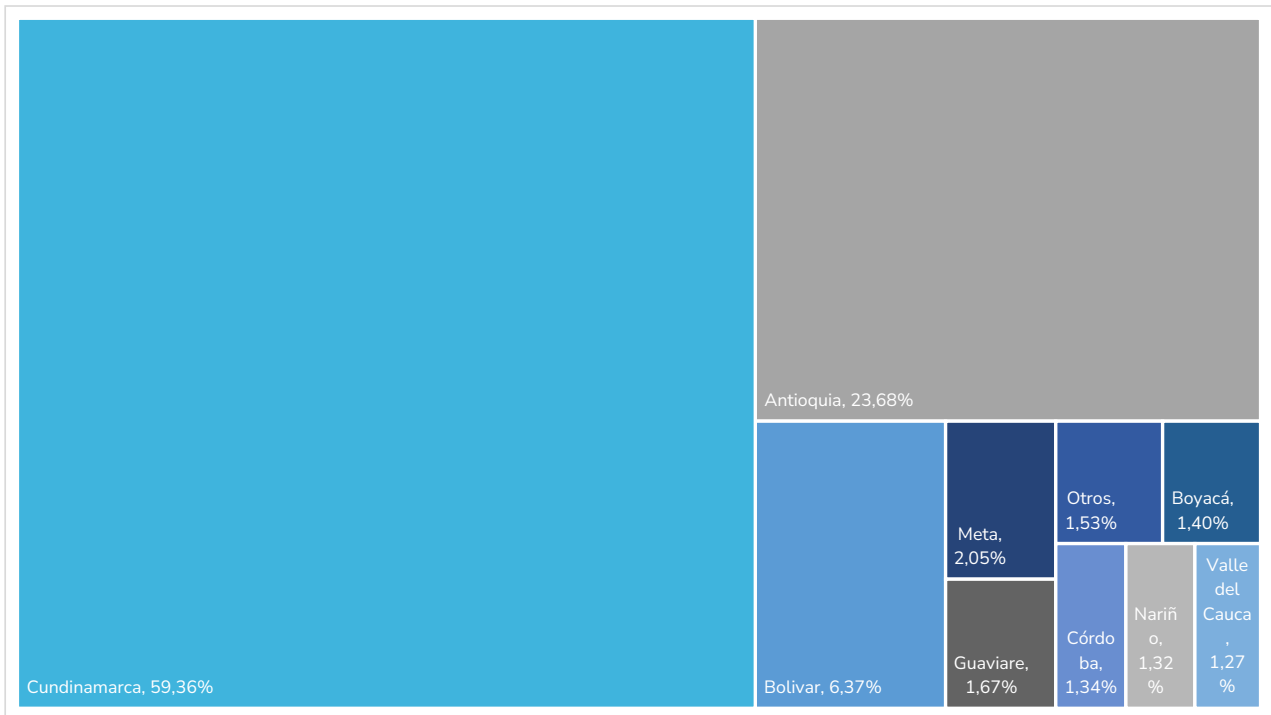
¹ Pr: Preliminar, dado que continúa en actualización.

Figura 3. Volúmenes de explotación de arenas silíceas en Colombia



Fuente: construcción propia con datos de la ANM, 2024

Figura 4. Participación por departamento de los volúmenes de explotación asociados al pago de regalías.



Fuente: construcción propia con datos de la ANM

Dado el papel que desempeña Cundinamarca en la industria de la sílice, se analizó la participación de los municipios del departamento para identificar las áreas específicas con mayor actividad extractiva. Se identificó que Zipaquirá es el municipio con el mayor volumen de explotación (ver Figura 5), representando el 87% de la explotación del departamento y el 51% a nivel nacional.

En este municipio se encuentra la explotación de la mina el Tunal que abastece a la empresa Peldar, la cual tiene tres líneas importantes de productos, tales como el vidrio plano, envases de vidrio y cristalería.

Figura 5. Porcentaje de participación de los municipios del departamento de Cundinamarca



Fuente: construcción propia con datos de la ANM

2.3. PROYECTOS MINEROS

De acuerdo con la información de la Vicepresidencia de Seguimiento, Control y Seguridad Minera de la ANM, a septiembre de 2024, se reportan con 59 títulos mineros que cuentan con instrumento técnico aprobado para arenas silíceas.

El análisis de estos títulos revela una amplia diversidad de actores en el sector, que incluye desde grandes empresas consolidadas hasta pequeñas y medianas empresas, así como personas naturales. Esta heterogeneidad refleja la variedad de enfoques en la explotación del mineral, con titulares que desempeñan diferentes roles en la cadena de valor. Algunos se especializan en la producción de cemento y materiales de construcción, mientras que otros enfocan su actividad en el suministro de arenas silíceas para industrias como la química, el vidrio y la manufactura. Asimismo, existen empresas que se dedican exclusivamente a la extracción y comercialización del mineral en bruto.

Los titulares mineros presentan distintos niveles de explotación. Mientras que algunas operaciones tienen una mayor capacidad de extracción y abastecen mercados nacionales, otras trabajan a menor escala de explotación.

Si bien en este informe no se profundiza en la caracterización de cada titular, es importante reconocer que la explotación de arenas silíceas abarca un amplio espectro de actores con distintos niveles de participación y desarrollo en el sector.

2.4. USOS ALTERNATIVOS

La sílice, además de ser utilizada en la producción de silicio para obleas solares y en la fabricación de vidrio de recubrimiento, también tiene los siguientes usos alternativos (SME, 2009):



Construcción:

La sílice se utiliza como agregado en concretos arquitectónicos y recubrimientos antideslizantes para pavimentos. Además, sirve como aditivos decorativos en estructuras de hormigón, aportando tanto la estética como durabilidad en condiciones de desgaste constante.



Fundición de metales:

Se emplea en la producción de moldes y núcleos en la fundición de metales, gracias a su resistencia térmica y su capacidad para unirse con diversos aglutinantes. Estas arenas requieren un control preciso de expansión térmica para evitar defectos en el molde. Además, se tratan para mejorar su resistencia y minimizar la reacción con el metal fundido, manteniendo la forma y superficie del producto final.



Filtración de agua y gases

Se utiliza en la filtración de agua para sistemas municipales e industriales debido a su alta pureza y tamaño de grano específico, lo que asegura una filtración eficiente y duradera. Además, en la industria del carburo de silicio, se emplea como revestimiento en hornos eléctricos para la purificación de gases. Estas aplicaciones requieren arenas de alta calidad con una capacidad de flujo adecuada para mantener la eficacia en la filtración a lo largo del tiempo.



Fabricación de abrasivos

La sílice se usa para la limpieza y el acabado de superficies. Su estructura resistente y bajo costo la hacen adecuada para el “stone washing” de prendas de mezclilla y aplicaciones de pulido industrial. Además, las partículas de arena se seleccionan y procesan para alcanzar un tamaño y forma específicos que optimicen la eficiencia del abrasivo en tareas de corte y desbaste.



Producción de siliconas y silicatos

Sirve como materia prima para la síntesis de silicatos y siliconas, componentes esenciales en la industria química y en la producción de recubrimientos protectores y aditivos industriales. Estas arenas deben ser de alta pureza para evitar contaminaciones que podrían afectar la calidad y las propiedades finales de los productos químicos resultantes.



Electrometalurgia:

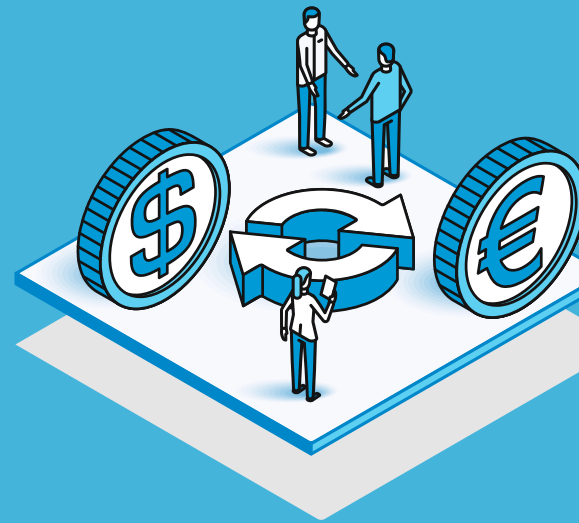
Es ampliamente utilizada en procesos industriales, contribuyendo a mejorar la calidad en aplicaciones como la fundición y la producción de metales al proporcionar estabilidad térmica y minimizar impurezas en ciertos procesos. Aunque no actúa como fundente propiamente dicho, su pureza y propiedades térmicas son esenciales en la elaboración de metales como el hierro y sus aleaciones.

Con el análisis general de la información relacionada con los títulos mineros que cuenten con instrumento técnico aprobado para la explotación de arenas silíceas, se ha podido identificar que este material se destina principalmente a dos usos clave en el país. En primer lugar, se emplea como materia prima fundamental en la industria del vidrio dada su alta pureza. En segundo lugar, estas arenas desempeñan un papel esencial en el sector de la construcción, donde son utilizadas como agregados en mezclas de concreto y mortero, así como en la fabricación de otros materiales, gracias a su granulometría y resistencia mecánica.

Este doble aprovechamiento subraya la importancia de estos recursos dentro de las cadenas de valor industrial y constructiva, destacando su impacto en el desarrollo económico regional y nacional.

03

PANORAMA DEL MERCADO



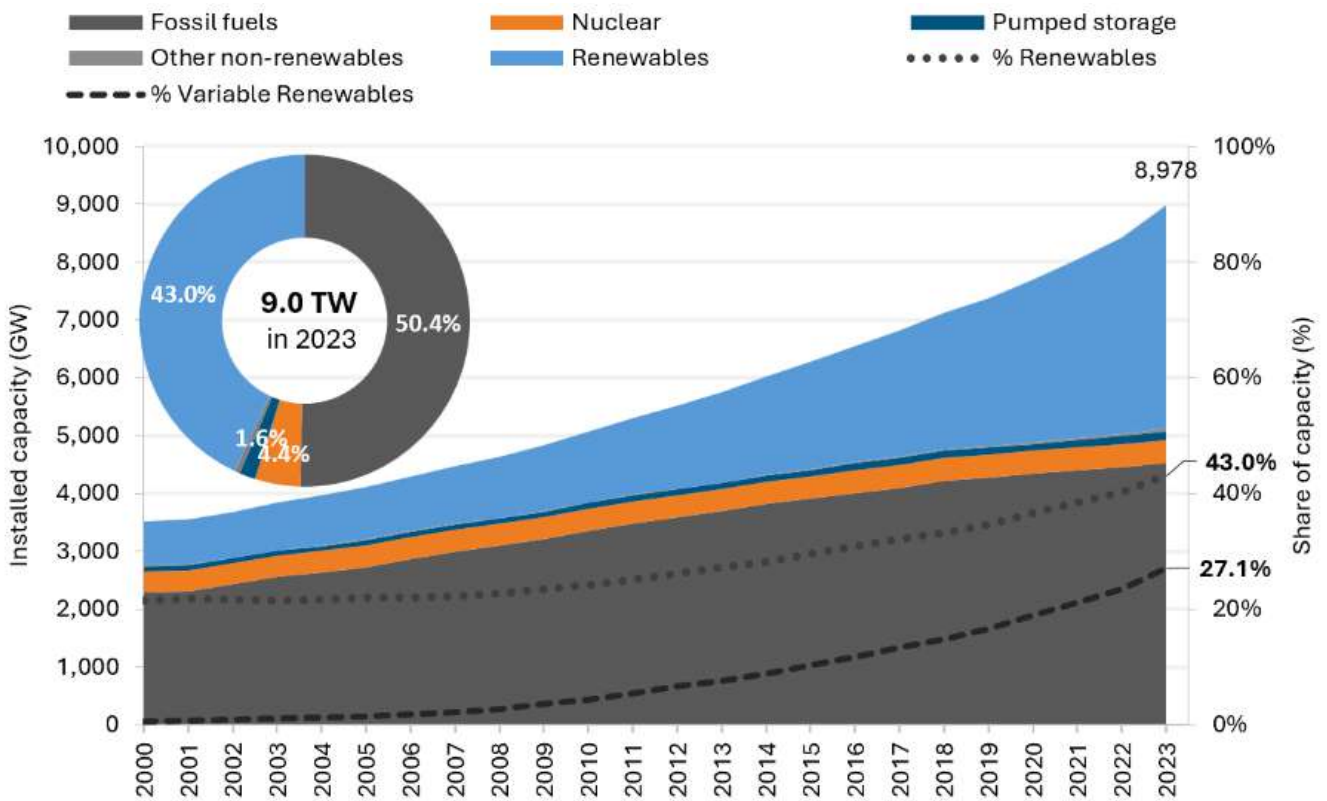
3.1. ENERGÍAS RENOVABLES

Las políticas energéticas globales, encaminadas a cumplir los objetivos del Acuerdo de París, promueven la transición energética y la expansión de energías renovables en el sector eléctrico. Para 2022, las energías renovables representaron el 29,1% de la generación eléctrica mundial, alcanzando un total de 8,440TWh, lo que supone un aumento de 7,2% respecto al año anterior (IRENA, 2024). Este crecimiento refleja los avances en la implementación de políticas climáticas y el impulso de mecanismos de financiamiento internacional para proyectos de energía limpia. Particularmente, en 2023, la energía solar contribuyó con el 73% del crecimiento de las energías renovables, seguida de la energía eólica, con un 24% (IRENA, 2024). Este incremento subraya la creciente importancia del polisilicio como material esencial para satisfacer la creciente demanda, lo que resalta la necesidad de estrategias nacionales que promuevan su producción sostenible.

En 2023, las energías renovables representaron el 43,0% (3.865 GW) de la capacidad mundial instalada de generación eléctrica, de un total de 8.978 GW. Dentro de estas, la energía solar fotovoltaica superó ligeramente a la

hidroeléctrica en capacidad instalada total, con 1.418 GW frente a 1.265 GW, respectivamente. Le siguieron la energía eólica (1.017GW), bioenergía (149 GW), y las fuentes geotérmica y marina, con menores participaciones. El resto de la capacidad instalada (57,0%, equivalente a 5,1 TW) provino de fuentes no renovables, principalmente combustibles fósiles, como se observa en la Figura 6 (IRENA, 2024).

Figura 6. Tendencias de capacidad de energía instalada fuentes fósiles, nucleares y renovables (2000-2023).



Fuente: International Renewable Energy Agency - IRENA (2024)

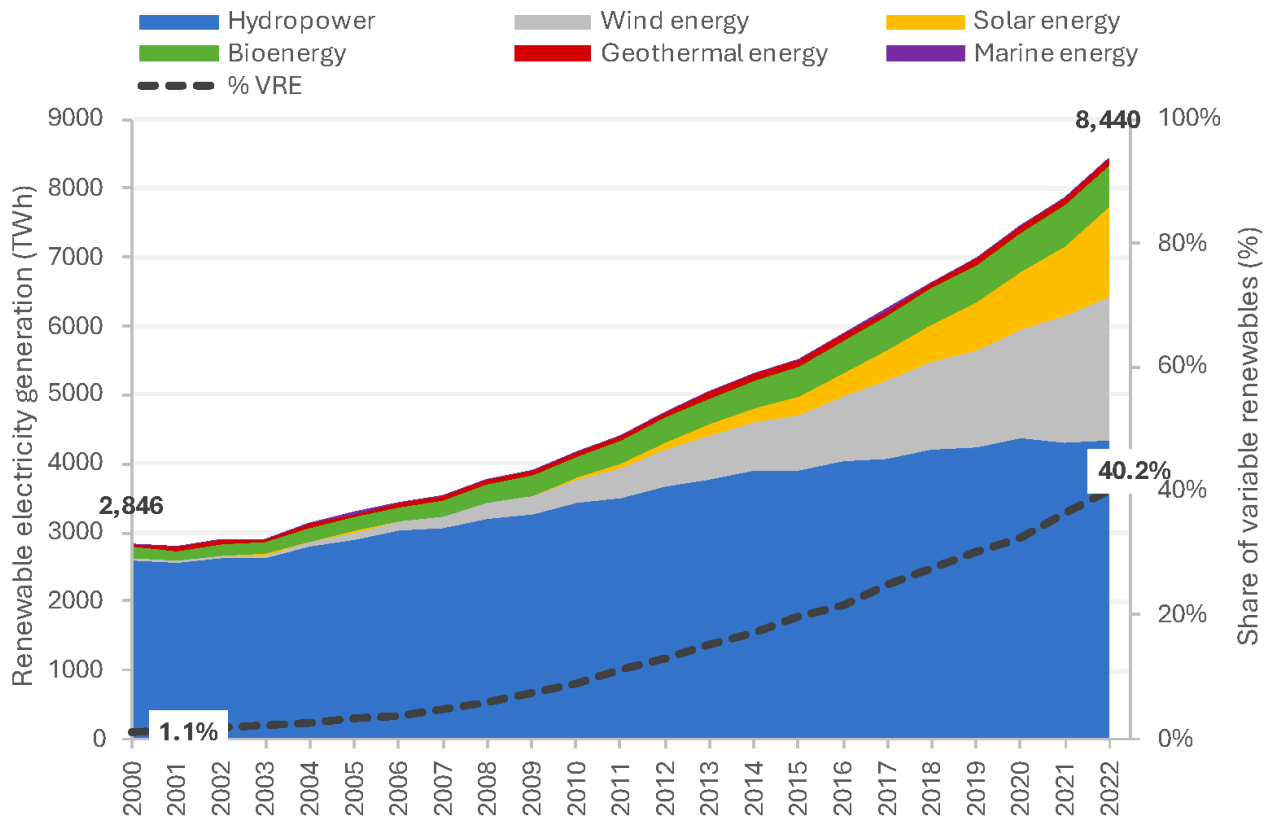
En las últimas décadas, las fuentes de energía renovable han experimentado una enorme diversificación. Aunque las hidroeléctricas continúan siendo la

principal fuente de generación de electricidad renovable, tecnologías como la solar y la eólica han incrementado de manera constante su participación en la matriz global de energía. Estas fuentes pasaron de representar apenas el 1,1% de la generación de electricidad renovable en el año 2000 a un 40,2% en 2022. Este crecimiento refleja una transformación fundamental en el sector energético, impulsada por avances tecnológicos, políticas públicas favorables y una mayor conciencia sobre la necesidad de reducir las emisiones de carbono y mitigar el cambio climático (IRENA, 2024).

Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2024), la energía solar se está consolidando como la fuente de energía renovable de mayor crecimiento a nivel mundial en los últimos años. Además de ser una fuente de energía distribuida, permite su instalación cerca de las áreas de consumo, tiene un impacto ambiental reducido. Aunque necesita ser complementada con otras fuentes de generación para garantizar estabilidad en el suministro, su demanda continúa creciendo de forma sostenida. En 2022, la energía solar generó 1.294 TWh, posicionándose por debajo de la energía hidroeléctrica, que generó 4.330TWh, y de la energía eólica con 2.094 TWh. Sin embargo, en términos de nuevas instalaciones energéticas, la energía solar ha superado a fuentes como la nuclear y al gas.

Figura 7. Tendencias en la Generación y proporción de Energías Renovables (2000-2022).

Nota: % VRE (Variable renewable energy).



Fuente: International Renewable Energy Agency - IRENA (2024).

Desde 2010, el costo de producción de electricidad fotovoltaica ha disminuido un 82%. Aunque Europa fue pionera en el desarrollo e implementación de la energía solar, Asia, particularmente China, ha tomado la delantera, fabricando actualmente el 90% de los paneles solares a nivel global (Bullon, 2022). Esta dinámica ha generado una creciente dependencia de tecnologías fabricadas en Asia. En 2023, solo en China se instaló una capacidad de energía solar fotovoltaica equivalente a la instalada por el resto del mundo en todo el 2022 (IEA, 2024).

A nivel mundial, el panorama está dominado por proyectos de gran escala en países como China, Emiratos Árabes Unidos e India, lo que evidencia una

tendencia hacia la consolidación de la industria solar. Estas mega plantas desempeñan un papel crucial en la reducción de los costos de producción, demostrando que la economía de escala es un factor clave para el crecimiento de la energía solar. La siguiente tabla de las principales granjas solares evidencia un crecimiento sostenido de la capacidad instalada a nivel global, demostrando el atractivo de esta tecnología como una fuente de energía limpia, sostenible y cada vez más competitiva.

Tabla 3. Mayores granjas solares en el mundo y su capacidad instalada.

| PAÍS | NOMBRE | CAPACIDAD |
|------------------------|---|-----------|
| China | Xinjiang solar farm | 5 GW |
| China | Golmud Solar Park | 2,8 GW |
| India | Bhadla Solar Park | 2,7 GW |
| Emiratos Árabes Unidos | Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park | 2,62 GW |
| India | Pavagada Solar Park | 2,06 GW |
| Egipto | Benban Solar Park | 1,8 GW |
| China | The Tengger Desert Solar Park | 1,5 GW |
| Emiratos Árabes Unidos | Noor Abu Dhabi Solar Power Project | 1,2 GW |
| China | Datong Solar Power Top Runner Base | 1,1 GW |
| China | Jinchuan Solar Park | 1,03 GW |
| India | Kurnool Ultra Mega Solar Park | 1 GW |
| China | Yanchi Ningxia Solar Park | 1 GW |
| México | Villanueva | 750 MW |
| India | Kamuthi Solar Power Station | 648 MW |

| PAÍS | NOMBRE | CAPACIDAD |
|--------|-------------------|-----------|
| España | Francisco Pizarro | 590 MW |

Fuente: www.theecoexperts.co.uk

Por otra parte, el foco de la transición hacia energías limpias ha evolucionado, dejando atrás la dependencia de combustibles tradicionales y centrándose en la disponibilidad de minerales críticos². Estos materiales no solo son esenciales en la revolución energética, sino que también se han convertido en activos estratégicos en las cadenas de suministro global. Según la IEA (2023), se espera que la electrificación aumentará la demanda de estos minerales clave entre dos y siete veces para 2030, incluyendo aquellos procesados para su uso en esas mismas energías. En este contexto, el polisilicio, juega un papel crucial en la producción de paneles fotovoltaicos. Sin embargo, la minería y el procesamiento de este material están altamente concentrados en ciertas regiones, lo que genera riesgos significativos para la seguridad del suministro global.

Los largos plazos necesarios para el desarrollo de minas y la infraestructura asociada complican la expansión de la oferta, elevando el riesgo de cuellos de botella en el suministro. Para mitigar estos riesgos, es crucial que los gobiernos e industrias establezcan redes internacionales de productores y consumidores más diversificadas, asegurando que la capacidad de suministro se expanda rápidamente para satisfacer la creciente demanda.

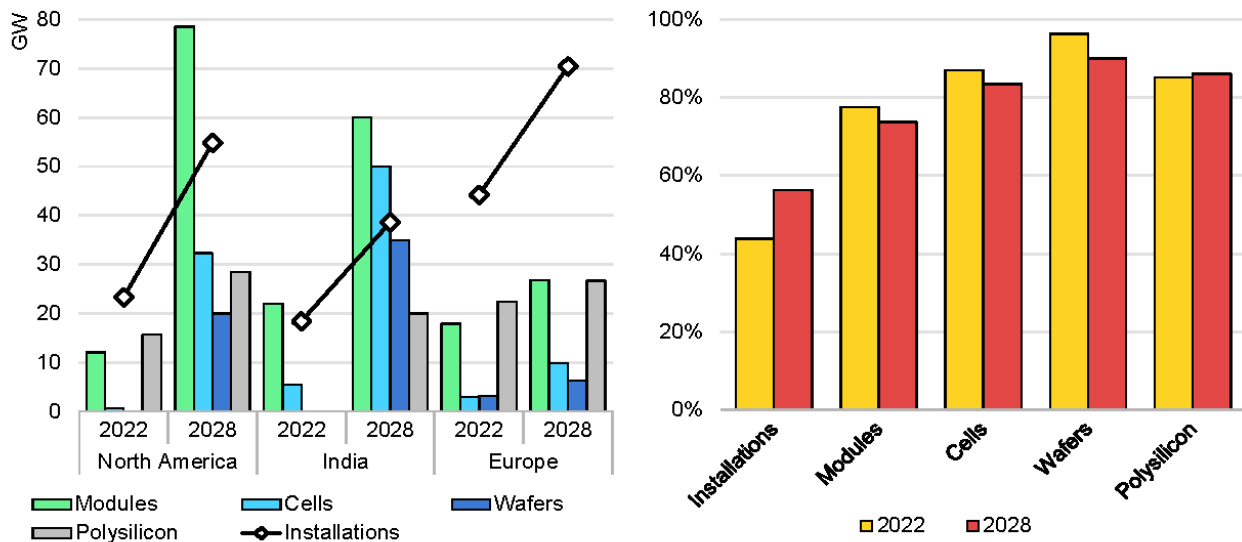
Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2024), la falta de capacidad de fabricación de polisilicio para uso fotovoltaico ha sido el principal cuello de botella en la cadena de suministro de energía solar. Esto quedó evidenciado en 2021, cuando inversiones insuficientes y un incendio en una de las mayores plantas de fabricación global provocaron una escasez, elevando los precios

² Se suele denominar minerales críticos a las materias primas —minerales y metales— que son necesarias para generar energía renovable, producir tecnologías no contaminantes y facilitar la transición hacia un futuro más sostenible y con bajos niveles de carbono (IGF, 2022)

de los módulos fotovoltaicos y complicando la expansión del mercado de la energía solar. Sin embargo, para 2023, la capacidad de producción de polisilicio en China se triplicó respecto a los niveles de 2021, alineándose con otros segmentos de la cadena de valor fotovoltaica, como celdas y módulos.

Entre 2022 y 2023, se anunciaron numerosos proyectos de fabricación de paneles fotovoltaicos fuera de China y de la Asociación de Naciones del Sudeste Asiático (ASEAN), impulsados por políticas como la Ley de Reducción de Inflación en EE.UU. y el Programa de Incentivos Vinculados a la Producción en India. En EE.UU., la mitad de los proyectos están orientados al ensamblaje de módulos, mientras que el resto se distribuye en otros segmentos de la cadena de suministro. Se espera que para 2028, la capacidad de fabricación en América del Norte cubrirá el 35% de la demanda regional, mientras que India superará su demanda local, generando oportunidades de exportación. Sin embargo, la autosuficiencia en India será limitada (50%) debido a inversiones rezagadas en polisilicio. En la Unión Europea, la falta de políticas de apoyo ha resultado en baja autosuficiencia, siendo Turquía el principal receptor de las inversiones. Se espera que China siga dominando la producción global (ver Figura 8).

Figura 8. Capacidad de fabricación de energía solar fotovoltaica e instalaciones anuales en América del Norte, India y Europa, 2022-2028 (izquierda), y participación de China en la producción e instalaciones fotovoltaicas, 2022- 2028 (derecha).



IEA. CC BY 4.0.

Fuente: IEA analysis based on BNEF; IEA PVPS; SPV Market Research; RTS Corporation; PV InfoLink (2024).

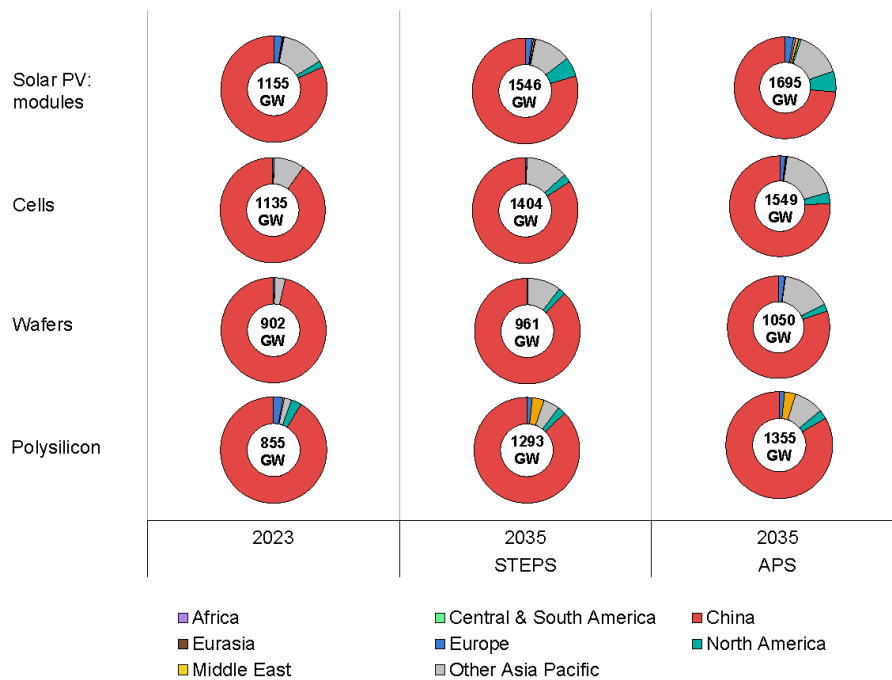
De cara al futuro, se prevén proyectos de fabricación de tecnologías limpias en todo el mundo lo cual añadirá nueva capacidad tanto a instalaciones existentes como a nuevas. De acuerdo con los datos de la IEA, la cartera de proyectos de energía solar fotovoltaica a finales de junio de 2024 ascendió a aproximadamente 460 GW en módulos, 280 GW en células, 490 GW para polisilicio y unos 150 GW en obleas (IEA, 2024). Alrededor de 30 GW de esta capacidad de producción de polisilicio, 60 GW de obleas (wafers), 80 GW de celdas y 100 GW de módulos fotovoltaicos se están desarrollando fuera de China (IEA, 2024). La mayoría de estas nuevas inversiones se han concentrado en países que han adoptado medidas comerciales proteccionistas para fortalecer sus mercados locales, con políticas que limitan la influencia y competencia de China. Aunque estas medidas pueden beneficiar a fabricantes locales, a completar sus proyectos, lograr rentabilidad en estas nuevas

instalaciones podría ser un desafío a largo plazo.

Si todas las ampliaciones previstas en la capacidad de producción de energía solar fotovoltaica se concretaran, la capacidad total de la cadena pasaría de 850 GW a finales de 2023, con el polisilicio como factor limitante, a cerca de 1 TW para finales de 2030, momento en el cual las obleas se convertirían en el componente restringido. La capacidad de los módulos superaría los 1.600 GW, en comparación con los aproximadamente 1.150 GW registrados a finales de 2023. Actualmente, alrededor del 85% de la capacidad en módulos y componentes ya está comprometida, aunque este porcentaje podría variar en el futuro según el desarrollo de nuevas inversiones.

La mayor parte de estas expansiones están previstas en China, donde la infraestructura de fabricación existente, junto con los proyectos en construcción o comprometidos, podría generar más de 7 TW de módulos solares fotovoltaicos entre 2024 y 2030. Esto equivale a casi cinco veces la capacidad instalada a nivel mundial para finales de 2023 (IEA, 2024), consolidando aún más el papel dominante de China en la producción global.

Figura 9. Capacidad de fabricación anual de componentes solares fotovoltaicos por país/ región en los escenarios de políticas establecidas y compromisos anunciados (2023 -2035)



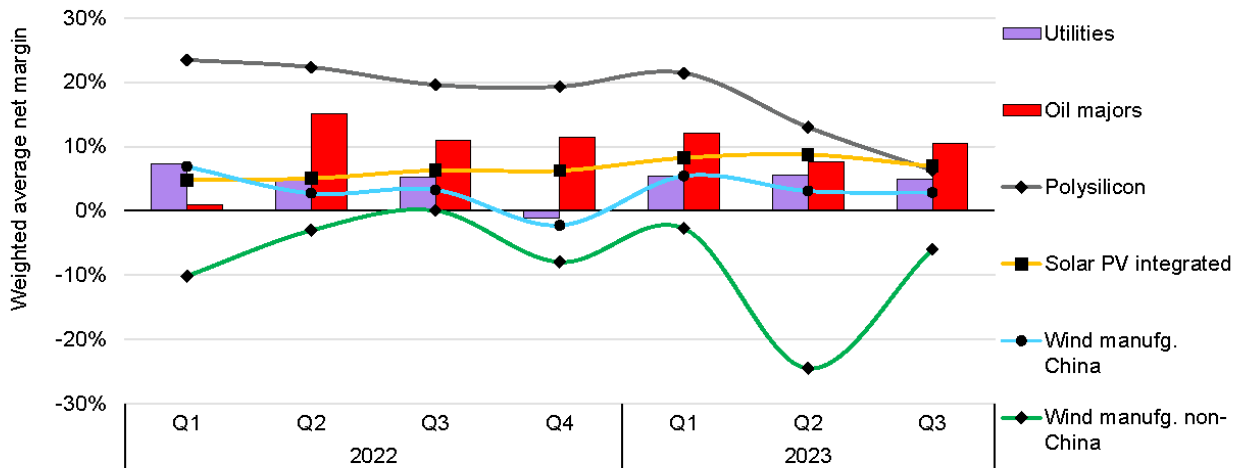
Fuente: (IEA, 2024)

Con respecto a la industria del polisilicio, la demanda creciente de energía solar, combinada con la limitada capacidad de producción, provocó un aumento significativo en los precios, alcanzando los USD 40/kg en noviembre de 2022. Este incremento benefició temporalmente a fabricantes y a productores, que vieron un aumento en sus márgenes netos. Sin embargo, esta tendencia fue transitoria, ya que la capacidad global de producción casi se duplicó en 2023, alcanzando los 800 GW, lo que llevó a una drástica caída en los precios a USD 10/kg.

Históricamente, tales desequilibrios entre oferta y demanda han conducido a márgenes negativos, como se evidenció en el tercer trimestre de 2023 (ver Figura 10). Esta situación llevó a muchas empresas a suspender sus planes de nuevas fábricas o incluso a interrumpir operaciones debido a pérdidas

asociadas a los altos costos de producción (IEA, 2024).

Figura 10. Márgenes netos ponderados de empresas de energías renovables, utilidades y petroleras, 2022 y 2023 (Q1, Q2 y Q3). Nota: Wind manufg = empresas fabricantes de equipos eólicos.



Fuente: IEA analysis based on companies' annual and quarterly financial reports (2024).

Para la región de Latinoamérica y el Caribe, se prevé un incremento de la capacidad de energía solar fotovoltaica a 227 GW al año 2035, lo que implica un aumento anual estimado entre 7 GW y 20 GW (BID, 2023). Sin embargo, como se ha mencionado a lo largo del capítulo, los productores de componentes para sistemas fotovoltaicos se ubican principalmente en China, el Sudeste Asiático y Estados Unidos (Ver Figura 11). Es importante destacar que Brasil está aprovechando su capacidad productiva de paneles solares y creando sinergias con países vecinos como Argentina y Chile, con el objetivo de asegurar el suministro de materias primas esenciales, como el silicio (BID, 2024). Estas iniciativas regionales representan una oportunidad estratégica para Colombia, que podría integrarse en estas cadenas de valor y posicionarse como un actor relevante en el mercado solar.

Figura 11. Instalaciones de fabricación de tecnología limpia en funcionamiento. 2023



Fuente: (IEA, 2024)

3.2. ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA

Colombia está en proceso de transformar su sector energético, impulsado por la necesidad de adoptar un modelo más sostenible, eficiente y justo, alineado con los objetivos globales de descarbonización. El Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052 establece una estrategia a largo plazo para orientar el desarrollo de alternativas tecnológicas en la producción y consumo de energía, en línea con los compromisos del país en materia de sostenibilidad y transición energética. Este plan busca reducir la dependencia de combustibles fósiles, incrementar el uso de fuentes renovables y mejorar la eficiencia energética, promoviendo un sistema diversificado, sustentable, resiliente y alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los principios de la Transición Energética Justa (TEJ).

Mediante cinco escenarios prospectivos, el PEN plantea diferentes rutas que

exploran distintos niveles de integración de la energía solar, proyectando un crecimiento en su capacidad instalada que contribuye a una matriz energética más limpia y equilibrada. Estos escenarios son: actualización, modernización, inflexión, innovación y transición energética. Cada uno presenta un enfoque particular para enfrentar los desafíos energéticos de Colombia, con estrategias orientadas a la adaptación al cambio climático, la seguridad energética y la competitividad económica.

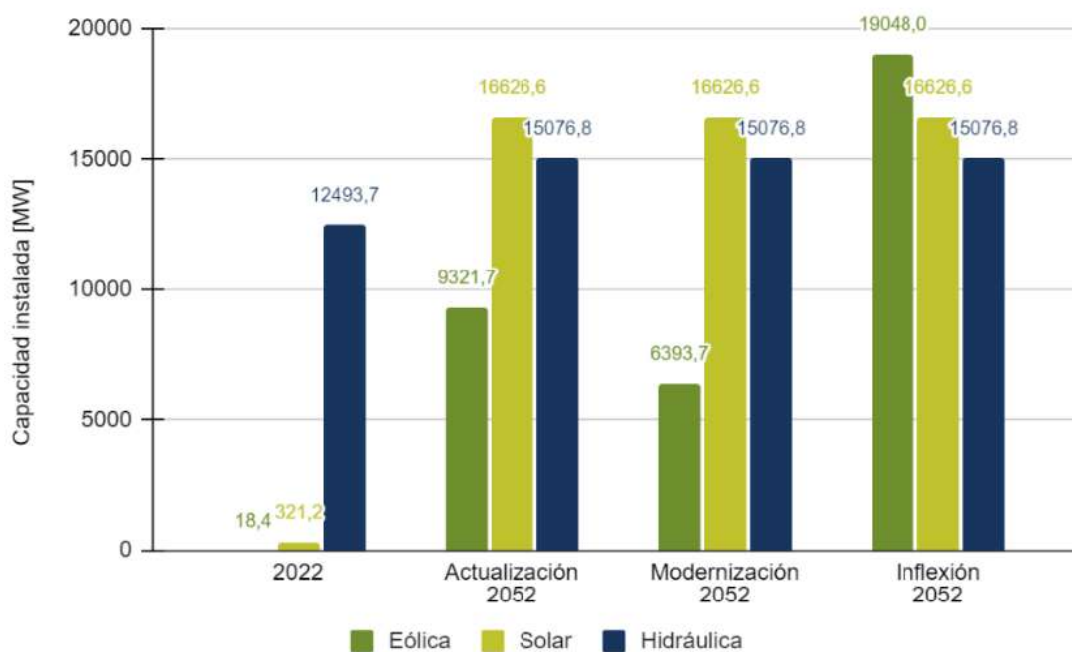
La proyección de la energía solar en cada escenario varía en función de los objetivos específicos de cada enfoque (ver Figura 13). En el Escenario de Actualización, se prevé un crecimiento moderado de la capacidad solar, alcanzando alrededor de 15.000 MW para 2052, principalmente mediante instalaciones de autoconsumo y pequeños sistemas distribuidos. Por otro lado, el escenario de Modernización proyecta un aumento más acelerado, con una capacidad de 25.000 MW, enfocado en proyectos solares a gran escala en zonas de alta radiación como La Guajira, y en la integración de redes inteligentes para una distribución más eficiente

En el escenario de Inflexión, el crecimiento de la energía solar es aún más ambicioso, con una meta de 35.000 MW para 2052. Este escenario contempla la electrificación de sectores industriales y de transporte, tradicionalmente dependientes de combustibles fósiles, junto con la implementación de sistemas avanzados de almacenamiento para asegurar un suministro eléctrico estable. Por otro lado, el Escenario de Innovación eleva la capacidad de energía solar a 45.000 MW, incorporando tecnologías de alta eficiencia en generación y almacenamiento, lo que permitirá ampliar el acceso a la energía solar en zonas remotas y áreas rurales.

Finalmente, el Escenario de Transición Energética plantea la expansión más ambiciosa, con una meta de 50.000 MW para 2052. En este escenario, la energía solar cubriría hasta el 50% del suministro total proveniente de fuentes no convencionales de energía renovable, desempeñando un papel clave en la

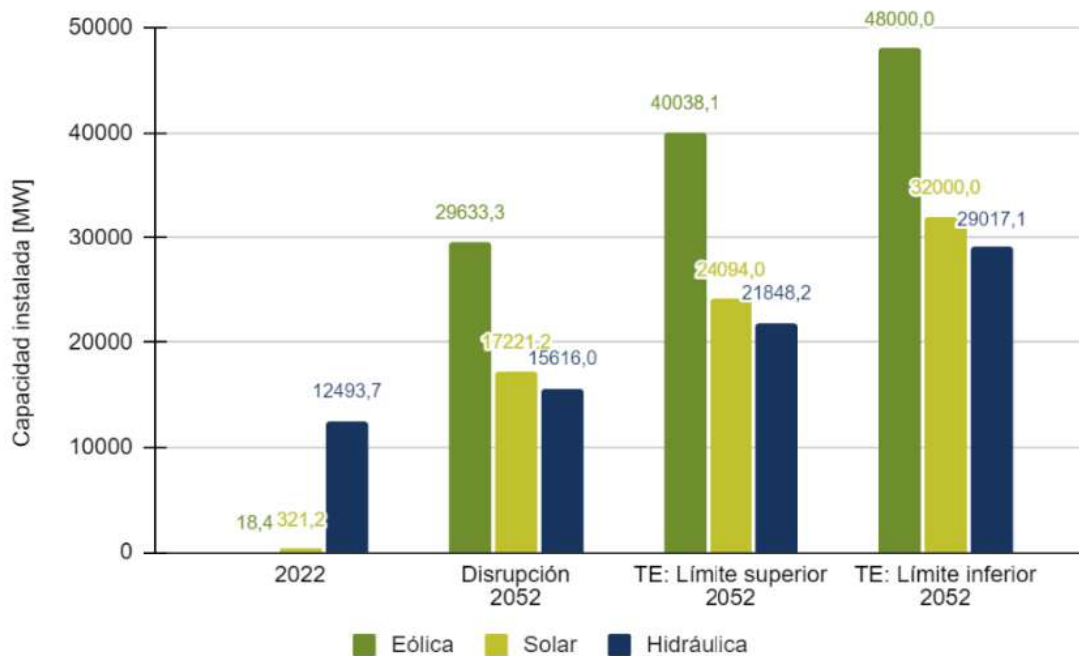
descarbonización de la matriz energética de Colombia y en la promoción de una justicia social energética. Este escenario subraya el compromiso del país con una transición justa, donde la transformación energética no solo promueva la sostenibilidad ambiental, sino también la inclusión y el bienestar de todas las comunidades.

Figura 12. Capacidad instalada para generación eólica, solar e hidráulica en los escenarios delPEN (actualización modernización e inflexión)



Fuente: (UPME, 2022)

Figura 13. Capacidad instalada para generación eólica, solar e hidráulica en los escenarios del PEN (innovación v transición energética)



Fuente: (UPME, 2022)

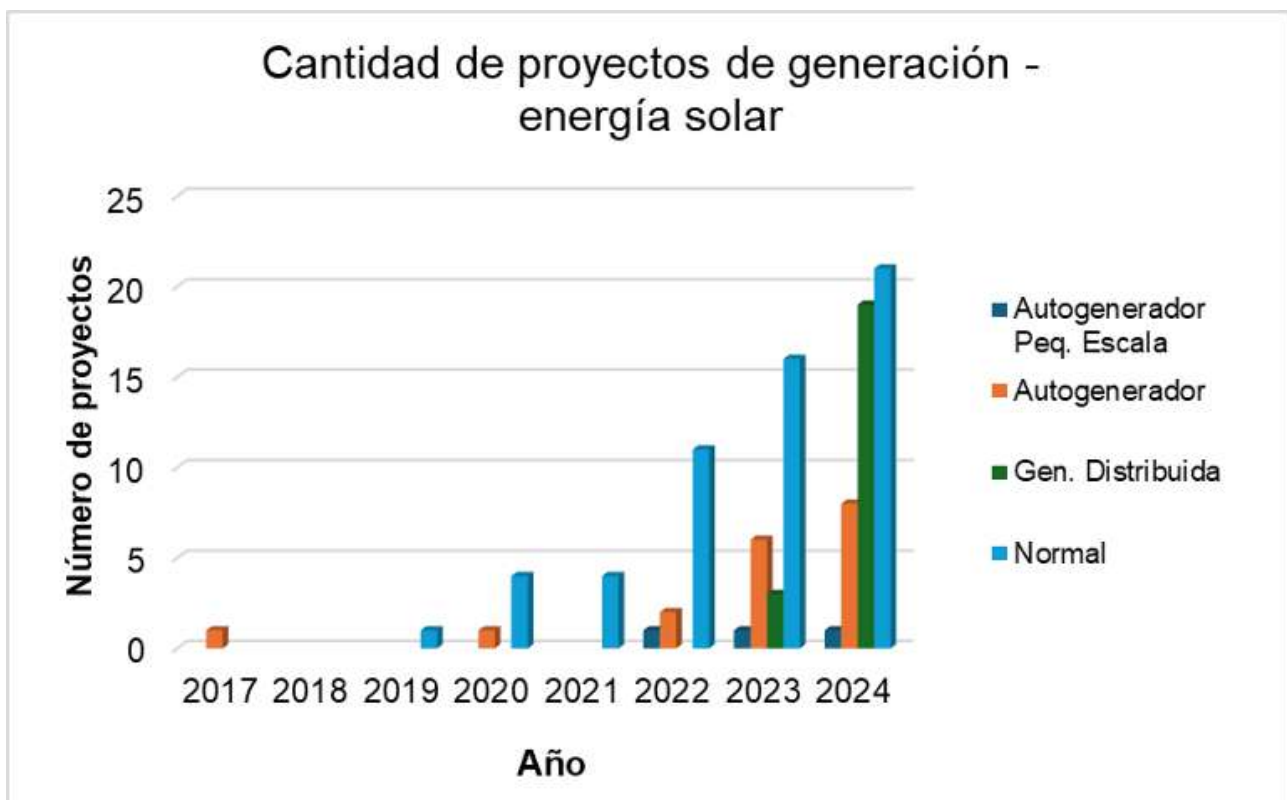
El PEN 2022-2052 propone una visión de futuro en la que la energía solar se posiciona como un componente fundamental para transformar el sistema energético de Colombia, promoviendo simultáneamente un desarrollo equitativo y sostenible.

3.2.1. EVOLUCIÓN Y POTENCIAL DE LA ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA

La capacidad de generación de energía en Colombia ha mostrado un crecimiento notable en los últimos años, especialmente en el sector de la energía solar. A octubre de 2024, el país cuenta con una capacidad solar en operación de 1.365,1 MW, distribuida en 100 proyectos activos (UPME, 2024). Además,

hay 11 proyectos adicionales en fase de pruebas que suman 563,7 MW, lo que anticipa una expansión significativa de esta fuente de energía renovable en el corto plazo. A nivel de evolución temporal, se observa un aumento significativo en el desarrollo de proyectos solares desde 2020 (Figura 14). Los años posteriores han registrado un incremento constante en la puesta en operación de nuevos proyectos, con una proyección de crecimiento sostenido.

Figura 14. Número de proyectos de generación por energía solar



Fuente: elaboración propia con base en información del geovisor de generación en Colombia ³

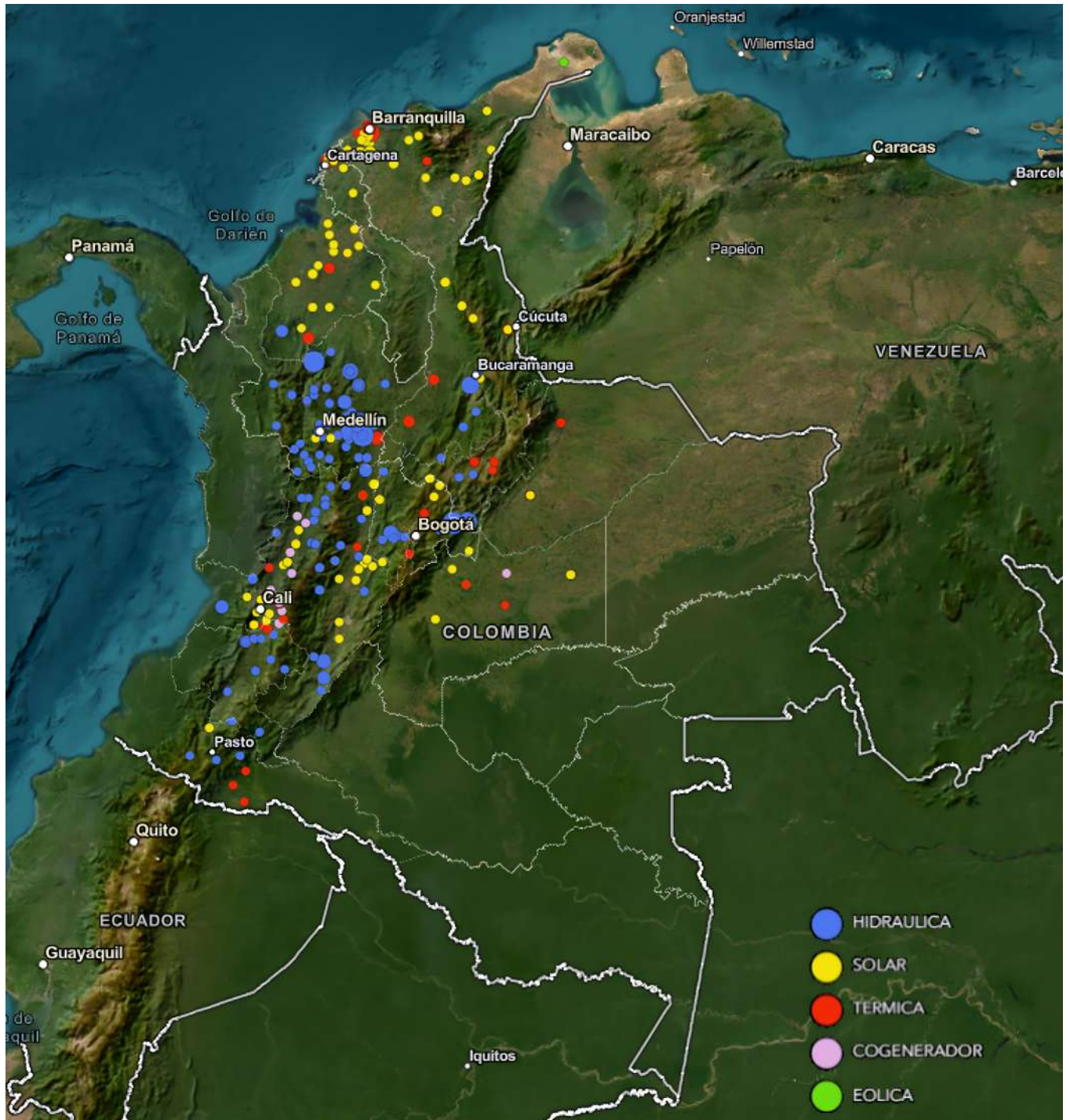
En cuanto a la capacidad asignada, de los 18.718,98 MW totales en el país, 13.563,4 MW corresponden a energía solar (UPME, 2024). Esta asignación refleja una fuerte apuesta por la generación solar en Colombia, impulsada por políticas que han promovido la inversión en energías limpias. Estas iniciativas

³ <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Geovisores.aspx>

han facilitado el desarrollo de proyectos solares, consolidando esta tecnología como una de las fuentes de energía con mayor capacidad asignada en los últimos años.

La distribución de los proyectos solares en el país se concentra principalmente en las regiones del norte, como los departamentos de Córdoba, Sucre, Magdalena y Atlántico, que cuentan con condiciones favorables para la captación de radiación solar. También destacan los departamentos de Valle del Cauca y Tolima (ver Figura 15). Esta localización permite aprovechar de manera óptima los recursos naturales y facilita la conexión a la red nacional de electricidad, lo que contribuye a una distribución más estable y confiable de la energía generada.

Figura 15. Localización de los proyectos de generación de energía en Colombia



Fuente: Geovisor de generación en Colombia ⁴

⁴ <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Geovisores.aspx>

Colombia continúa ampliando y diversificando su matriz energética con un enfoque hacia la sostenibilidad, aumentando la participación de energías renovables y reduciendo su dependencia de fuentes tradicionales. En este contexto, la energía solar, se ha consolidado como un componente clave en la estrategia energética del país, impulsando un sistema más diversificado y orientado hacia un modelo de desarrollo sustentable. Esta expansión no solo responde a la creciente demanda energética, sino que también refuerza el compromiso del país con la reducción de emisiones y la transición hacia un futuro más sostenible.

3.2.2. PROYECCIÓN DE PANELES SOLARES Y DEMANDA DE RECURSOS PARA EL ESCENARIO DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Como se mencionó en el capítulo 3.2, “Energía solar en Colombia”, el PEN 2022-2052 establece diferentes escenarios, siendo el de transición energética el que presenta las metas más ambiciosas para incrementar la capacidad de generación de energía solar. Este escenario proyecta entre 24.094 MW y 32.000 MW de capacidad instalada para 2052 (ver Figura 13) (UPME, 2022). Para alcanzar estos objetivos, es fundamental calcular la infraestructura requerida en términos de paneles solares y los recursos minerales asociados, con un enfoque particular en la sílice.

Para este análisis, se ha tomado como referencia el panel solar JA Solar 500W Deep Blue 3.0, una opción ampliamente utilizada en el mercado fotovoltaico nacional. Este panel cuenta con tecnología de células monocristalinas PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), una potencia nominal de 500 W, dimensiones de 2.093 x 1.134 x 30 mm y peso aproximado de 26,3 kg. Su popularidad radica en su facilidad de uso e integración, siendo adecuado

tanto para proyectos de pequeña como de gran escala, además de ofrecer durabilidad y facilidad de instalación (JA Solar. , (s.f.))

Con base en las especificaciones de dicho panel, se estima que para alcanzar la meta mínima de 24.094 MW se requerirían aproximadamente 48,2 millones de paneles solares. Para el límite superior de 45.000 MW, la demanda ascendería a cerca de 90 millones paneles. Este cálculo se realiza mediante la fórmula:

$$\text{Cantidad de paneles} = \text{Capacidad proyectada (W)} / \text{Potencia del panel (W)}$$

Estos valores permiten proyectar la demanda de recursos minerales necesarios para la fabricación de los módulos, con un enfoque particular en la sílice, un material crítico para asegurar la producción local de paneles solares. También es importante mencionar que la fabricación de las obleas de silicio y del vidrio protector de las células fotovoltaicas requiere sílice de alta pureza. El procesamiento de dicho mineral hasta la obtención de las células o el vidrio se especifica en el Capítulo 4: ANÁLISIS DE LA CADENA PRODUCTIVA.

Con respecto a los requerimientos del sílice, se estima que para obtener 1 kg de silicio de grado metalúrgico son necesarios alrededor de 6,5 kg de sílice (Hallam, y otros, 2022). En el caso del panel de referencia, JA Solar 500W Deep Blue 3.0, se requieren entre 1,75 y 2 kg de silicio de grado metalúrgico, por lo tanto, se necesitarían aproximadamente entre 11,4 y 13 kg de sílice para cumplir con este requerimiento.

Adicionalmente, el panel cuenta con un vidrio protector de 3,2 mm de espesor, con un peso aproximado de 16 kg. Considerando que la producción de 1 kg de vidrio requiere aproximadamente 1,2 kg de sílice (Ceccaroli, Øvrelid, & Pizzini, 2017), se estima que el vidrio protector de cada panel demanda alrededor de 19,2 kg de mineral.

Tabla 4. Resumen de requerimientos aproximados de sílice para la fabricación de un panel solar JA Solar 500W Deep Blue 3.0

| COMPONENTE | TIPO DE MATERIAL | CANTIDAD APROXIMADA (KG) |
|----------------------|------------------|--------------------------|
| Obleas de Silicio | Sílice | 12,2 |
| Vidrio de Protección | Sílice | 19,2 |
| Total | | 31,4 |

Fuente: Calculado a partir de (Ceccaroli, Øvrelid, & Pizzini, 2017) (Hallam, y otros, 2022)

Ahora bien, relacionando el requerimiento aproximado de sílice necesario para fabricar un panel con la cantidad proyectada de paneles requeridos para alcanzar las metas mínima y máxima del PEN, se puede estimar la demanda total de sílice (ver Tabla 5). Para este cálculo, se asume que la capacidad y las características de los paneles se mantienen homogéneas en el tiempo, y que los procesos de beneficio conservarán las mismas necesidades de materia prima, entre otros factores.

Esta información permite visualizar la magnitud de los recursos necesarios para cumplir con las metas del PEN, proporcionando una base sólida para la planificación y gestión sostenible de las reservas de arena silíceas en Colombia.

Tabla 5. Demanda total de sílice para la fabricación de los paneles solares en los escenarios extremos del PEN

| PROYECCIÓN DE CAPACIDAD (MW) | CANTIDAD DE PANELES REQUERIDOS | SÍLICE REQUERIDA (TONELADAS) |
|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 24.094 | 48.188.000 | 1.513.103,2 |
| 32.000 | 64.000.000 | 2.009.600,0 |

Fuente: Calculado a partir de (Ceccaroli, Øvrelid, & Pizzini, 2017) (Hallam, y otros, 2022)

La fuente de sílice en el país son las arenas silíceas. Como se mencionó en el capítulo 2.1.2 Recursos y Reservas, en Colombia se estiman 144.287.419,45

toneladas de recursos medidos de arenas silíceas, mientras que las reservas probadas alcanzan 72.444.747,04 toneladas⁵ (Ver Tabla 1). Cabe recordar que estas reservas corresponden únicamente a los siete títulos mineros que, hasta el momento, cumplen con el Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales (ECRR). No obstante, el SGC ha identificado áreas con potencial que podrían incrementar los recursos disponibles.

Con base en las cifras actuales, la demanda proyectada para el escenario de 32.000MW representaría apenas el 2,77% de estas reservas, lo que indica que la cantidad de mineral disponible es suficiente para satisfacer las necesidades hasta 2052, sin comprometer de manera sustancial las reservas existentes.

Por otro lado, como se muestra en el capítulo 2.2 Volúmenes de explotación del mineral, la tasa anual de extracción de arenas silíceas en Colombia ha variado en los últimos años, reflejando fluctuaciones en la demanda y ajustes en la capacidad productiva (ver Figura 3). El promedio de explotación de los últimos cuatro años es de 545.049,9 toneladas anuales.

Tabla 6. Tasa de producción anual de arenas silíceas en Colombia

| AÑO | PRODUCCIÓN (TONELADAS) ⁵ |
|------|-------------------------------------|
| 2020 | 321.068,8 |
| 2021 | 231.299,2 |
| 2022 | 403.056,0 |
| 2023 | 470.288,0 |

Fuente: construcción propia con datos de la ANM, 2024

Adicionalmente, el consumo histórico promedio de arenas silíceas en el país

⁵ Se toma la densidad de 1.6 t/m³ para la arena silícea se basa en información de la (Engineering ToolBox, 2024)

es de 406.235,2 toneladas anuales (ver Tabla 7), las cuales son destinadas principalmente a la industria del vidrio. Por lo tanto, al comparar la producción y el consumo estimado, se puede concluir que es posible mantener la producción de sílice para el consumo interno e incluir el volumen necesario para el escenario más ambicioso del PEN, sin requerir una expansión drástica de la capacidad productiva actual.

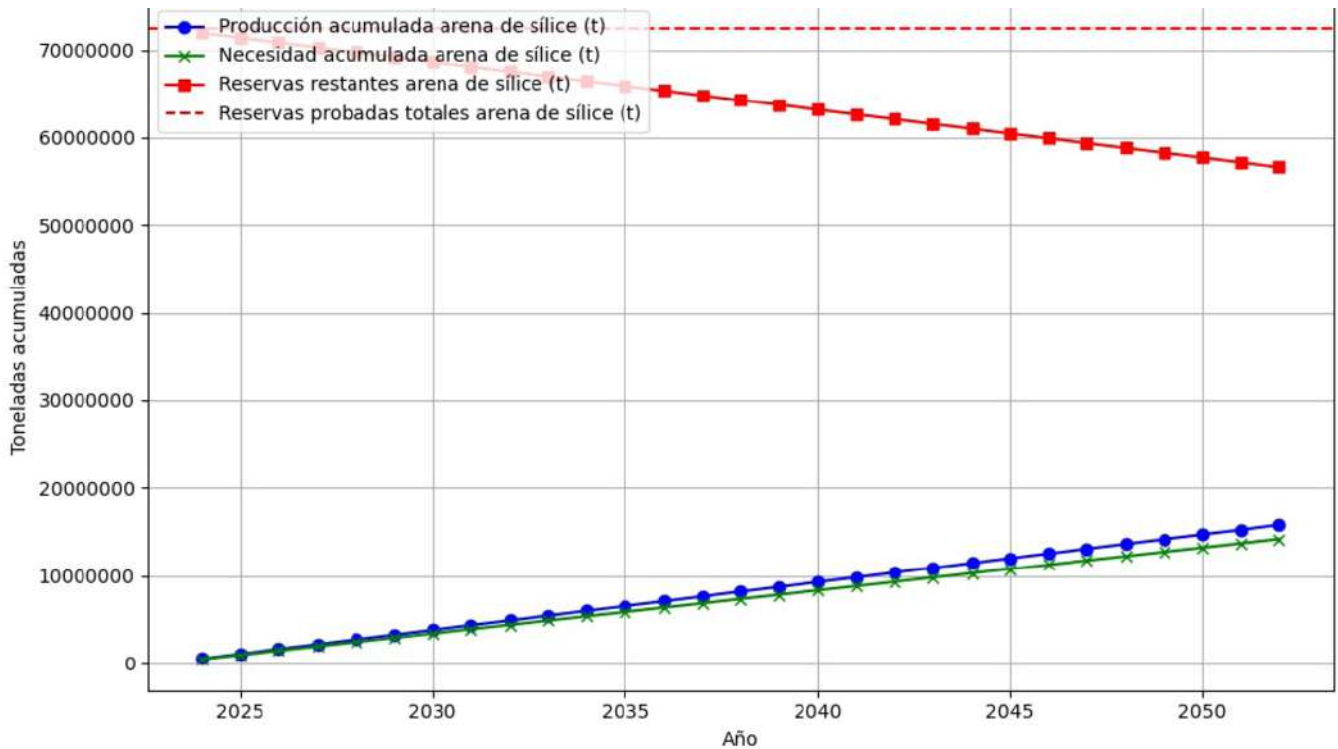
Tabla 7. Consumo anual de arenas silíceas en Colombia (2012-2016)

| AÑO | CONSUMO (T) |
|-----------------|------------------|
| 2012 | 390.126,4 |
| 2013 | 423.014,4 |
| 2014 | 404.824,0 |
| 2015 | 376.486,4 |
| 2016 | 436.724,8 |
| PROMEDIO | 406.235,2 |

Fuente: UPME, Balance Nacional de Minerales 2012-2016

La Figura 16 presenta la proyección acumulada de la producción, el consumo histórico y la demanda total de arenas silíceas en Colombia hasta el año 2052. Este análisis considera tanto la cantidad de sílice requerida para la fabricación de paneles solares (células y vidrio), así como el consumo promedio histórico en sectores como la industria del vidrio y otros productos industriales.

Figura 16. Proyección de producción, necesidad y consumo de reservas de arenas silíceas.



Fuente: construcción propia a partir de datos de 7 títulos reportados ante la ECRR, ANM, y el Balance Nacional de Minerales 2012-2016 de la UPME.

Estas cifras demuestran que Colombia cuenta con un importante potencial de reservas probadas de arenas silíceas para satisfacer la demanda proyectada de la industria solar, según el Plan Energético Nacional (PEN). Sin embargo, este potencial está condicionado a factores como el aumento de la capacidad productiva, la incorporación de nuevos títulos mineros y la gestión sostenible de los recursos.

La existencia de recursos y reservas de alta pureza no garantiza por sí misma una oferta estable. Esto requiere una planificación estratégica que contemple tanto el crecimiento de la demanda interna como las necesidades futuras del sector tecnológico. Este enfoque es crucial para consolidar la transición

energética del país y fomentar una industria sostenible que provea materiales esenciales para tecnologías limpias.

3.3. ARENAS SILÍCEAS

Las cifras que se muestran a continuación, así como las relacionadas en los capítulos 3.4; 3.5 y 3.6 son extraídas del sitio web Trade map y corresponden a consultas realizadas en noviembre de 2024 (International Trade Centre , 2024).

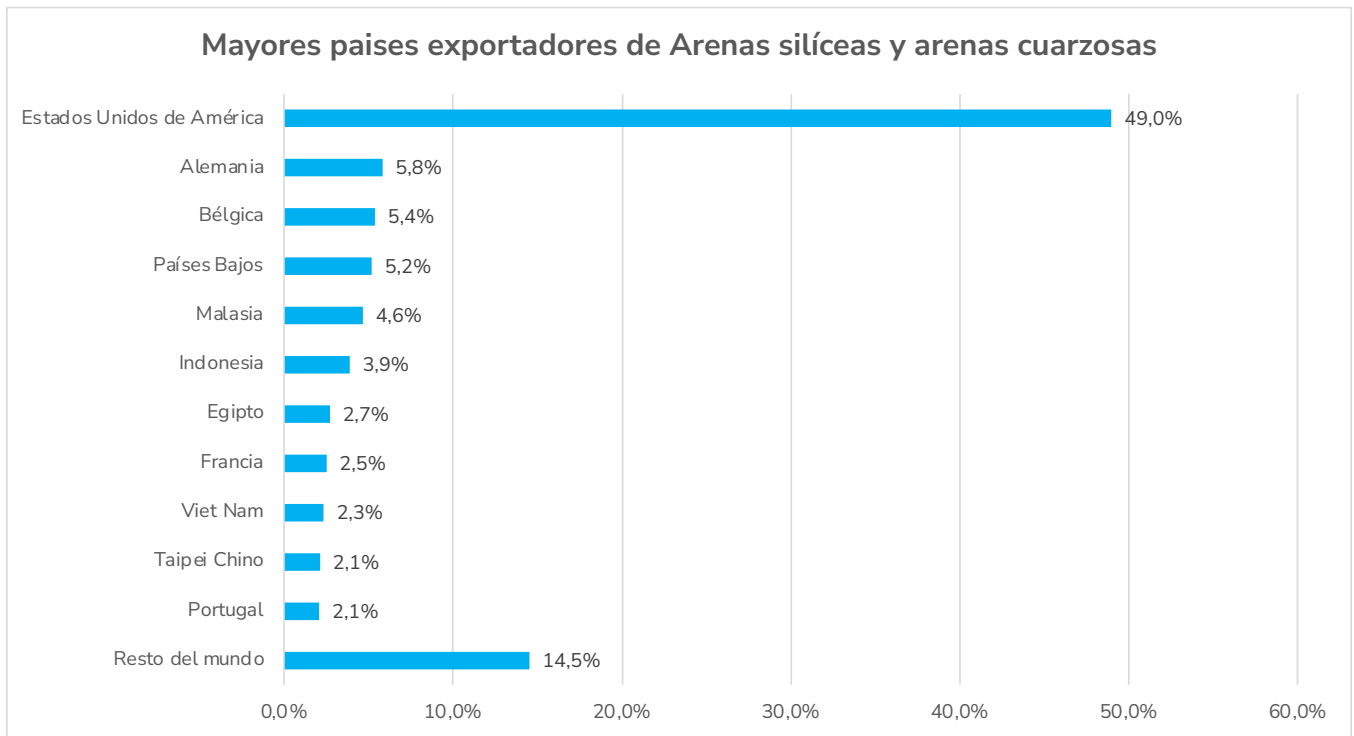
3.3.1. MERCADO INTERNACIONAL

Las exportaciones globales de arenas silíceas y arenas cuarzosas (código arancelario 250510) han mostrado un crecimiento sostenido en los últimos tres años. En 2021, el incremento fue del 11% con respecto al año anterior, alcanzando la cifra de USD 1.090 millones. Para el año 2022, el crecimiento fue del 9,8%, mientras que para el año 2023 se registró un aumento récord del 26,7%, llegando a USD 1.516 millones.

Este comportamiento estuvo impulsado en gran medida por el aumento de la participación de los Estados Unidos, el principal país exportador. El crecimiento anual promedio del valor de sus exportaciones entre 2021 y 2023 fue del 27,7%, y su participación en las exportaciones mundiales pasó del 36,4% en 2020 al 49% en 2023. Los principales destinos de exportación de los Estados Unidos en 2023 fueron China (37,5%), Canadá (37,3%), Japón (6,9%), Noruega (5,8%) y México (5,6%). Estos países representaron el 93,1% del total de las exportaciones estadounidenses.

A continuación, se presentan los principales países exportadores de arenas silíceas y arenas cuarzosas en el mundo, según su valor en dólares para el año 2023:

Figura 17. Mayores países exportadores de arenas silíceas y arenas cuarzosas en 2023.



Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 250510

Así mismo, el siguiente gráfico representa la cantidad exportada de arenas silíceas y arenas cuarzosas de los principales países en los años comprendidos entre 2021 y 2023:

Figura 18. Cantidad Exportada Arenas Silíceas y Cuarzo

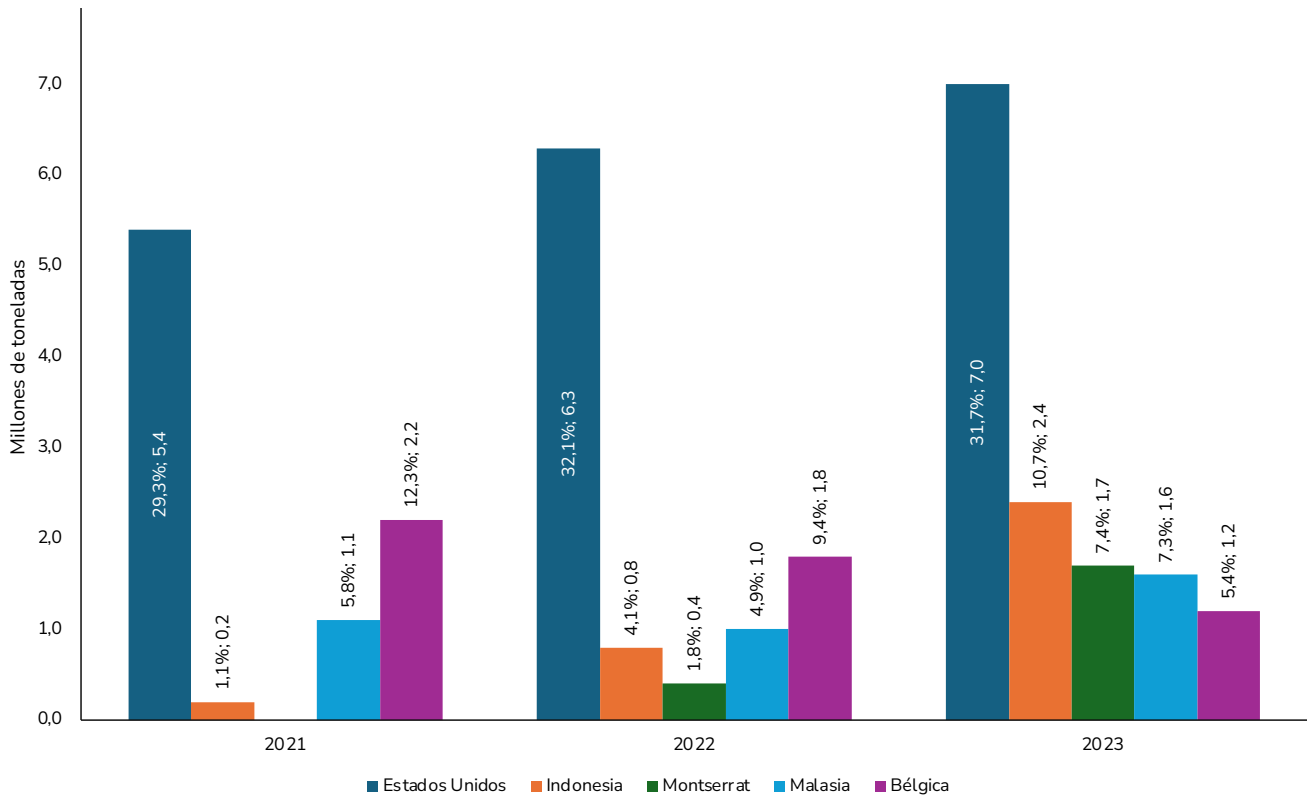


Figura 18. Cantidad Exportada Arenas Silíceas y Cuarzo

Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 250510

Ahora bien, en cuanto a la importaciones de arenas silíceas y arenas cuarzosas, el total para el año 2023 fue de USD 1.680 millones, lo que representa un leve descenso del -0,5% frente al total importado en 2022.

El principal país importador fue China, que en 2023 alcanzó una cifra de USD 333 millones, es decir, un 19,9% de las importaciones totales del mundo. Esta cifra resulta ser superior en un 60,4% a lo registrado en 2022. El segundo mayor importador de arenas silíceas y arenas cuarzosas en el 2023 fue Canadá, con una participación del 16,3%. Cabe desatacar que, históricamente, este país ocupaba el primer lugar en importaciones hasta lo sucedido con China en 2023.

A continuación, se presentan los principales países importadores de arenas silíceas y arenas cuarzosas en el mundo:

Figura 19. Mayores países importadores de Arenas silíceas y arenas cuarzosas

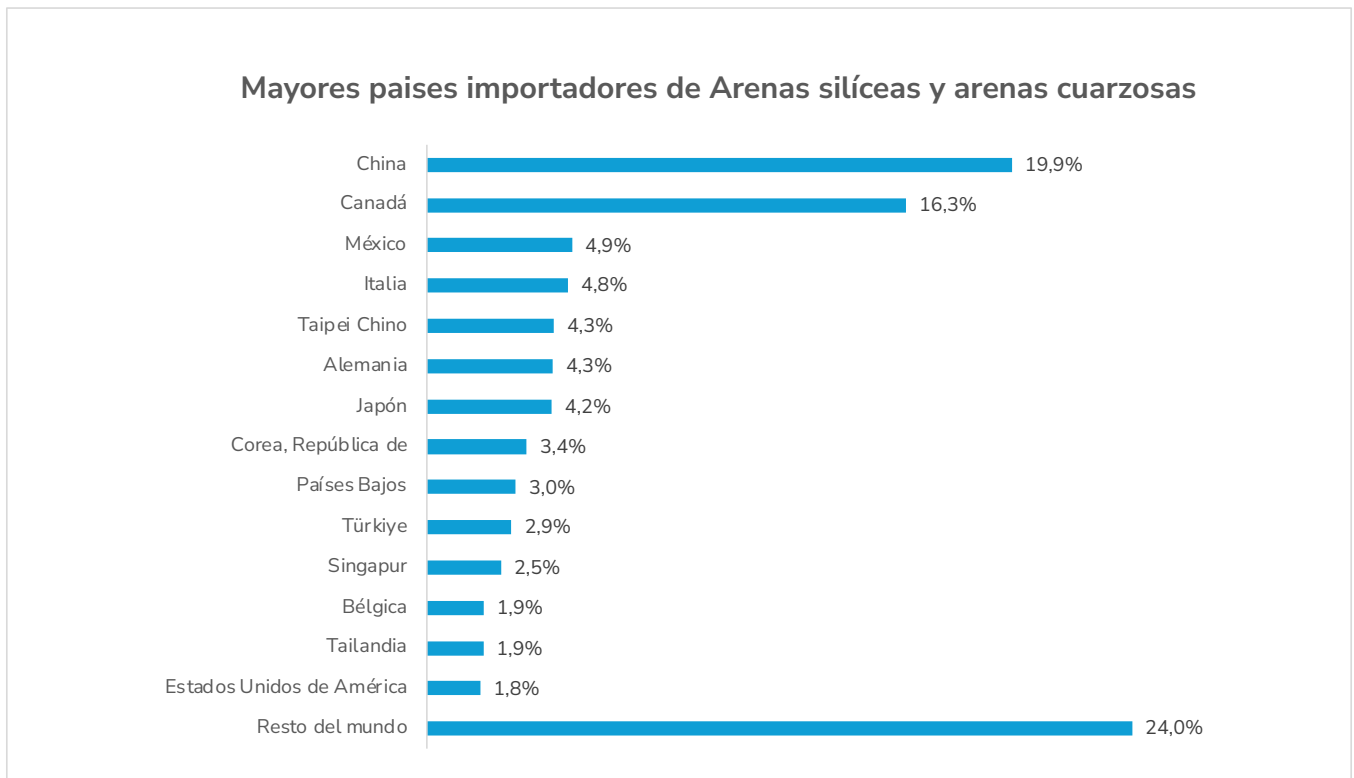
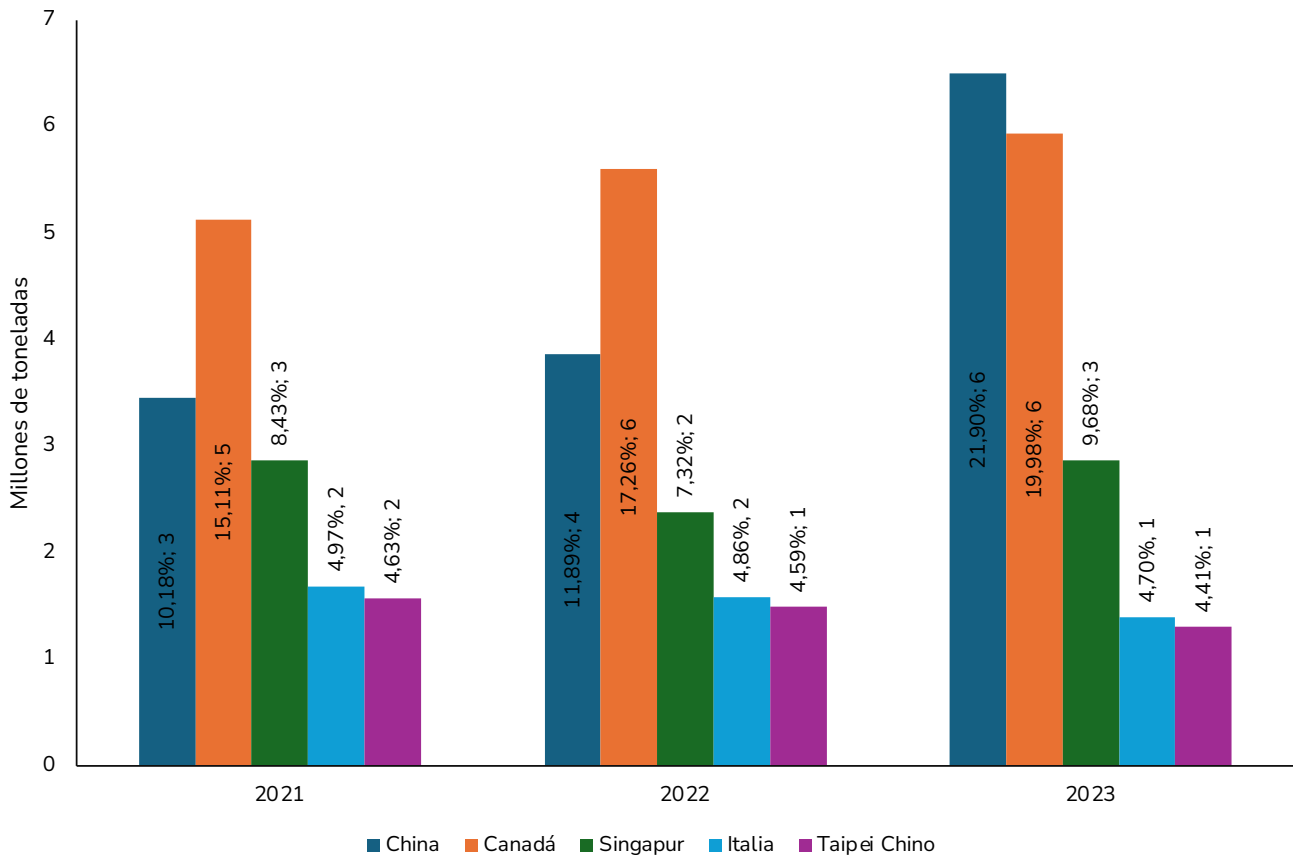


Figura 19. Mayores países importadores de Arenas silíceas y arenas cuarzosas

Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 250510

El siguiente gráfico muestra las cantidades importadas por los principales actores internacionales:

Figura 20. Cantidad Importada Arenas Silíceas y cuarzos



Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 250510

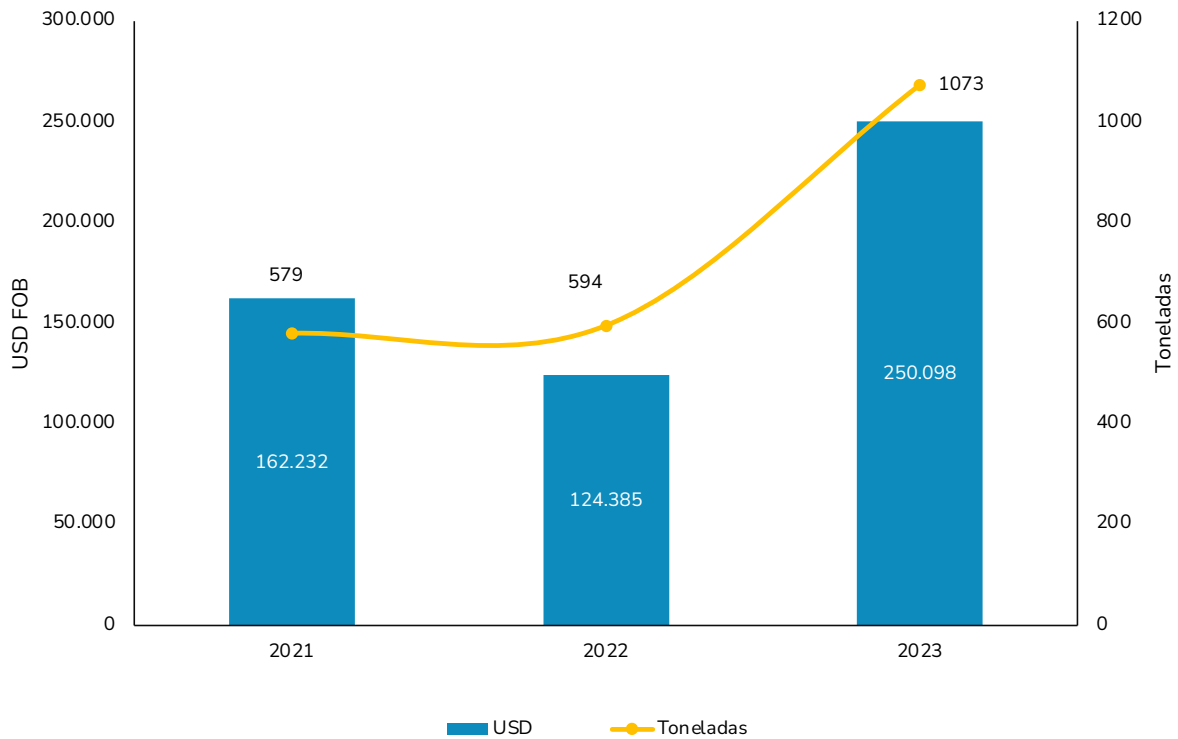
De acuerdo con lo anterior, Estados Unidos exporta casi la mitad de las arenas silíceas y arenas cuarzosas que consume el mundo, lo que contrasta con la posición de China, el mayor importador. En este contexto, el país asiático es dominante en la transformación de la arena silícea, y, por tanto, en la elaboración de productos con valor agregado a partir de este mineral, como las células fotovoltaicas. Por su parte, Estados Unidos no desempeña un rol determinante en la producción de estas cadenas de valor a nivel mundial. Este fenómeno se explica por las inversiones agresivas realizadas en recientes años y la atracción de talento global por parte de China (REVE, 2024).

Sin embargo, la situación de China como líder casi único de la fabricación de paneles solares ha comenzado a cambiar, o al menos así parece en el corto plazo. Países como Australia y el mismo Estados Unidos, que cuentan con grandes reservas de arenas silíceas y cuarzosas, proyectan un incremento en la inversión orientada a la fabricación de células fotovoltaicas, lo que daría lugar a un crecimiento mundial de la industria. Esto favorecería, a su vez, la consolidación de mercados emergentes que proveen materias primas e insumos intermedios.

3.3.2. BALANZA COMERCIAL

Las exportaciones de arenas silíceas y arenas cuarzosas de Colombia en 2023 representaron el 0,016% del valor total del mundo, lo que significa que Colombia este ubicado dentro de los 8 mayores países exportadores de América Latina. El valor total de las exportaciones en 2023 fue de US 250 mil. La siguiente gráfica evidencia el comportamiento de las exportaciones de Colombia, tanto en valores como en cantidades:

Figura 21. Exportaciones colombianas de arenas silíceas y cuarzo

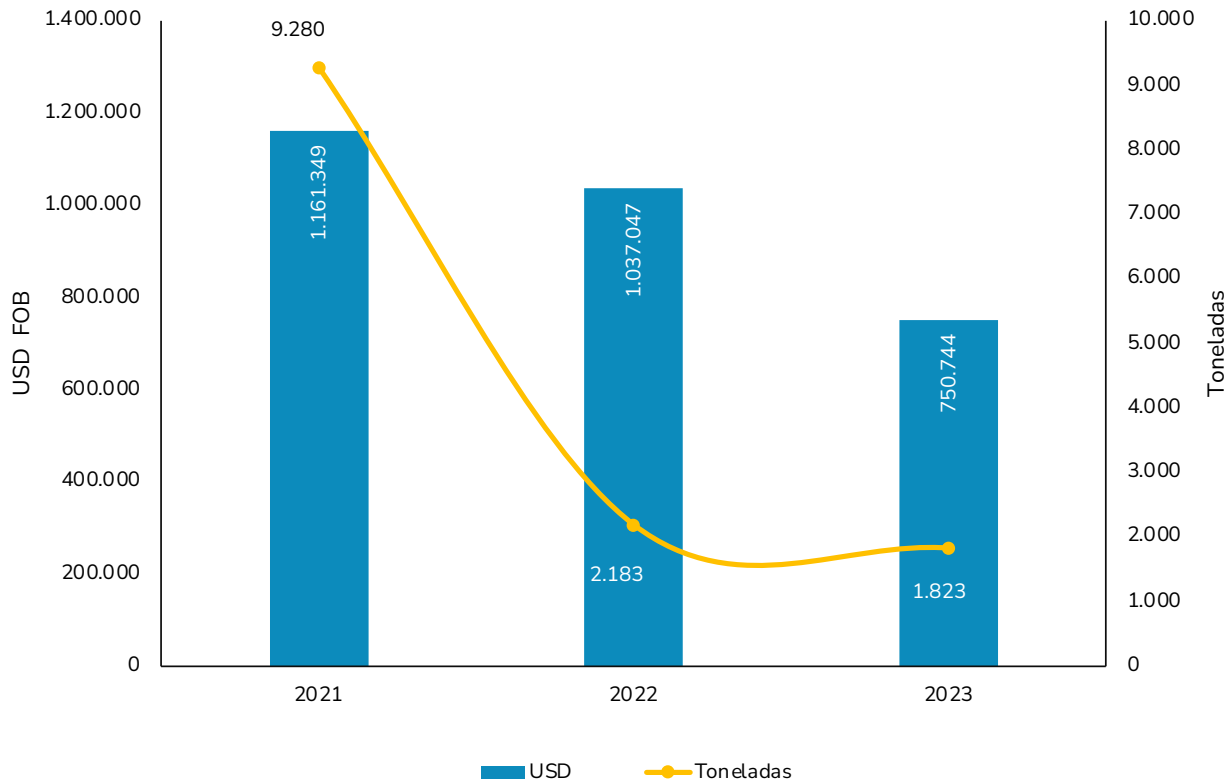


Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 250510

En 2023, los principales destinos de exportación de arenas silíceas y cuarzo de Colombia fueron Panamá (65%), Ecuador (18%), Aruba (13%) y República Dominicana (2%).

Con relación a las importaciones, Colombia ha venido disminuyendo el valor de estas. Mientras que en 2021 el total importado fue de USD 1,16 millones en 2021, en 2023 este se redujo a USD 750 mil, lo que representa una reducción del 35%. La siguiente gráfica muestra el comportamiento de las importaciones de Colombia, tanto en valores como en cantidades.

Figura 22. Importaciones de arenas silíceas



Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 250510

La principales importaciones de arenas silíceas y arenas cuarzosas provinieron de Estados Unidos (61%), Perú (15%), España (7%), Bélgica (7%) y Portugal (3%). Estas importaciones están asociadas principalmente a empresas relacionadas con productos de arenas para construcción, ladrillos, piedras y materiales afines.

Debido a estos último, es posible inferir que las arenas silíceas y cuarzosas importadas a Colombia no se destinan a la fabricación de vidrios, por lo que se hace uso de las arenas extraídas dentro del territorio nacional para esta actividad, entre los otros usos principales, como en materiales de construcción. Así mismo, este hecho puede estar relacionado con la calidad de las arenas exportadas, que podrían ser aptas para la fabricación de bienes con valor

agregado. Sin embargo, debido a lo reducido de los valores y cantidades, así como a la falta de información disponible, no es posible validar el supuesto.

3.4. SILICIOS (GRADO METALÚRGICO Y POLISILICIO)

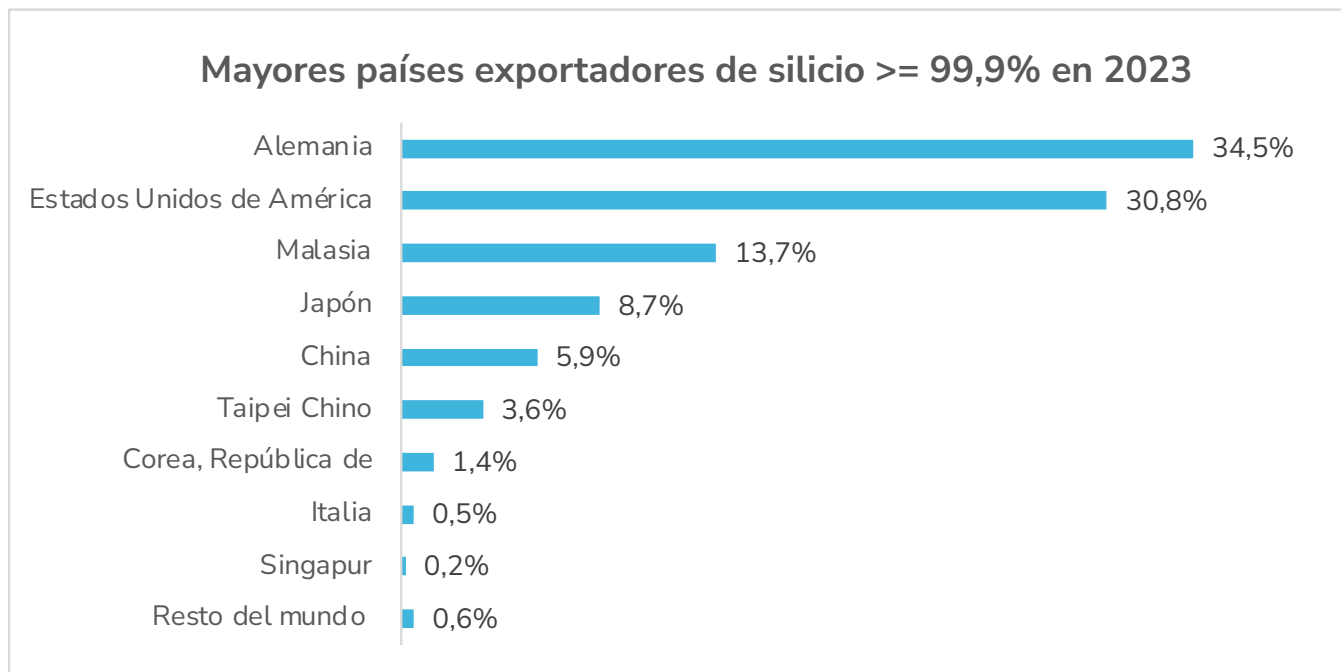
Para comprender de manera adecuada el panorama del mercado de silicios, es importante distinguir entre dos tipos de productos: el silicio con contenidos iguales o mayores al 99,9% (código arancelario 280461) y el silicio con un contenido inferior a dicho porcentaje (código arancelario 280469).

3.4.1. MERCADO INTERNACIONAL

En cuanto al silicio con un contenido igual o superior al 99,9%, las exportaciones mundiales en 2023 sumaron USD 4.240 millones, lo que representa una reducción del 26,8% frente al total exportado en 2022. Los principales países exportadores en el mundo son Alemania y Estados Unidos, que entre 2021 y 2023 representaron, en promedio, el 35% y el 28% del total de las exportaciones globales, respectivamente.

La siguiente gráfica relaciona los principales exportadores a nivel mundial para el año 2023:

Figura 23. Mayores países exportadores de silicio $\geq 99,9\%$ en 2023



Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 280461

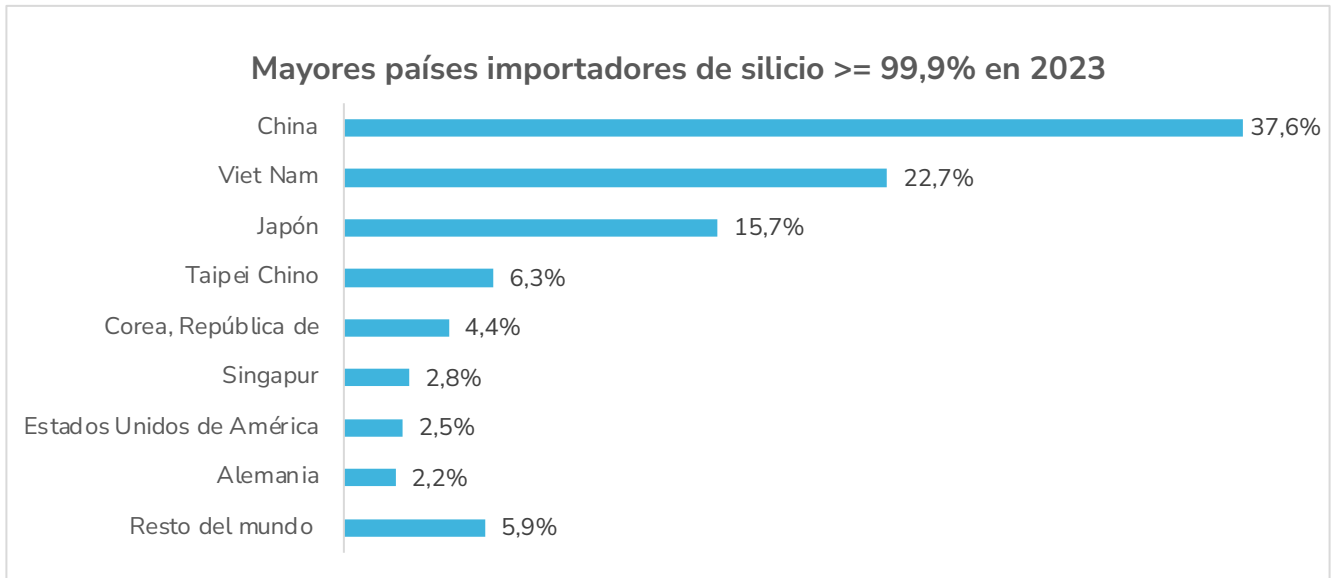
Con relación a las importaciones de silicio con un contenido igual o superior al 99,9%, en el mundo, la cifra registrada en 2023 fue de USD 4.764 millones, lo que representa una reducción del 17,9% frente a lo registrado en el año inmediatamente anterior.

El país con las mayores importaciones fue China, que, a pesar de una reducción del 34,8% frente al año anterior, alcanzó una participación del 37,6% sobre el total global. En segundo lugar, se ubicó Vietnam, que tuvo un crecimiento en sus importaciones de casi 13 veces entre 2021 y 2023, lo que se refleja su participación sobre las importaciones totales en 2023 del 22,7%. Renglón seguido a estos países esta Japón, que registró una participación del 15,7% del total de importaciones del año 2023.

A continuación, se presentan los principales importadores de silicio con un

contenido igual o superior al 99,99% en el año 2023.

Figura 24. Mayores países importadores de silicio $\geq 99,9\%$ en 2023



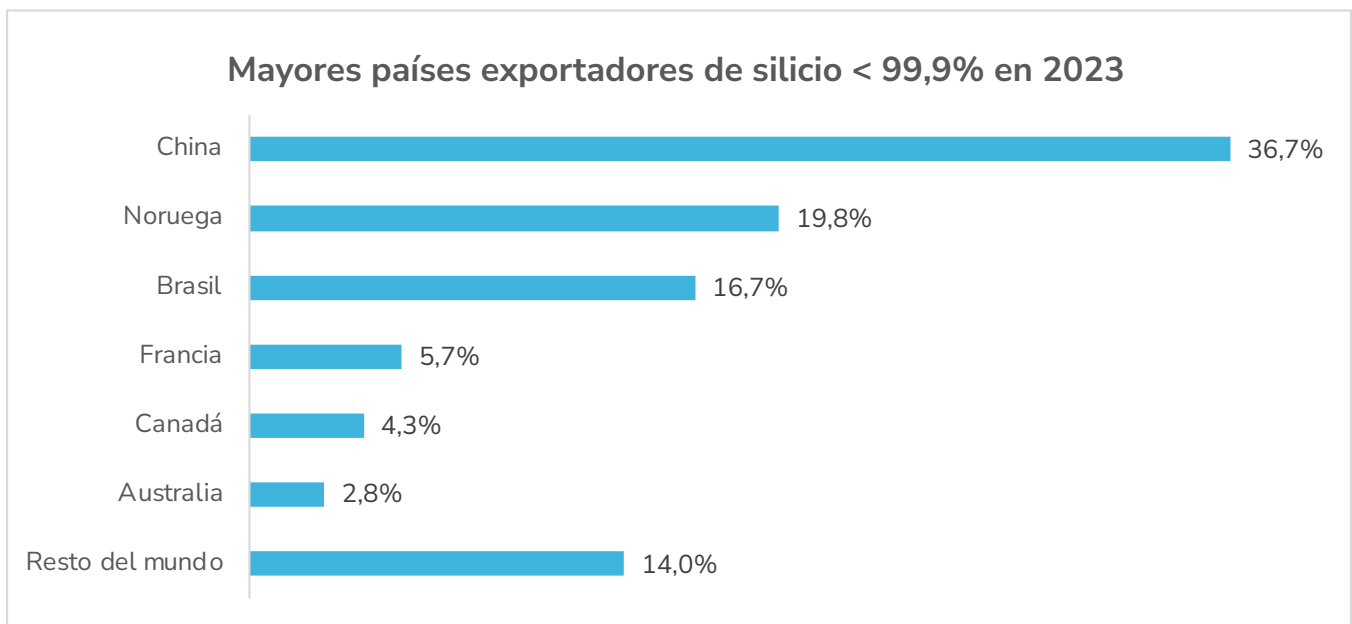
Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 280461

La anterior gráfica, muestra la concentración del mercado de las importaciones de silicio con un contenido igual o superior al 99,9% por parte de los países de Asia. Esto se traduce en que esta región sea la mayor fabricante de dispositivos electrónicos y células fotovoltaicas en el mundo, concentrando la producción mundial de silicio $\geq 99,9\%$ para su transformación en bienes terminados. Lo anterior, tiene que ver con los bajos costos de fabricación de bienes terminados en los países asiáticos, así como con sus capacidades técnicas y tecnológicas superiores para agregar valor a los bienes manufacturados, situándolos por encima de regiones como América y Europa.

Por su parte, el silicio con un contenido inferior al 99,99% registra exportaciones menores en comparación con el silicio $\geq 99,99\%$, con una diferencia del -7,5%. Para el año 2023, estas exportaciones sumaron un total de USD 3.920 millones, siendo los principales exportadores China (36,7%), Noruega (19,8%) y Brasil

(16,7%). Es importante destacar que los tres países han venido reduciendo las exportaciones totales. En el caso de China, la reducción fue del 41% entre 2021 y 2023, mientras que para el caso de Noruega y Brasil la reducción en 2023 frente al año anterior fue del 26,1% y el 31,7%, respectivamente.

Figura 25. Mayores países exportadores de silicio <99,9% en 2023

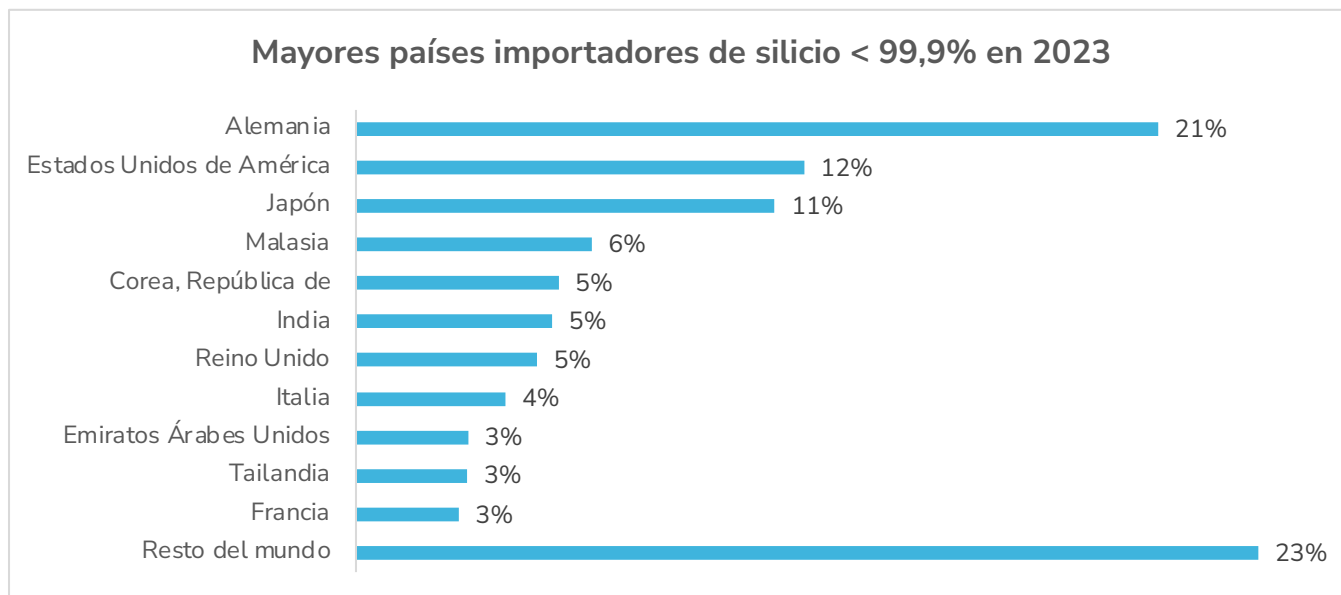


Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 280469

Frente a las importaciones de silicio con un contenido inferior al 99,99%, la cifra se redujo drásticamente en 2023, registrando una disminución del 38% frente a lo reportado en 2022. El mayor importador del mundo fue Alemania, que, aunque redujo su volumen en un 26% frente al año anterior, mantuvo su participación del 20,7% en el total importado globalmente.

A continuación, se muestran los principales países importadores en 2023:

Figura 26. Mayores países importadores de silicio <99,9% en 2023



Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 280469

3.4.2. BALANZA COMERCIAL

En el caso de Colombia, las exportaciones e importaciones de silicio con un contenido igual o superior al 99,99% fueron inexistentes en 2023.

Por su parte, las exportaciones en 2023 de silicio con un contenido inferior al 99,99% fueron de USD 52 mil, siendo el único destino Ecuador. En cuanto a las importaciones, estas sumaron USD 1,1 millones, siendo el principal proveedor China con un 97,6%, seguido por Venezuela y Corea del Sur. Sobre esto último cabe destacar que el valor de las importaciones se redujo frente al año anterior en un 47%. Así las cosas, la balanza comercial de silicio con un contenido inferior al 99,99 es deficitaria.

3.5. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ENSAMBLADAS O NO EN MÓDULOS O PANELES

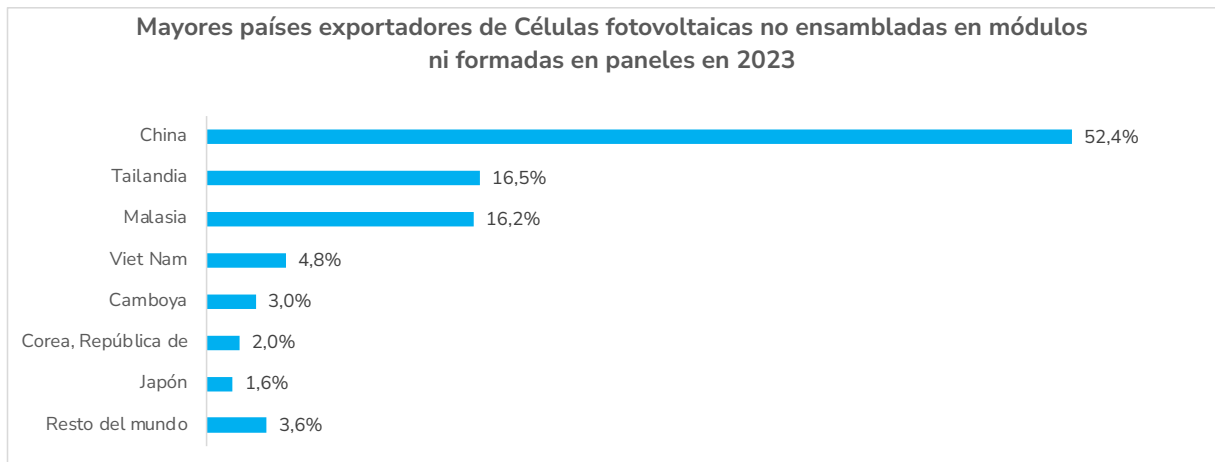
Con relación a la producción de células fotovoltaicas, existen dos códigos arancelarios: el primero corresponde a células fotovoltaicas que no están ensambladas en módulos ni formadas en paneles (854142), y el segundo se refiere a aquellas que si están ensambladas en módulos o formadas en paneles (854143). Esta codificación del Sistema Armonizado, vigente desde 2022, permite reconocer si el intercambio comercial corresponde a un bien intermedio destinado al ensamblaje de paneles o módulos solares, o si se trata de un panel o modulo solar terminado.

3.5.1. MERCADO INTERNACIONAL

Las exportaciones mundiales de células fotovoltaicas no ensambladas en módulos ni formadas en paneles (854142) alcanzaron en 2023 un total de US 7.936,2 millones, lo que representa un incremento del 15,4% frente al año anterior.

El principal exportador fue China, que en 2023 concentró el 52,3% del mercado, seguido por Tailandia (16,5%) y Malasia (16,1%). La siguiente gráfica muestra los principales exportadores en el mundo:

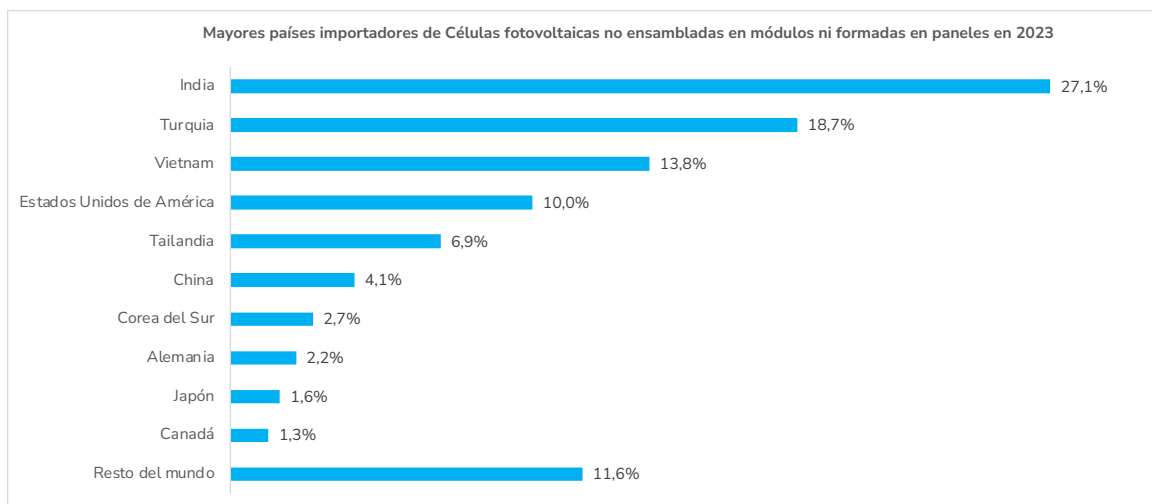
Figura 27. Mayores países exportadores de Células fotovoltaicas no ensambladas en módulos ni formadas en paneles en 2023



Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 854142

Ahora bien, con relación a las importaciones de células fotovoltaicas no ensambladas en módulos ni formadas en paneles, el incremento del año 2023 frente a 2022 fue de 4,8%, llegando a la cifra de US 7.267,9 millones. A continuación, se señalan los principales países importadores en 2023:

Figura 28. Mayores países importadores de Células fotovoltaicas no ensambladas en módulos ni formadas en paneles en 2023

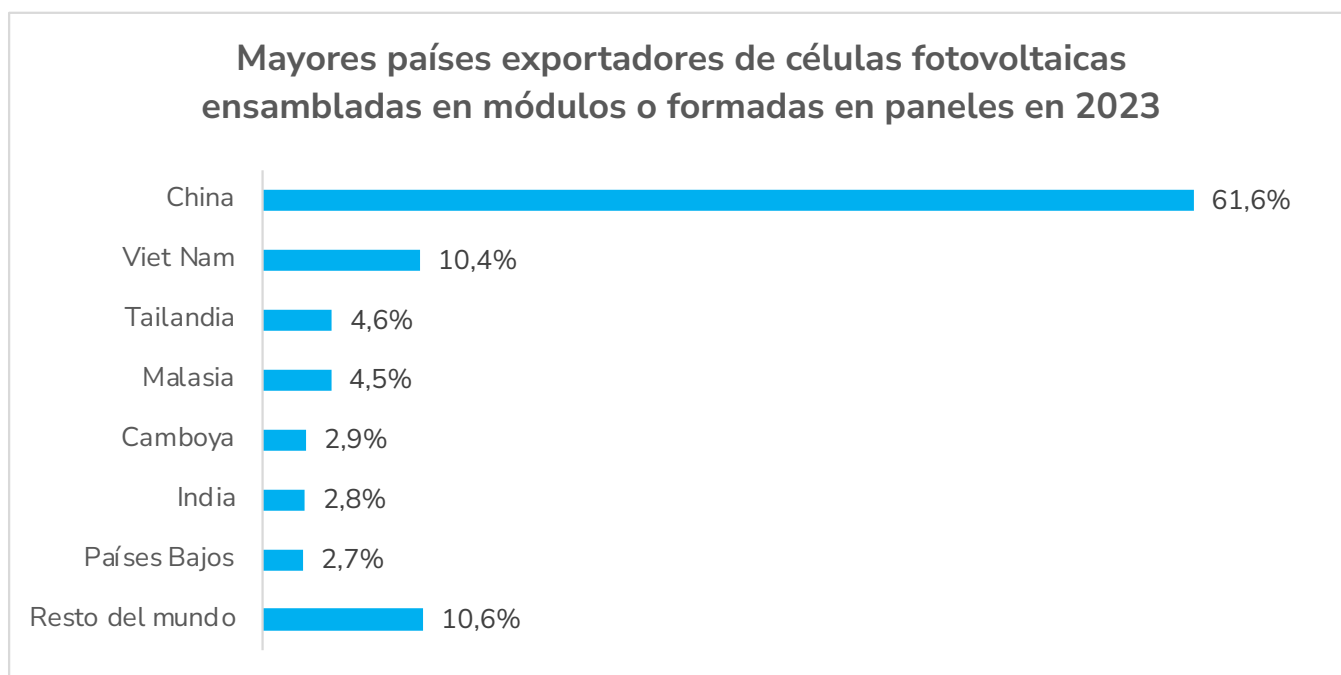


Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 854142

Por otra parte, con relación a la exportación de células fotovoltaicas ensambladas en módulos o formadas en paneles (código arancelario 854143), China continuó siendo el líder exportador en el mundo con el 61,63% del mercado en el año 2023, llegando a una cifra de US 39.537 millones.

El total de exportaciones a nivel mundial fue de US 64.150 millones, una cifra superior al año 2022 en 4%. La siguiente gráfica muestra los principales exportadores en el mundo:

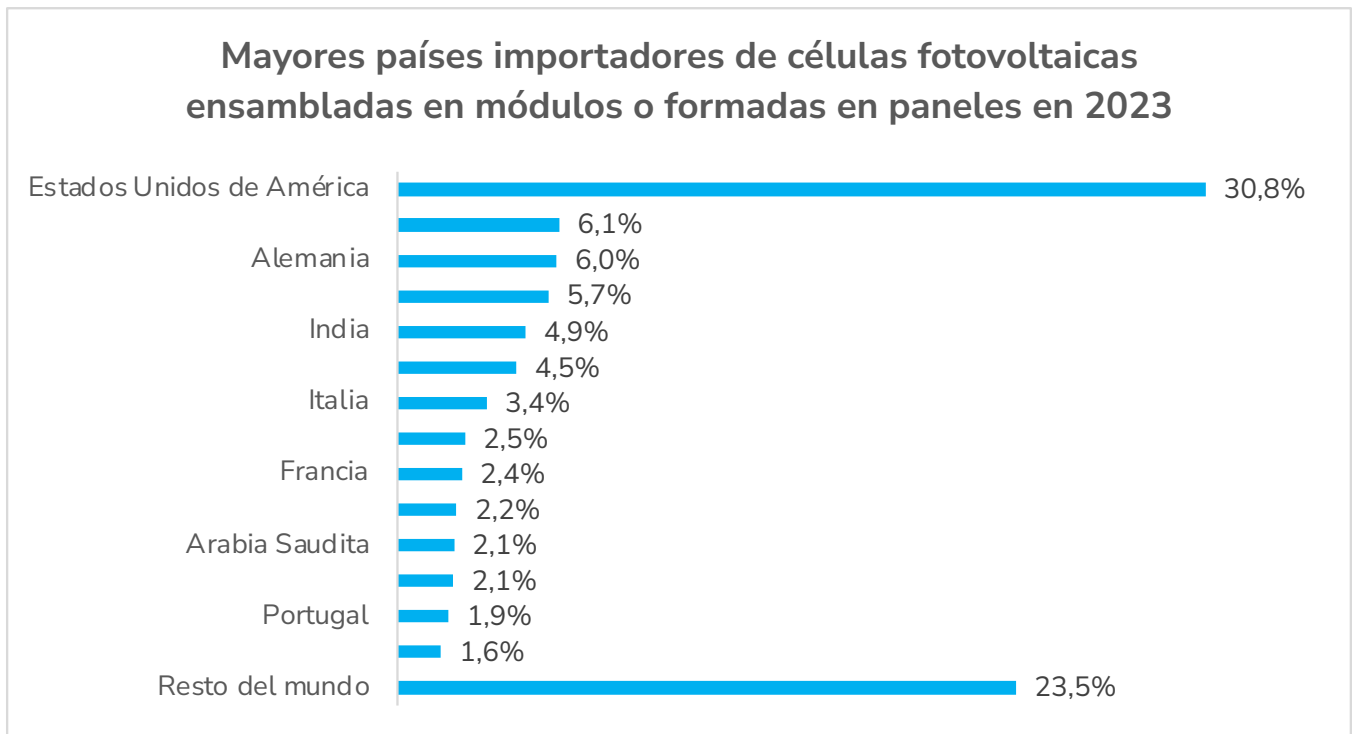
Figura 29. Mayores países exportadores de Células fotovoltaicas ensambladas en módulos o formadas en paneles en 2023



Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 854143

Frente a las importaciones de células fotovoltaicas ensambladas en módulos o formadas en paneles, su variación entre 2022 y 2023 fue del 28,7%, alcanzando un total de US 62.672 millones. Los principales importadores, que superan el billón de dólares en compras son:

Figura 30. Mayores países importadores de Células fotovoltaicas ensambladas en módulos o formadas en paneles en 2023



Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 854143

De acuerdo con el análisis del mercado internacional de células fotovoltaicas ensambladas o no en módulos o paneles, Asia y principalmente China, lidera la oferta mundial de células fotovoltaicas para el ensamblaje de paneles o módulos solares en destino, como de paneles o módulos solares ya terminados. Esta posición guarda íntima relación con el liderazgo de estos países en la importación de arenas silíceas, arenas cuarzosas y silicio con un contenido igual o superior al 99,9%. Por ello, es posible afirmar que Asia, encabezada por China, es la región que lidera la transformación de bienes orientados a la transición energética que viene ocurriendo en el mundo y que se intensificara en los próximos años.

3.5.2. BALANZA COMERCIAL

Como referencia en Colombia, frente a la fabricación de paneles solares, se encuentra Thermowire, una empresa pionera que se posiciona como una alternativa en la industria de energías renovables, ya que es la única compañía que ensambla paneles solares de diversos tipos, ha realizado inversiones en tecnología para esta industria, tiene una apuesta por la producción nacional de paneles que cumplen con estándares internacionales y capacidad de exportación.

Esta empresa cuenta con una planta ubicada en el departamento de Boyacá, donde se ensamblan paneles solares con tecnología de última generación, abarcando desde paneles monocristalinos hasta amorfos, lo que les permite adaptarse a diversas aplicaciones y necesidades del mercado. La compañía utiliza un 60% de los componentes requeridos para el ensamble de paneles de origen local, aunque aún depende de importaciones de materiales como el silicio y el vidrio. Actualmente, la capacidad instalada de Thermowire no supera los 32 MW anuales para ensamblar paneles.

Es importante mencionar que otras compañías como Celsia, Enel, Erco Energy, entre otras, se especializan en la distribución, comercialización, instalación y/o mantenimiento de sistemas solares, contribuyendo de manera significativa al crecimiento de la industria de energías renovables en el país.

Teniendo en cuenta lo anterior, el país registra exportaciones tanto de células fotovoltaicas ensambladas en módulos o formadas en paneles como de aquellas que no lo están. Así las cosas, las exportaciones colombianas de células fotovoltaicas no ensambladas en módulos o formadas en paneles (código arancelario 854142) fueron de USD 72 mil en 2023, siendo el principal importador Ecuador con el 97%. Por su parte, las exportaciones de células fotovoltaicas ensambladas en módulos o formadas en paneles (código arancelario 854143), registraron en el 2023 la suma de 390 mil dólares, siendo los principales compradores Jamaica (38,5%), Ecuador (25,4%), República

Dominicana (14,1%), Costa Rica (8,2%) y España (5,4%).

Por otro lado, frente a las importaciones, los volúmenes comercializados en ambas partidas arancelarias son mayores en comparación con las exportaciones. En el caso de las células fotovoltaicas no ensambladas en módulos o formadas en paneles (código arancelario 854142), el valor importado en 2023 fue de US 384 mil, lo que representa una disminución del 39% frente a 2022. Esta caída podría evidenciar una posible desaceleración en la industria del ensamblaje de paneles o módulos solares en Colombia. El principal origen de estas importaciones en 2023 fue Alemania que representó el 62,5% del valor total, seguido de China con una participación del 20,5%.

Frente a la importación de células fotovoltaicas ensambladas en módulos o formadas en paneles (código arancelario 854143), el valor registrado en 2023 fue de US 400 millones, de los cuales el 99,7% provino de China. Este valor total supera al registrado en el año anterior, que fue de US 345 millones, lo que representa un incremento del 15,9%. Este aumento refleja un interés creciente a nivel nacional por avanzar hacia la transición a energías limpias.

Es importante resaltar que Colombia, en la medida en que lo permitan su estructura de costos y sus capacidades industriales, debe promover el ensamblaje de paneles o módulos solares al interior del país. Este impulso aprovecharía la expansión del mercado y favorecería no solo a las industrias locales orientadas a la fabricación del vidrio y al ensamblaje de paneles, sino también al sector minero que extrae productos asociados a los materiales requeridos para estas tecnologías.

3.6. VIDRIO

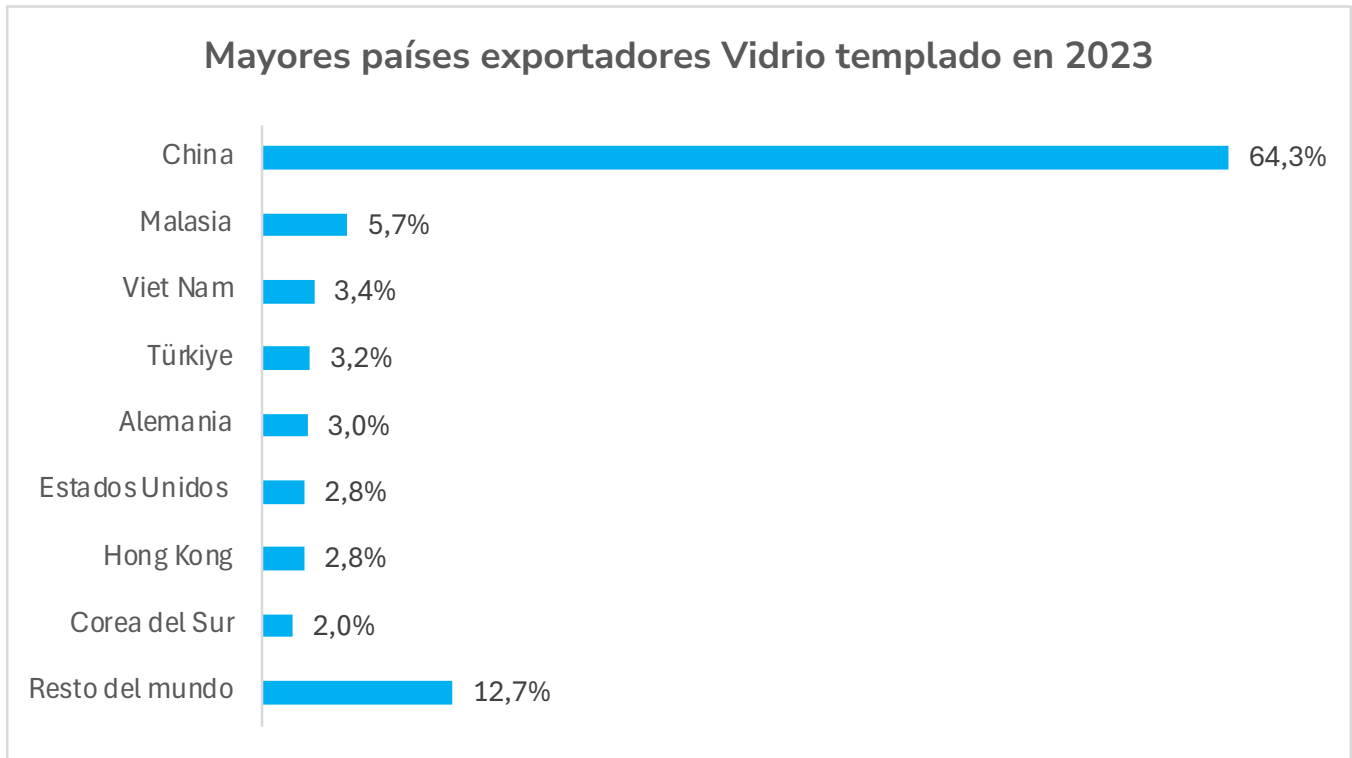
Es importante tener en cuenta que, para la producción de paneles solares, se requiere el uso de vidrio templado, asociado al código arancelario 700719. Este material es un componente esencial en los paneles solares, ya que funciona como cubierta frontal, protegiendo las células fotovoltaicas de factores externos como la suciedad, el polvo y los impactos físicos.

El vidrio templado ha sido sometido a un tratamiento térmico que incrementa significativamente su resistencia en comparación con el vidrio convencional, lo que garantiza una mayor durabilidad y seguridad en diversas condiciones ambientales.

3.6.1. MERCADO INTERNACIONAL

Las exportaciones de vidrio templado a nivel mundial registraron para el año 2023 un total de US 4.944 millones, valor superior al año 2022 en un 10% y si lo comparamos con 2019, superior en un 51,9%. La alta variación obedece principalmente a las exportaciones de China, que en 2019 sumaron US 1.683 millones representando un 51,7% de las exportaciones globales, mientras que en 2023 este valor aumentó a US 3.180 millones, lo que equivale a un crecimiento de 88,9%, y a una participación del 64,3% en el total mundial. A continuación, se muestran los principales exportadores de vidrio templado en el año 2023:

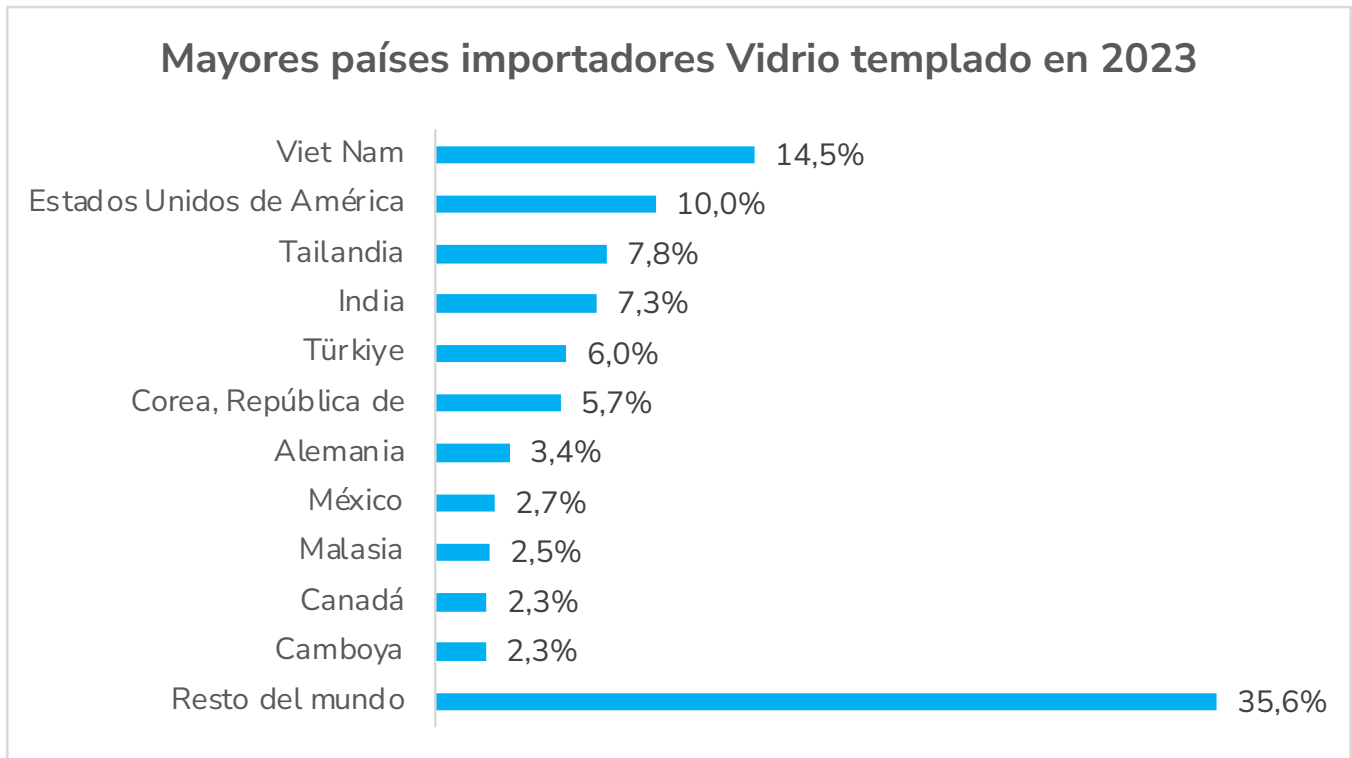
Figura 31. Mayores países exportadores de Vidrio templado



Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 700719

Con relación a las importaciones, estas registraron un total de US 4.436 millones en 2023, lo que representa un incremento de 7,5% con respecto a 2022. El mayor país importador fue Vietnam, con una participación del 14,5%, seguido por Estados Unidos, con el 10%. La siguiente gráfica presenta los países que más importaciones de vidrio templado realizaron en el año 2023.

Figura 32. Mayores países importadores de Vidrio templado



Fuente: International Trade Centre (2024) – Código arancelario 700719

3.6.2. BALANZA COMERCIAL

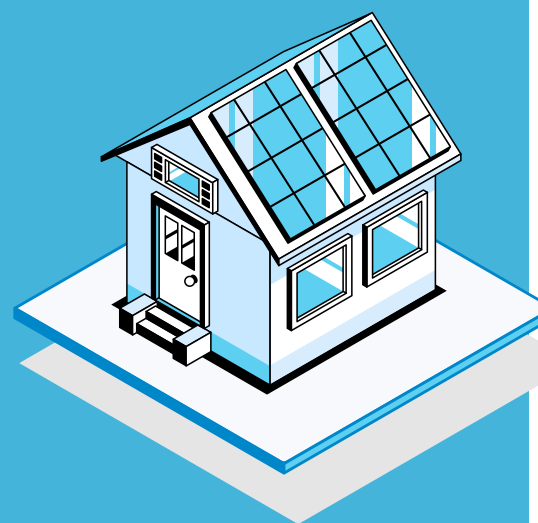
Colombia exportó US 841 mil en vidrio templado en el año 2023, una cifra 71,2% superior frente a lo registrado en 2022 (US 491 mil). El principal receptor de las exportaciones fue Estados Unidos, con una participación del 68,4%, seguido por Perú (7,6%), Curazao (5%), Barbados (4,6%) y República Dominicana (3,9%).

Con relación a las importaciones de vidrio templado, en 2023 estas registraron un valor de US 11,2 millones, lo que representa una disminución del 22,3% en comparación con 2022 y del 10,6% en comparación con 2021. El mayor proveedor de vidrio templado para Colombia fue China, con una participación del 88,3%, seguido por Ecuador (8,2%) y Turquía (2,1%).

Las cifras de la balanza comercial en Colombia pueden relevar que, en los años recientes, se ha venido sustituyendo parte de las importaciones de vidrio templado por producción nacional.

04

ANÁLISIS DE LA CADENA PRODUCTIVA



El silicio, como se indicó anteriormente, es un material clave en la producción de tecnologías avanzadas gracias a sus propiedades eléctricas y térmicas. Su capacidad como semiconductor para regular con precisión el flujo de corriente eléctrica lo hace indispensable en la fabricación de dispositivos electrónicos, incluidos microchips, paneles solares y otros usos alternativos (ver numeral 2.4.). En el caso de las células fotovoltaicas, el silicio transforma la energía solar en electricidad de manera eficiente, consolidándose como un componente esencial en el desarrollo de energías renovables.

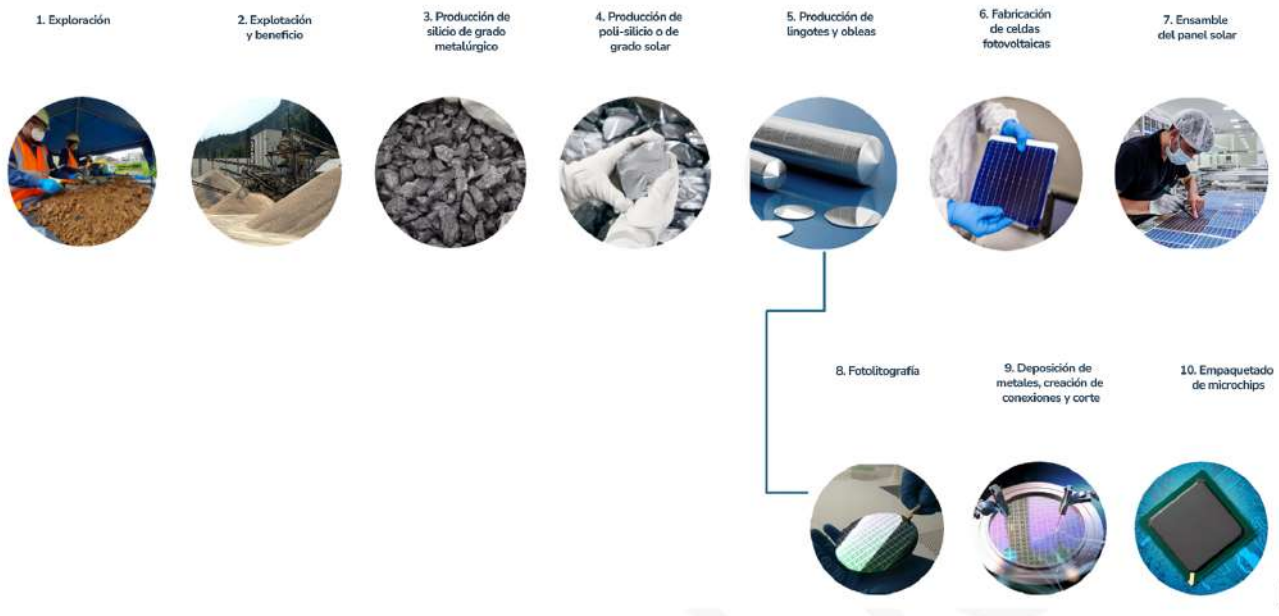
Independientemente de la ruta que tome la cadena productiva de este mineral, ya sea para la fabricación de microchips o paneles solares, debe surtir los procesos o etapas iniciales de exploración y explotación. Estas son fundamentales ya que permiten identificar, planificar y extraer los recursos minerales de manera eficiente y sostenible.

En la fase de exploración, se busca determinar con precisión la ubicación, las características y la cantidad de los depósitos minerales mediante estudios técnicos y geológicos. Este proceso incluye actividades como la exploración superficial, la prospección del subsuelo, la elaboración de modelos geológicos y la planificación operativa.

Por otro lado, la explotación implica la extracción directa del mineral, que en el caso de la arena silíceas puede realizarse tanto en depósitos superficiales como en ambientes acuáticos. En depósitos terrestres asociados a rocas sedimentarias, el método más común es la excavación mecánica, la cual se lleva a cabo mediante maquinaria amarilla que remueve las capas superiores del suelo para acceder a las arenas. Una vez extraído el material, este se transporta a una planta de beneficio y transformación mineral para su procesamiento.

Cuando los depósitos se encuentran en ambientes acuáticos, como ríos, lagos o costas, el método utilizado es el dragado, que emplea dragas flotantes equipadas con bombas y sistemas de succión para extraer el material del fondo. Al igual que en la excavación mecánica, las dragas han evolucionado hacia versiones electrificadas en proyectos de menor escala, contribuyendo a la reducción de impactos ambientales asociados al uso de combustibles fósiles. Tras el dragado, el material también es transportado a una planta de beneficio para su transformación y adecuación a los requerimientos del mercado.

Figura 33. Etapas para la producción de paneles solares y microchips.



Fuente elaboración propia a partir de fuentes secundarias.

Posteriormente, ambas cadenas comparten las etapas subsiguientes de beneficio mineral, producción de grado metalúrgico, producción de polisilicio o grado solar, producción de lingotes y obleas, y las particulares de cada una, descritas en los siguientes capítulos.

4.1. BENEFICIO MINERAL DE LAS ARENAS SILÍCEAS

El procesamiento de arenas silíceas puede incluir varias etapas, de acuerdo con el requerimiento de composición química y distribuciones granulométricas necesarios para obtener una mayor eficiencia de proceso.

Una de las etapas iniciales en el beneficio de las arenas silíceas corresponde

al cribado, donde se realiza la separación por tamaños para obtener una distribución granulométrica idónea y una alta concentración de sílice (SiO_2). Por ejemplo, en la investigación de (Alaa M.Kh. Mustafa, 2013), se obtuvieron concentraciones de SiO_2 del 99.1% trabajando con tamaños medios de partícula de 150 μm , realizando el proceso de cribado en húmedo.

Dado que, en ocasiones, la distribución granulométrica o la composición química no cumplen con los requerimientos en el mineral, se hace necesario realizar un proceso de molienda en el cual se tiene como objetivo liberar compuestos no deseados, tales como Alúmina (Al_2O_3), hierro bajo la forma de Fe_2O_3 , Oxido de calcio (CaO), Dióxido de potasio (K_2O) y Dióxido de sodio (Na_2O).

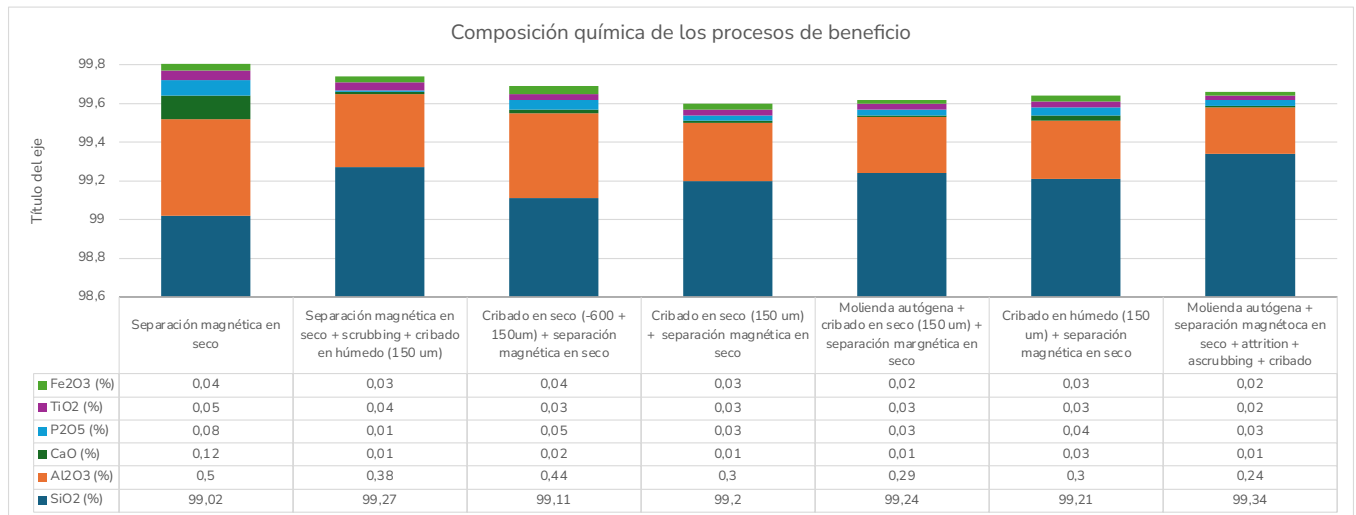
Otra de las técnicas que se pueden emplear en el proceso de beneficio es el “Attrition scrubbing”, el cual utiliza un tanque con paletas o hélices para agitar partículas del mineral, provocando colisiones que remueven impurezas como óxidos y arcillas.

Tras esta abrasión (attrition scrubbing), las partículas finas desprendidas se eliminan mediante deslimado. Dependiendo del nivel de concentración logrado, el cuarzo puede ser sometido a separación magnética o utilizado directamente en la producción de silicio.

Según, (Alaa M.Kh. Mustafa, 2013), combinar técnicas de cribado en seco, attrition scrubbing y cribado final (seco o húmedo) permitió alcanzar concentraciones de hasta 99.49% de SiO_2 , con tamaños de partícula de 150 μm . Además, una ruta que incluye molienda autógena redujo el contenido de Fe_2O_3 de 0.026% a 0.011%, manteniendo una pureza similar de SiO_2 (99.48%).

A continuación, en la Figura 34 se muestran las composiciones químicas de los concentrados obtenidos al mezclar las técnicas.

Figura 34. Composición química de los procesos de beneficio



Fuente. Tomado de (Alaa M.Kh. Mustafa, 2013).

La Figura 34 representa un aspecto clave a la hora de seleccionar el grado de concentración de SiO2 para la producción de silicio metalúrgico, pues deja en evidencia la mejor combinación de las rutas de beneficio, las cuales se deben ajustar a los procesos tecnológicos y demanda de energía que se tienen disponibles para la fabricación.

A continuación, se presentan algunos aspectos generales de los equipos empleados en el proceso de beneficio.

Tabla 8 Equipos empleados

| EQUIPO | CAPACIDAD (MÁXIMA) | CONSUMO ENERGÉTICO | CONFIGURACIÓN |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| Molino Estándar (12' x 5') | 250 TPH | 111 – 186 kW | Engranado |
| Molino Estándar (21' x 10') | 2500 TPH | 894 – 1864 kW | Engranado |
| Criba CVB1540-2 Compact | 300 TPH | 15 kW | MV2 Vibrador |
| Criba CVB1540-3P Compact | 200 TPH | 15 kW | MV2 Vibrador |
| Separador Magnético Modelo 120 | 6 ton/h | 75 kW | 2 cabezales Magnéticos |
| Separador Magnético Modelo 350 | 150 ton/h | 136 kW | 3 cabezales Magnéticos |

Fuente. Tomado de Metso Outotec <https://www.metso.com/es/>.

4.2. PRODUCCIÓN DE SILICIO METALÚRGICO

El silicio de grado metalúrgico se define como aquel en el que dentro de la aleación contiene un valor de 96 al 99% de Silicio (Arjan Ciftja, 2008). Este tipo de silicio se produce en un horno eléctrico de arco a temperaturas superiores a los 1700°C, donde ocurre la reducción directa del SiO_2 en presencia de carbono.

Esta es una reacción de tipo endotérmico, lo que significa que requiere una cantidad grande de energía para llevarse a cabo. Teóricamente, se necesitan 9,07 kWh/kg de energía para la reacción, sin contemplar las pérdidas de energía por los sistemas de refrigeración de los hornos. Un aspecto importante es la reactividad, la consistencia y la porosidad de la mezcla de materias primas. Propiedades fundamentales para optimizar la eficiencia del horno, logrando altos rendimientos de material, menor consumo de energía y mejor calidad

del producto.

La porosidad de la mezcla de materias primas influye en la reactividad, ya que permite que los gases producidos durante las reacciones (como el monóxido de carbono, CO) se difundan más fácilmente a través de la carga. Una mayor porosidad mejora la permeabilidad de los gases, facilitando las reacciones químicas y reduciendo la formación de zonas inactivas dentro del horno.

Del mismo modo, la pureza de la arena y del material carbonoso es fundamental. Impurezas presentes en las materias primas, como óxidos metálicos, pueden afectar negativamente la reactividad y la calidad del silicio producido. Por otro lado, el contenido de cenizas en el material carbonoso también puede influir en la reactividad y en la formación de residuos no deseados.

La reactividad del carbono también es un factor crítico en el proceso. Materiales como el coque de petróleo y el carbón vegetal tienden a grafitizarse a temperaturas elevadas, lo que disminuye su reactividad y, en consecuencia, reduce la eficiencia del horno. Por otro lado, aunque la madera, tienen menor contenido de carbono fijo, puede mejorar la eficiencia energética del proceso al incrementar la tasa de reacción en el horno.

No obstante, es fundamental considerar el contenido de materiales volátiles y la humedad de los materiales pues la materia volátil contribuye a las pérdidas de energía térmica en el proceso, especialmente a través de los gases de escape.

La madera y el carbón tienen altos contenidos de volátiles, lo que puede aumentar la cantidad de energía perdida. Finalmente, para el caso de la humedad se refleja en mayor consumo de energía para poder evaporar el agua de los materiales. (Zhengjie Chen, 2017).

Tabla 9. Composición de materiales reductores para la producción de silicio.

| MATERIAS PRIMAS | CARBONO FIJO (%) | VOLÁTILES (%) | HUMEDAD (%) | CENIZAS (%) |
|-----------------------|------------------|---------------|-------------|-------------|
| Coque de petróleo | 81.23 | 8.86 | 9.6 | 0.31 |
| Coque Metalúrgico | 85.0 | 1.5 | 3.0 | 8.0 |
| Carbón Metalúrgico | 53.37 | 39.55 | 4.7 | 2.38 |
| Carbón Vegetal | 52 | 10 | 33 | 5 |
| Madera | 10 | 32 | 57 | 1 |
| Electrodos de Grafito | 100 | 0 | 0 | 0 |

Fuente. Tomado de (Zhengjie Chen, 2017).

El proceso de fusión se lleva mediante un arco eléctrico intenso sostenido entre las puntas de tres electrodos sumergidos y la tierra del horno. En la zona interna caliente (1900-2100°C), se producen reacciones que generan óxido de silicio (SiO) y monóxido de carbono (CO), seguidas de la reducción a silicio líquido. En la zona externa más fría, el SiO y CO reaccionan con carbono para formar carburo de silicio (SiC) y productos de condensación de silicio en una matriz de sílice. Una vez se han generado las reacciones de reducción – fusión, el silicio fundido se extrae del fondo del horno, mientras que las materias primas se añaden en la parte superior. El espacio de reacción del horno se puede dividir conceptualmente en una zona interna caliente y una zona externa más fría. A continuación, en la Figura 35 se muestra el esquema de producción de Silicio.

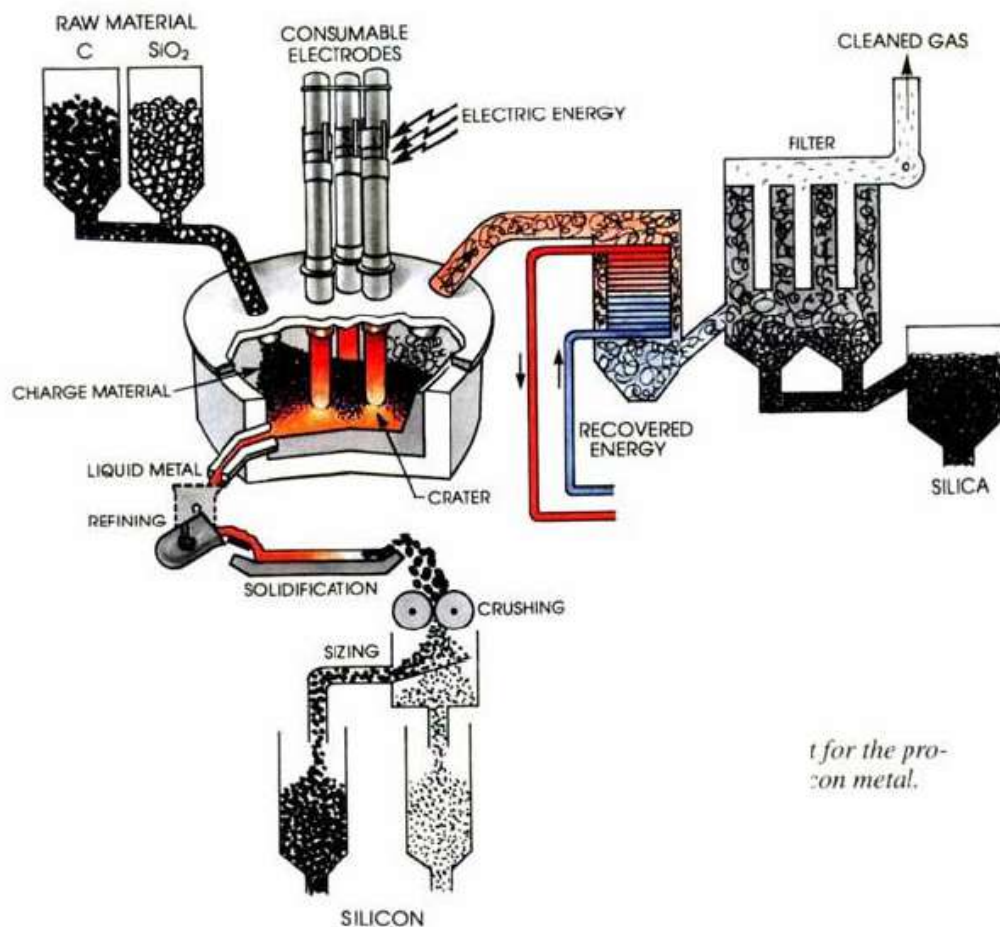


Figura 35. Esquema de la producción de silicio metalúrgico en un horno eléctrico de arco

Fuente: Refining and Recycling of Silicon: A Review

La composición química del silicio metalúrgico incluye varios elementos en diferentes proporciones. El hierro (Fe) está presente en un rango de 0.2% a 1.0%. El aluminio (Al) se encuentra en cantidades que oscilan entre 0.4% y 0.7%. El calcio (Ca) tiene un contenido que varía de 0.2% a 0.6%. El titanio (Ti) está presente en pequeñas cantidades, de 0.1% a 0.02%. Por último, el carbono (C) se encuentra en una proporción que va de 0.1% a 0.15%. Estos valores representan las impurezas típicas del silicio metalúrgico obtenido mediante procesos de reducción carbotérmica en hornos eléctricos de arco.

El proceso de afino se lleva a cabo cuando el silicio se encuentra fundido, y consiste en realizar procesos de oxidación, en los cuales elementos no

deseados tales como el Aluminio (Al), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) se oxidan, pasando a formar parte de la escoria. Durante el afino, la temperatura puede descender de 1700 °C a 1500 °C, lo que puede provocar pérdidas de silicio debido a la oxidación directa del silicio líquido para mantener el material caliente y evitar su solidificación. Dentro de esta etapa de afino, se realiza el ajuste de la escoria por medio de la adición de agentes escorificantes tales como CaO y SiO₂, para proporcionar la viscosidad y densidad deseada en la escoria, para subsecuentemente ser eliminada por vaciado.

Los consumos energéticos en esta etapa de proceso varían de acuerdo con el uso de diferentes mezclas de reductores carbonosos afecta directamente el consumo de energía y la eficiencia del proceso para la producción de silicio de grado metalúrgico. Se ha observado que las mezclas sin carbón vegetal pueden mantener o incluso mejorar la eficiencia, sugiriendo que alternativas al carbón vegetal son viables desde una perspectiva energética. (Zhengjie Chen, 2017).

Tabla 10. Consumos energéticos por tonelada de silicio metalúrgico producido

| CASO | ELECTRICIDAD (KWH/T) | MATERIALES CARBONOSOS (KWH/T) | TOTAL (KWH/T) |
|---|----------------------|-------------------------------|---------------|
| Caso 1 (Con carbón vegetal y madera) | 12280 | 13020 | 25300 |
| Caso 2 (Con madera, sin carbón vegetal) | 11620 | 10150 | 21770 |
| Caso 3 (Sin carbón vegetal ni madera) | 13710 | 12150 | 25860 |

Fuente. Effect of raw materials on the production process of the silicon furnace.

De acuerdo con el plan de acción australiano para el silicio, reporte publicado en 2022 por PricewaterhouseCoopers, los requisitos de energía eléctrica para la producción de silicio de grado metalúrgico son de aproximadamente 12 kWh

por kg de silicio producido (PWC, 2022), equivalente al consumo energético por día de 2,3 casas⁶.

Un aspecto importante para considerar del uso del agente aportante de carbono para las reacciones de reducción de la sílice dentro del horno eléctrico de arco, es el tipo de material a usar, pues estos presentan diferentes valores de resistividad eléctrica, pudiendo presentar un problema para la reactividad de la carga durante el proceso (T, 1970). A continuación, en la Tabla 11, se presentan los principales materiales aportantes de carbono con sus características.

Tabla 11. Materiales que aportan carbono al proceso.

| AGENTE REDUCTOR | % MA- TERIA VOLÁTIL | % CE- NIZAS | % CAR- BONO FIJO | RESISTENCIA EST. OHMS/ C.C. |
|---------------------------------------|---------------------------|----------------|------------------------|-----------------------------------|
| Electrodo de grafito | 0.3 | 0.3 | 99.4 | 0.004 |
| Coque de petróleo calcinado | 0.4 | 0.3 | 99.3 | 0.007 |
| Coque de petróleo crudo | 12.5 | 0.6 | 86.9 | 0.02 |
| Coque de subproducto | 0.9 | 12.5 | 86.6 | 0.021 |
| Briqueta de coque de petróleo | 18.5 | 9.4 | 66.8 | 0.024 |
| Carbón bituminoso bajo en volátiles. | 14.2 | 5 | 80.4 | 8,600,000 |
| Carbón bituminoso medio en volátiles. | 25.8 | 3.9 | 70.3 | 9,100,000 |
| Carbón bituminoso alto en vol. | 35.4 | 1.7 | 58 | 11,100,000 |
| Trozos de madera | 81 | 0.5 | 18.5 | 12,000,000 |

Fuente. Tomado de (T, 1970)

⁶ Se toma como referencia el consumo mensual equivalente a 173kWh para las casas ubicadas por debajo de los 1000 m.s.n.m.

4.3. PRODUCCIÓN DE POLISILICIO

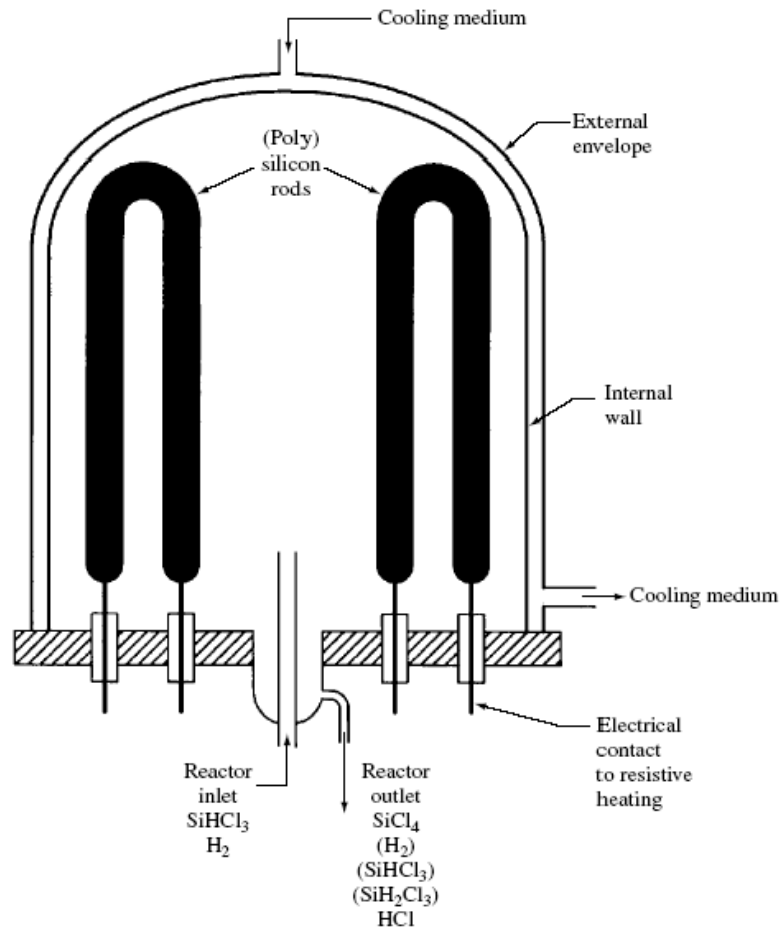
Una vez se cumplen los requerimientos en términos de composición química para el silicio grado metalúrgico, se procede a la fabricación de polisilicio mediante procesos de purificación avanzados, que incluyen la destilación fraccionada y la descomposición térmica de compuestos volátiles de silicio, como el triclorosilano ⁷o el monosilano.⁸

Uno de los métodos más comunes para producir polisilicio es el proceso Siemens, el cual se basa en la descomposición térmica de triclorosilano (HSiCl_3) en varillas de silicio calentadas eléctricamente dentro de una cámara de deposición. El triclorosilano se obtiene al hacer reaccionar silicio metalúrgico con ácido clorhídrico (HCl). (Arjan Ciftja, 2008).

⁷ El triclorosilano es un compuesto químico que contiene hidrógeno, silicio y cloro. Es un líquido incoloro, volátil y altamente reactivo.

⁸ El monosilano, también llamado silano, es el compuesto más simple de hidruros de silicio. Es un gas altamente reactivo y explosivo.

Figura 36. Esquema del reactor siemens



Fuente. Tomado de Refining and Recycling of Silicon: A Review

El proceso comienza con la reacción de silicio metalúrgico (MG-Si) con ácido clorhídrico (HCl) en un reactor de lecho fluidizado. Esta reacción ocurre a una temperatura de aproximadamente 300-350°C. El mecanismo involucra la reacción del gas ácido clorhídrico con el silicio, para romper los enlaces metálicos en la superficie del silicio.

El triclorosilano (HSiCl₃) es el compuesto volátil que se purificará y luego se descompondrá para producir silicio puro. El triclorosilano producido contiene impurezas, por lo que se purifica mediante destilación fraccionada. Este paso es crucial para eliminar impurezas como boro y fósforo, que pueden afectar

las propiedades electrónicas del silicio final.

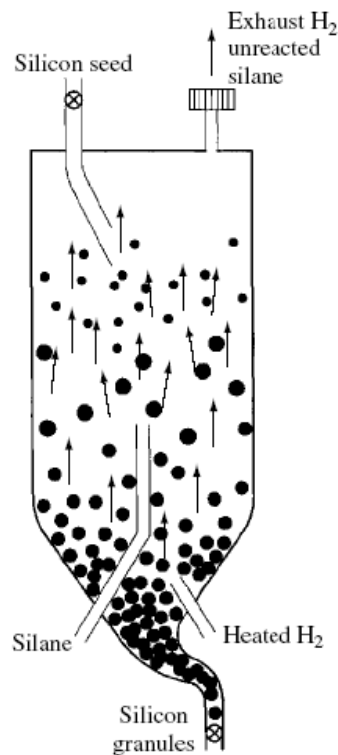
En la destilación fraccionada, se eliminan los compuestos más pesados y más ligeros que el triclorosilano. Este proceso asegura que el triclorosilano utilizado en la deposición sea de ultra alta pureza. El triclorosilano purificado se introduce en un reactor de deposición junto con hidrógeno (H_2) y se descompone a altas temperaturas (alrededor de $1100^{\circ}C$) en varillas de silicio (semillas) calentadas eléctricamente.

Durante este proceso, el silicio se deposita sobre las varillas de silicio, formando grandes cilindros de silicio puro o polisilicio, mientras que los subproductos como el tetraclorosilano ($SiCl_4$) se recogen para su posterior reciclaje o eliminación.

El proceso Siemens genera subproductos, principalmente tetraclorosilano ($SiCl_4$). Históricamente, este subproducto se utilizaba para producir sílice pirogénica, un material utilizado en aplicaciones industriales como la de recubrimientos, pinturas, caucho y plásticos. Sin embargo, dado que la demanda de sílice pirogénica no crece al mismo ritmo que la producción de polisilicio, el reciclaje del $SiCl_4$ se ha vuelto necesario. (Arjan Ciftja, 2008).

Otro método para la producción de polisilicio es el proceso Ethyl Corporation, considerado un proceso innovador. En lugar de utilizar silicio metalúrgico como materia prima, se parte de tetrafluoruro de silicio (SiF_4), un subproducto de la industria de fertilizantes. El SiF_4 se hidrogena para formar monosilano, que luego se descompone térmicamente en un reactor de lecho fluidizado en donde en lugar de varillas de silicio, se utilizan esferas de silicio en suspensión como semilla para la deposición de silicio puro.

Figura 37. Esquema proceso Ethyl corporation



Fuente. Tomado de Refining and Recycling of Silicon: A Review

Dentro de los procesos de producción de polisilicio, se han logrado mejoras en el desarrollo y adaptación de tecnologías. Un ejemplo de ello es el proceso Union Carbide Process, una variante del proceso Siemens para la producción de silicio de grado semiconductor (polisilicio). Sin embargo, a diferencia del proceso Siemens tradicional que utiliza triclorosilano (HSiCl_3), este método emplea monosilano (SiH_4).

El proceso Union Carbide Process fue desarrollado por Union Carbide Chemicals en Estados Unidos y tiene algunas características que lo diferencian del proceso Siemens tradicional. Comienza con la producción de monosilano (SiH_4), que se genera mediante la reacción de triclorosilano (HSiCl_3) y otros clorosilanos con resinas de intercambio iónico en columnas fijas. Este paso convierte los clorosilanos en monosilano. El SiH_4 se calienta a temperaturas típicas de 600-1200°C en un entorno controlado, lo que causa su descomposición para formar silicio sólido y gas hidrógeno.

Según el “Plan de Acción Australiano para el Silicio”, para este proceso los requisitos energéticos para la producción de polisilicio son de aproximadamente 100 kWh por kg de polisilicio producido (PWC, 2022), lo que también lo convierte en el paso más intensivo en energía de la cadena de suministro. Este proceso es seis veces más intensivo en energía que la fundición de aluminio y ocho veces más intensivo en energía que la fundición de silicio. Siendo aproximadamente el consumo diario de 19 casas colombianas.

A continuación, en la Tabla 12 se muestran las ventajas y desventajas de los procesos empleados para la fabricación de Polisilicio.

Tabla 12 Ventajas y desventajas de los procesos

| PROCESO | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---------|---|---|
| Siemens | Alta pureza: El polisilicio producido mediante el proceso Siemens tiene una pureza extremadamente alta (99.9999% o superior), lo que lo hace ideal para aplicaciones en la industria de semiconductores y fotovoltaica. | <ul style="list-style-type: none"> • Alto consumo energético: La eficiencia energética del proceso es baja, ya que se pierde una gran cantidad de energía en el enfriamiento de las paredes de la cámara de deposición. • Proceso discontinuo: El proceso Siemens es un proceso por lotes, lo que limita la capacidad de producción continua. • Costo elevado: Dada la alta demanda de energía y la complejidad de la infraestructura necesaria, el proceso Siemens es costoso tanto en términos operativos como de inversión inicial. |

| PROCESO | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|-----------------------|--|--|
| Ethyl Corporation | <ul style="list-style-type: none"> • El proceso es continuo, lo que reduce los costos operativos y energéticos en comparación con los procesos Siemens y Unión Carbide. • El proceso es más eficiente en términos de energía, ya que no requiere enfriar las paredes del reactor y la temperatura de operación es más baja. | <ul style="list-style-type: none"> • Producción de polvo: La descomposición homogénea del monosilano en el espacio libre del reactor produce polvo, lo que puede reducir la eficiencia del proceso. • Limitaciones en el producto: Las esferas de silicio obtenidas no son adecuadas para ciertos métodos de fabricación de cristales individuales. |
| Union Carbide process | <ul style="list-style-type: none"> • Mayor eficiencia de conversión: El uso de monosilano permite una descomposición más eficiente y completa en comparación con el triclorosilano, lo que reduce la cantidad de subproductos corrosivos. • Temperatura de operación más baja: La descomposición del monosilano ocurre a temperaturas más bajas que en el proceso Siemens, lo que reduce el consumo energético. • Calidad del producto: El silicio producido es de alta pureza y es adecuado para la fabricación de cristales monocristalinos mediante técnicas como el crecimiento por zona flotante (FZ). | <ul style="list-style-type: none"> • Costo elevado: Aunque el proceso es más eficiente, es más costoso debido a los pasos adicionales necesarios para convertir triclorosilano en monosilano. Cada vez que se reciclan los clorosilanos, solo una pequeña fracción se convierte en monosilano, lo que requiere múltiples ciclos de reciclaje. • Complejidad del proceso: La transformación de triclorosilano a monosilano y la necesidad de purificación adicional agregan complejidad al proceso en comparación con el proceso Siemens tradicional. |

Fuente. Elaboración propia con información de Refining and Recycling of Silicon: A Review

4.4. PRODUCCIÓN DE LINGOTES

A partir del silicio de grado metalúrgico obtenido, este se somete a diferentes procesos de transformación para producir lingotes que pueden ser monocristalinos o policristalinos, dependiendo del método de fabricación empleado.

Uno de los métodos para el crecimiento de monocristales de silicio es el método Czochralski. Este proceso se lleva a cabo en una cámara o horno de crecimiento

de cristal de forma cilíndrica, construida en acero y revestida internamente con grafito para aislar y proteger el horno de las altas temperaturas generadas durante el proceso, las cuales alcanzan los 2,500 grados Fahrenheit (1,371 grados Celsius) generadas por un elemento de calentamiento eléctrico. En el interior del horno se utiliza un crisol, generalmente de cuarzo, con una capacidad aproximada de 250 libras, en el que se cargan trozos de polisilicio o silicio de grado solar⁹ a fundir (WAAREE, 2024).

Dado que el cristal monocristalino se cultiva en un crisol de cuarzo, siempre está presente algo de contaminación por oxígeno en el silicio, típicamente del orden de 10^{18} átomos/cm⁻³ o 20 ppm. Aunque se han utilizado crisoles de grafito para evitar esta contaminación, estos producen impurezas de carbono en el silicio, aunque en una concentración menor (DS New Energy, s.f.).

El único otro componente añadido en el horno es un disco de silicio impregnado con una pequeña cantidad de boro. La inclusión de este dopante asegura que el cristal resultante tenga una orientación eléctrica potencial positiva. Dentro del proceso, una vez se alcanzan las temperaturas y condiciones atmosféricas deseadas, un cristal semilla de silicio colgado de una varilla y conectado a un dispositivo giratorio en la parte superior del horno, se baja lentamente hacia el silicio fundido (Solar Electric, s.f.).

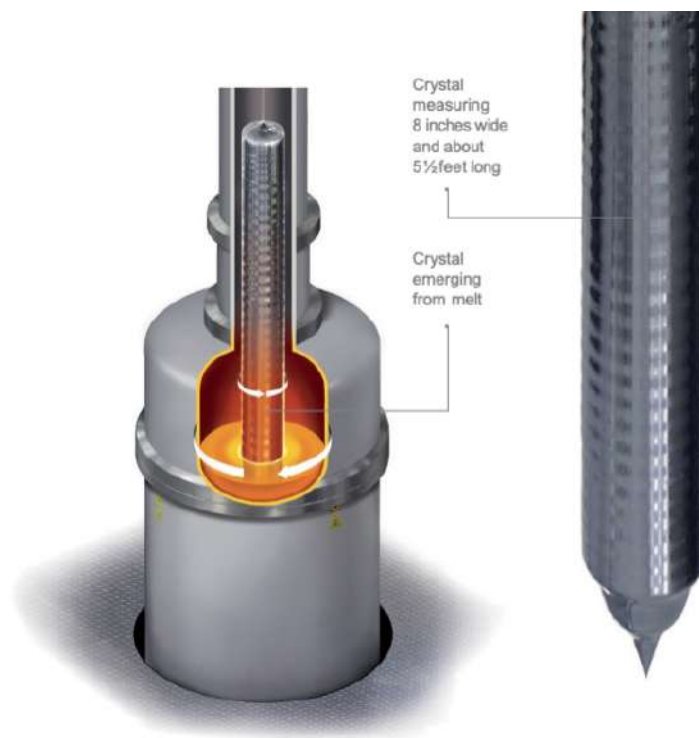
El cristal semilla tiene típicamente unos 5 mm de diámetro y hasta 300 mm de largo y actúa como un iniciador para el crecimiento del cristal de silicio más grande a partir de la masa fundida. Durante el proceso se da evacua el aire de la cámara para evitar la oxidación del silicio calentado durante el proceso de crecimiento (DS New Energy, s.f.).

Luego de sumergida la semilla, el crisol comienza a girar, y el cristal de semilla comienza a rotar en la dirección opuesta. Al controlar cuidadosamente la velocidad de extracción del cristal de semilla y el gradiente de temperatura en el crisol, el silicio fundido se solidifica en una única estructura cristalina

⁹ Para poder utilizar el silicio en la elaboración de las células fotovoltaicas es necesario alcanzar un cierto grado de pureza, lo que se logra mediante la utilización de silicio de grado solar (6N o 99,9999%). Fuente: <https://tipos-de-energia.blogspot.com/2007/01/energa-solar-fotovoltaica.html>

uniforme, con la misma orientación atómica que la semilla. El cristal crece a medida que el cable y la semilla ascienden lentamente, de manera controlada el cristal en crecimiento toma el diámetro deseado, hasta agotar el silicio fundido (WAAREE, 2024).

Figura 38. Método Czochralski



Fuente: (Solar Electric, s.f.).

El proceso hasta este punto y desde la carga de polisilicio en el crisol de cuarzo, toma cerca de 3.5 días. Después de varias horas de enfriamiento a unos 300 grados Fahrenheit (aproximadamente 149 grados Celsius), la campana y el eje del horno se levantan del encasillado del crisol para revelar un cristal cilíndrico completado, listo para pasar al siguiente paso y a la siguiente sala de producción (Solar Electric, s.f.).

De este modo, es como se obtiene un lingote de silicio monocristalino de alta pureza y calidad de 6N, en el que todos los átomos están alineados de manera

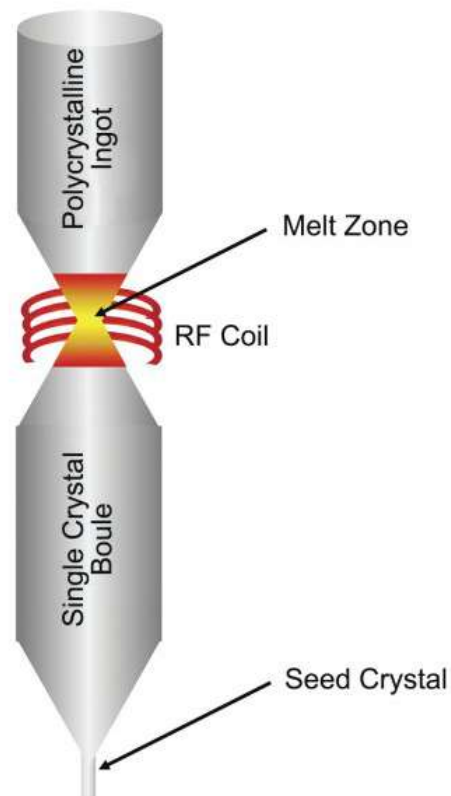
uniforme. Las dimensiones de estos lingotes pueden variar, sin embargo, suelen tener 8 pulgadas de ancho (20 centímetros) y aproximadamente 5 pies y medio de largo (1.67 metros) (Solar Electric, s.f.).

Las células solares monocristalinas comerciales tienen eficiencias que van del 15% al 18%, y ciertas muestras de laboratorio alcanzan eficiencias de hasta aproximadamente el 27% (EE Power, 2021). Las obleas de silicio monocristalino son particularmente populares en aplicaciones de techos solares debido a su mayor eficiencia de conversión por unidad de área cubierta (Intechopen, 2015). La homogeneidad del dopante (como el boro que se usa en procesos posteriores), tanto en la dirección axial como radial, está limitada en el silicio producido mediante el método de Czochralski. Esta limitación dificulta la fabricación de obleas con resistividades superiores a 100 ohm-cm, lo que restringe su uso en aplicaciones avanzadas que requieren un control más preciso de las propiedades eléctricas.

Otro mecanismo para producir silicio monocristalino es el método de refinación de zona flotante (**FZ**). Con el propósito de obtener un silicio de mayor pureza (ultrapuro de 9N o 99,9999999%), utilizado en la industria de semiconductores y en la fabricación de células solares de alta eficiencia, este método permite la producción de obleas de silicio FZ con resistividades de hasta 10,000 ohm-cm (DS New Energy, s.f.).

La refinación de zona flotante es altamente efectiva para eliminar impurezas, lo que resulta en un silicio de calidad excepcional, adecuado para aplicaciones tecnológicas de alta precisión.

Figura 39. Método de refinación de Zona Flotante



Fuente: (DS New Energy, s.f.).

En este método, un lingote de silicio policristalino se monta verticalmente en la cámara de crecimiento, ya sea al vacío o en atmósfera inerte. El lingote no está en contacto con ninguno de los componentes de la cámara a excepción del gas ambiental y un cristal semilla de orientación conocida en su base (DS New Energy, s.f.).

El lingote se calienta utilizando bobinas de radiofrecuencia (RF) sin contacto que establecen una zona de material fundido en el lingote, normalmente de unos 2 cm de espesor. En el proceso FZ, la varilla se mueve verticalmente hacia abajo, lo que permite que la zona fundida se mueva hacia arriba a lo largo del lingote, empujando las impurezas por delante de la masa fundida y dejando atrás silicio monocristalino altamente purificado (DS New Energy, s.f.). Las temperaturas que se alcanzan en este proceso son similares a las del

método Czochralski, las cuales varían entre 1400 y 1500 °C.

Otro método para fabricar lingotes de silicio policristalinos o multicristalinos para células solares es el método de colada. Este proceso consiste en verter polisilicio fundido en un molde de grafito que está dentro de un crisol de cuarzo. La clave de este método es controlar el enfriamiento del crisol para solidificar el silicio. Este proceso produce bloques grandes de silicio multicristalino, que pueden llegar a medir hasta 60 cm x 60 cm x 20 cm y pesar 250 kg. Posteriormente, estos bloques se separan del molde y se cortan en bloques más pequeños (Escuela de negocios, 2008).

La configuración en multicristales hace que se produzcan defectos de la red cristalina en los bordes entre los diferentes granos o cristales individuales. Las mejoras en este proceso están encaminadas hacia la consecución de un crecimiento más homogéneo de los cristales y la reducción de los defectos de la red cristalina que se observan en el interior de cada uno de los granos individuales. Los rendimientos alcanzados con silicio policristalino han alcanzado el 18% en laboratorio y hasta el 14% en células comerciales (Sieterm, s.f.).

Las células policristalinas pueden ser reconocidas por tener un aspecto de grano visible, un “efecto de escamas metálicas” y estéticamente los paneles solares policristalinos son de color azul oscuro y con forma rectangular. (Autosolar, s.f.).

Si bien el método de colada es el principio general o básico para la producción de silicio policristalino, existen variaciones de este que se implementan para mejorar la calidad del silicio a producir. A continuación, se describen estos métodos:

1. Solidificación Direccional (DS): este método es usado por la industria y mejora la calidad del silicio obtenido. Aquí, el silicio se coloca en un crisol recubierto de nitruro de silicio (SiN) y se somete a un proceso de cristalización dentro de un horno. La solidificación se controla de manera muy precisa

mediante el descenso del crisol fuera de la zona de calentamiento, lo que crea una interfase sólido/líquido que se desplaza lentamente hacia la superficie del bloque. Este método favorece la segregación de impurezas metálicas, permitiendo obtener un material de mayor pureza. El proceso dura alrededor de 60 horas y permite una velocidad de solidificación de 12 mm/hora. Tras la cristalización, se elimina la parte superior y los bordes del bloque, que contienen concentraciones elevadas de impurezas (Escuela de negocios, 2008).

2. **Heat Exchanger Method (HEM):** en este método, el gradiente de temperatura se controla utilizando un intercambiador de calor en lugar de mover el crisol o los elementos calefactores. Este proceso permite un recocido uniforme del bloque cristalino dentro de la misma vasija del horno, lo que favorece un crecimiento cristalino más homogéneo y con menos defectos. El crecimiento del cristal ocurre en tres dimensiones, minimizando perturbaciones térmicas y mecánicas (Escuela de negocios, 2008).
3. **Electromagnetic Continuous Pulling (EMCP):** este método permite una solidificación continua del silicio a una velocidad mucho mayor (120 mm/hora). El proceso se inicia fundiendo una pequeña cantidad de silicio en la parte superior de un crisol segmentado. La base del crisol es un émbolo de grafito que tira del bloque hacia abajo mientras se alimenta continuamente silicio granulado en la parte superior. Bobinas inductoras generan un campo electromagnético que confina el silicio líquido, evitando el contacto con las paredes del crisol. El cristal resultante tiene secciones de 13 x 13 cm y una longitud de unos 60 cm (Escuela de negocios, 2008).

Estos métodos de colada permiten la producción de silicio multicristalino de diferentes calidades, dependiendo del control del proceso y de las técnicas adicionales utilizadas para minimizar impurezas y defectos. De manera general, células policristalinas tienen eficiencias marginalmente más bajas (11,5%–

14%) que las células monocristalinas, sus menores costos de procesamiento y su empaquetamiento más denso en módulos las hacen económicamente competitivas con los módulos monocristalinos (WAAREE, 2024).

Atribuido al bajo costo de la cristalización, las obleas de silicio policristalino han ganado más del 40% de la participación de mercado en el mercado solar global (Intechopen, 2015). Las placas solares policristalinas se calientan con mayor rapidez que los paneles monocristalinos, es por ello que se recomienda su instalación en climas cálidos y con más horas de luz, pues soporta mejor el sobrecalentamiento que las placas solares monocristalinas (Autosolar, s.f.).

Finalmente, los tres métodos de producción de lingotes más usuales como se describieron son el método Czochralski (CZ), el de Zona Flotante (FZ) y el método de solidificación direccional (SD). Estos métodos permiten cristalizar el silicio en una estructura coherente y homogénea, ya sea formando un único cristal en el caso del silicio monocristalino, o un conglomerado de cristales en el caso del silicio multicristalino (Escuela de negocios, 2008).

Tabla 13. Principales propiedades de material producido en cada proceso

| MÉTODO | MATERIAL PRODUCIDO | VELOCIDAD CRECIMIENTO | DIMENSIONES DEL LINGOTE | TIEMPOS DE VIDA | EFICIENCIA (LABORAT.) | EFICIENCIA (COMERCIAL) |
|--------|--------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------|------------------------|
| CZ | m-Si | 0.1-0.2 cm/min | 15cmØ x 1m | 100 µs | 20% | 12 - 16% |
| FZ | m-Si | 0.3-0.5 cm/min | 12.5cmØ x 1m | 1 a 10 ms | 24% | — |
| MC | mc-Si | — | Varía | 1 a 10 µs | 18% | 12 - 14% |

Fuente: (Escuela de negocios, 2008)

En cuanto a los tiempos de vida, estos se definen como el tiempo promedio que un portador de carga minoritario (electrón o hueco) permanece en el material antes de recombinarse. Este parámetro es crucial para la eficiencia de las células solares y dispositivos semiconductores, ya que un mayor tiempo de vida permite que los portadores de carga contribuyan más al flujo de corriente e indica una mejor calidad del material.

Bajo este entendido, el silicio producido por el método de refinación de zona flotante (FZ) presenta el mayor tiempo de vida, con valores que varían entre 1 a 10 milisegundos, seguido del mediante el método Czochralski (CZ), con tiempos de vida de aproximadamente 100 microsegundos y por último el método de colada o solidificación direccional (SD) con tiempos de vida más cortos, variando entre 1 a 10 microsegundos.

El motivo de que los paneles monocristalinos sean más eficientes es precisamente por qué las células están compuestas de un solo cristal. Por lo que los electrones tienen más fluidez en su movimiento y menos pérdidas.

4.5. PRODUCCIÓN DE OBLEAS

El primer paso en la fabricación de obleas consiste en cortar los lingotes de silicio cristalino en obleas delgadas de aproximadamente 0.16 a 0.2 mm, como se explica a continuación. El objetivo es maximizar la superficie de captación de las células solares utilizando la menor cantidad de material semiconductor posible, dado el elevado coste del silicio.

Los lingotes obtenidos por el método Czochralski (CZ) se pulen para eliminar irregularidades, principalmente debidas a micro-oscilaciones durante la extracción. Una vez pulidos y con un diámetro uniforme, los lingotes se proceden a cortar en obleas (Escuela de negocios, 2008).

En este caso de CZ, cuanto más se corte, más se acercará la célula a una

forma cuadrada perfecta y más área de trabajo podrá incluir en su panel fotovoltaico monocristalino. Cuanto menos se elimine, menos material se desperdiciará y más económicas serán las células de fabricar. La conclusión a la que han llegado la mayoría de los fabricantes es hacer una forma que era un cuadrado con esquinas redondeadas (pseudocuadrado) (Viridian Solar, s.f.). Los restos del corte del silicio monocristalino, no se desperdician y son llevados nuevamente a procesos de fundición para la producción de silicio policristalino.

Para la industria fotovoltaica, las obleas deben tener una forma cuadrada o rectangular para optimizar el empaquetamiento en los módulos solares. Este proceso implica cortar el lingote de forma longitudinal y extraer un núcleo con la forma deseada. Aunque este método genera un desperdicio considerable de material, los bordes pueden ser reutilizados para ser fundidos nuevamente (Escuela de negocios, 2008).

Finalmente, la oblea obtenida a partir del silicio monocristalino conserva una longitud lateral de la oblea de silicio entre 10 y 15 cm, un espesor de aproximadamente entre 200 y 350 micras y una resistencia aproximada de 1 ohmio. Para el caso de los lingotes policristalinos, el bloque de silicio resultante se corta en pilares de sección transversal cuadrada que, a su vez, se cortan en celdas perfectamente cuadradas (Viridian Solar, s.f.).

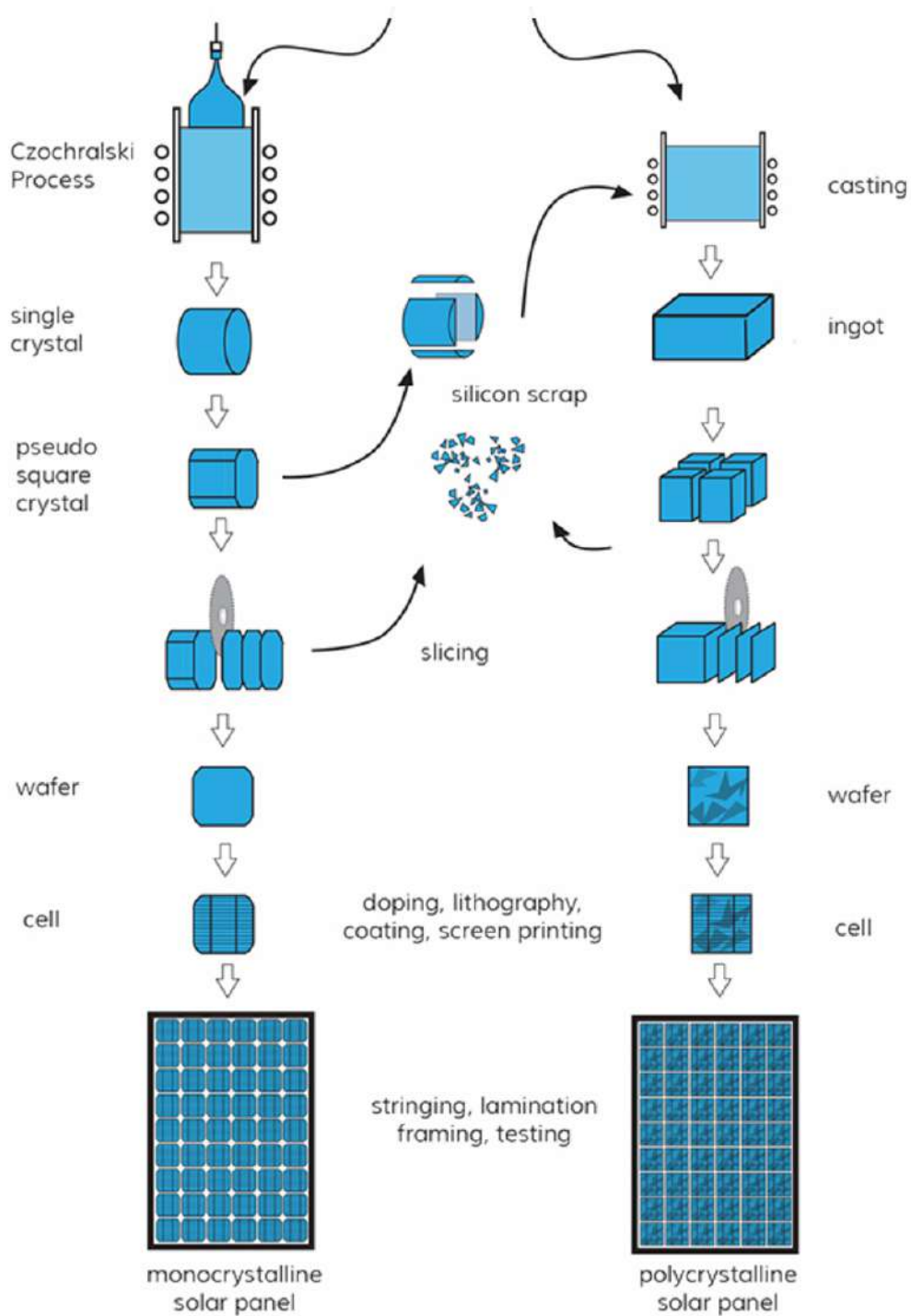


Figura 40. Rutas para el corte de lingotes mono o policristalinos

Fuente: (Viridian Solar, s.f.)

El corte de obleas es una de las etapas más costosas del proceso, ya que se desperdicia aproximadamente la mitad del silicio debido al grosor de las sierras utilizadas, que es comparable al grosor de las obleas (entre 200 y 500 micras) (Escuela de negocios, 2008).

Por su parte, en el reporte “Plan de Acción Australiano para el Silicio”, se estima que las pérdidas durante el proceso son significativas, las cuales podrían estar entre el 30% y el 40% de la masa inicial del lingote (PWC, 2022).

En la industria, se utilizan dos técnicas principales para el corte de lingotes:

- **Sierras de diámetro interno recubiertas de polvo de diamante:** producen aproximadamente 30 obleas por hora, generando 0.7 m² de oblea por cada kg de lingote, aunque el proceso es lento y desperdicia mucho material.
- **Sierras multihilo:** permiten cortar simultáneamente centenares de obleas, con hilos más finos (140 a 180 micras), lo que reduce el desperdicio de material y permite cortar obleas más delgadas. Estos hilos se impregnan en aceites con partículas abrasivas que realizan el corte.

Debido a los inconvenientes de estas técnicas, se han desarrollado procesos alternativos para fabricar láminas de silicio de forma directa (Escuela de negocios, 2008), como los descritos a continuación:

- **Crecimiento definido por el borde (EFG):** este método utiliza silicio fundido que asciende por capilaridad a través de una matriz de grafito. Al salir de la matriz, el silicio es extraído lentamente mediante una semilla, formando cintas de silicio casi monocristalino de 10 cm de ancho, 300 micras de espesor y varios metros de longitud.
- **Crecimiento de cintas sobre un soporte:** se utiliza una malla barata que se pone en contacto con el silicio fundido. Al retirarse del crisol, la malla

queda recubierta de silicio cristalizado. Este método produce silicio multicristalino con un espesor de 50 micras. La calidad del material depende de la malla utilizada, y existe el riesgo de contaminación.

- **Epitaxia en fase líquida:** este proceso crece una capa delgada de material cristalino sobre un sustrato cristalino que actúa como semilla. El silicio se deposita sobre el sustrato desde una solución metálica, enfriándose a un ritmo de 1°C/min desde 900-950°C. El proceso es capaz de producir capas de silicio muy delgadas (hasta 30 micras).

Posteriormente al corte, comienza la limpieza de las obleas utilizando ácidos, como ácido clorhídrico (HCl), ácido nítrico (HNO₃) entre otros, con el fin de eliminar restos de metales provenientes de las sierras de corte, así como restos orgánicos y metálicos de los procesos de fabricación de las obleas (Escuela de negocios, 2008).

Apesar de estas limpiezas, las obleas suelen presentar tensiones, irregularidades y defectos superficiales debido al proceso de corte. Para solucionar esto, se realiza un decapado, eliminando algunas micras del material superficial para alisar la superficie, dejándola preparada para tratamientos posteriores. Este otro proceso se lleva a cabo mediante inmersión en una disolución acuosa de hidróxido de sodio o soda caustica al 30% a 90°C (Escuela de negocios, 2008). El espesor de la capa eliminada es de aproximadamente 10 micras (Summer Xia, 2021).

Posteriormente, la oblea se somete al proceso de texturización el cual consiste en crear micropirámides en la superficie frontal de la oblea. Estas estructuras reducen la reflectividad de la superficie, incrementando la absorción de luz. En el caso del silicio monocristalino, se suele emplear un método de corrosión que utiliza NaOH y alcohol.

Este proceso de corrosión anisotrópica del silicio monocristalino da lugar a la

formación de numerosas estructuras en forma de pirámide sobre la superficie. La solución alcalina se mantiene a una temperatura cercana a los 80 °C, con una concentración de entre 1 y 2%, y el tiempo de exposición al proceso de corrosión es de aproximadamente 15 minutos. Por otro lado, para los cristales policristalinos, se prefiere normalmente la corrosión mediante ácido (Summer Xia, 2021).

Después de los procesos de decapado y texturización, la superficie de la oblea de silicio se oxida, formando una capa de SiO_2 . Para remover estos óxidos, se sumergen las obleas en una solución diluida de ácido fluorhídrico (HF), lo que deja la superficie completamente limpia y preparada para el siguiente paso de difusión. Los iones residuales de HF se eliminan mediante un enjuague con agua desionizada, seguido de un secado rápido para prevenir cualquier reoxidación (Escuela de negocios, 2008).

Finalmente, se realiza el proceso de formación de la unión PN. En las obleas, la unión p-n se crea mediante la difusión de un dopante de tipo n, comúnmente fósforo, sobre una oblea de tipo p (dopada con boro). Para la predeposición del dopante, se pueden emplear diversas técnicas, como serigrafía, aplicación de un líquido con el dopante mediante centrifugado sobre la superficie, o contacto con discos hechos de un material que contiene el dopante (por ejemplo, P_2O_5). Sin embargo, las predeposiciones utilizando una fuente líquida son las más habituales, ya que resultan ser más económicas y limpias. En este método, se hace pasar nitrógeno a través de un líquido que contiene el dopante, y los vapores resultantes son llevados hasta las obleas (Escuela de negocios, 2008).

Una vez que el fósforo se ha depositado en la superficie, se difunde en la estructura cristalina del silicio. Las obleas se introducen en hornos a temperaturas elevadas (entre 900° y 1000°C), lo cual facilita la difusión del fósforo desde la superficie hacia el interior de la oblea, sustituyendo los átomos de silicio en la red cristalina. Se pueden utilizar hornos de cinta, donde las obleas se colocan horizontalmente sobre una cinta transportadora metálica,

o hornos de cuarzo, donde las obleas se posicionan verticalmente en soportes de cuarzo (Escuela de negocios, 2008).

Dependiendo de la fuente de dopante utilizada y de las técnicas de predeposición y difusión aplicadas, podría ser necesario realizar un ciclo adicional de limpieza para eliminar los residuos de difusión, como los óxidos.

4.6. PRODUCCIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

De acuerdo con el libro de “Tecnologías de células de Silicio Cristalino”, escrito por José Lo Balenzategui Manzanares y publicado en 2008 (Escuela de negocios, 2008), las dos tecnologías que predominan en el mercado para la fabricación de células fotovoltaicas son las de serigrafía y la de contactos enterrados. Estas tecnologías aplicadas resultan en células que el mercado comercialmente conoce como células tipo n, células tipo p, y células tipo PERC. Las células tipo n, son células de silicio cristalino convencional donde su oblea cuenta con una capa delgada de silicio tipo-p (dopada con boro) sobre una capa de silicio de tipo-n mucho más gruesa (dopada con fósforo), y sus contactos eléctricos se aplican a ambos lados (Cambio Energético, s.f.).

En estas células tipo n, el lado-p es el lado frontal que mira hacia el sol. A esta se le aplica un revestimiento antirreflectante, sobre el cual se pega un adhesivo transparente (por ejemplo, EVA) que sujeta la capa de vidrio protectora frontal.

Las células tipo p, comparten el mismo proceso de fabricación y el mismo silicio que la tipo n, la principal diferencia está en la cantidad de electrones con los que cuentan. Una célula de tipo-p dopa su oblea de silicio con boro, que tiene un electrón menos que el silicio (lo que hace que la célula esté cargada positivamente) (Cambio Energético, s.f.).

Actualmente, la mayoría de las células solares cristalinas son tipo-p. Esto se

debe al menor costo de producción de este tipo de células. Pero, en cuanto al rendimiento, las células solares de tipo-n pueden ofrecer una eficiencia mucho mayor en comparación con las células solares de tipo-p.

Por último, las células tipo PERC, no es muy diferente, en términos de construcción, de una celda solar fotovoltaica típica. La principal diferencia entre las celdas PERC y las fotovoltaicas monocristalinas típicas, es la integración de una capa de pasivación en la superficie posterior y un grabado químico láser para cortar la capa de pasivación, lo cual permite aumentar la eficiencia de la celda (Cambio Energético, s.f.).

A continuación, se describen las tecnologías para la fabricación de células fotovoltaicas mediante serigrafía y contactos enterrados:

4.6.1. CÉLULAS CONVENCIONALES POR SERIGRAFÍA

Este tipo de células solares emplea un proceso de serigrafía para aplicar los contactos metálicos, tanto en la parte posterior como en la frontal de la oblea de silicio. El proceso se compone de los siguientes pasos:

- **Formación del contacto Metálico Posterior:**

Se comienza aplicando una pasta de aluminio en la parte posterior de la oblea de silicio mediante la técnica de serigrafía. Esta pasta se deposita sobre la superficie y luego se somete a un proceso de cocción a alta temperatura en un horno.

Durante la cocción, el aluminio reacciona con el silicio y forma un contacto eléctrico sólido. Además, esta interacción genera un campo superficial posterior (BSF) que ayuda a reflejar los portadores de carga que se dirigen hacia la parte posterior de la célula, aumentando así la probabilidad de que estos portadores lleguen a los contactos eléctricos y mejorando la eficiencia de la célula solar.

- **Formación del contacto Metálico Frontal:**

Simultáneamente o después del contacto posterior, se aplica una pasta de plata en la parte frontal de la célula, nuevamente utilizando serigrafía. Esta pasta se imprime en un patrón de líneas finas, conocidas como rejillas, que cubren la superficie de la célula.

Estas líneas de plata deben ser lo suficientemente finas para permitir que la luz solar pase a través de ellas y llegue al silicio, mientras que también deben ser lo suficientemente conductoras para recolectar los electrones generados por la absorción de luz. La cocción de esta pasta de plata fija el contacto y asegura que la rejilla de metal esté firmemente adherida al silicio.

- **Aislamiento de las zonas P y N:**

Una vez aplicados los contactos metálicos, se procede al aislamiento de las zonas p y n de la célula para evitar cortocircuitos y asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo. Este aislamiento se logra mediante técnicas de corte en los bordes de la oblea, eliminando cualquier posible puente conductor entre las dos regiones.

Además, se utiliza un ataque químico o grabado con plasma para asegurar que las áreas donde no se desea conducción estén completamente aisladas. Este proceso es crucial para mantener la integridad de la unión p-n, que es la responsable de la generación de electricidad en respuesta a la luz solar.

- **Aplicación de capas antirreflexivas:**

Para aumentar la cantidad de luz que entra en la célula y reducir las pérdidas por reflexión, se aplican capas antirreflexivas sobre la superficie de las obleas. Estas capas están hechas de materiales como óxido de silicio (SiO_2) o nitruro de silicio (Si_3N_4), que tienen propiedades ópticas que reducen la reflexión de la luz.

La aplicación de estas capas se realiza mediante técnicas de deposición al vacío o deposición química en fase de vapor (CVD), asegurando una cobertura

uniforme. La presencia de estas capas permite que más luz solar penetre en la célula, aumentando así la eficiencia de conversión de la energía solar en electricidad.

- **Medición y clasificación de las células:**

Tras completar los pasos de fabricación, las células solares se someten a pruebas rigurosas para evaluar su rendimiento. Se miden parámetros críticos como la eficiencia de conversión, la corriente de cortocircuito (ISC) y la tensión de circuito abierto (VOC).

Estas mediciones permiten clasificar las células según su eficiencia y calidad, asegurando que solo las células que cumplen con los estándares de rendimiento se utilicen en la fabricación de módulos solares. La clasificación también permite a los fabricantes emparejar células de rendimiento similar en un mismo módulo, lo que optimiza el rendimiento global del sistema fotovoltaico.

4.6.2. CÉLULAS DE CONTACTOS ENTERRADOS

En lugar de utilizar contactos metálicos en la superficie, algunas células solares emplean una técnica de contactos enterrados. En este método, los contactos se colocan dentro de surcos grabados en la superficie de la célula. Esto reduce la sombra proyectada por los contactos y permite una mayor absorción de luz. Los contactos enterrados ofrecen una mayor eficiencia al permitir que más luz llegue al silicio activo y al reducir las pérdidas resistivas. Sin embargo, este método es más complejo y puede requerir equipos de fabricación más avanzados, lo que incrementa el costo de producción.

4.7. FABRICACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

De acuerdo con el mismo libro de “Tecnologías de células de Silicio Cristalino”,

el proceso de fabricación de módulos de silicio cristalino involucra varias etapas para asegurar la adecuada protección y eficiencia de las células fotovoltaicas:

- 1. Encapsulado de las células:** El encapsulado es fundamental para proporcionar rigidez mecánica y protección contra factores externos, como impactos, condiciones meteorológicas adversas y corrosión. Además, debe garantizar un aislamiento eléctrico eficiente para prevenir la degradación de las propiedades eléctricas del módulo a lo largo de su vida útil, que idealmente debería superar los 20 años.
- 2. Encintado de las células:** Este paso consiste en la soldadura de cintas conductoras a las células individuales para interconectarlas eléctricamente. Este procedimiento es esencial para crear un camino continuo para el flujo de corriente entre las células.
- 3. Interconexión de las células:** Una vez encintadas, las células se interconectan formando series o cadenas. Este diseño en serie permite aumentar el voltaje total del módulo, adecuándolo para su uso en aplicaciones que requieren niveles de voltaje más elevados.
- 4. Laminación y curado:** Las células interconectadas se encapsulan entre láminas de material protector (como EVA, etileno-vinil-acetato) y se cubren con un vidrio en la parte frontal y una lámina posterior de protección. Luego, este sándwich se somete a un proceso de laminación para asegurar la adherencia de todos los componentes y la eliminación de burbujas de aire, seguido de un curado para mejorar la cohesión del módulo.
- 5. Enmarcado y colocación de la caja de conexiones:** Finalmente, el módulo laminado se monta en un marco de aluminio que proporciona soporte estructural y protección adicional contra la humedad. Se instala una caja

de conexiones en la parte posterior para facilitar la conexión eléctrica de múltiples módulos en serie o en paralelo. Esta caja generalmente incluye diodos de protección para evitar la formación de puntos calientes debido al sombreado parcial o suciedad, que podrían dañar al cortarlas.

Adicional al análisis realizado en el capítulo 3.2.2 Proyección de paneles solares y demanda de recursos para el escenario de Transición Energética, las demás materias primas que son requeridas para la producción de paneles solares son además del vidrio y el silicio son: aluminio, cobre, polímeros (EVA,PVF), plata, caja de conexiones, boro, fosforo, plomo, dióxido de estaño, acero y cemento gris en el caso que se requiera obra civil (IRENA; USAID, 2021) (Xiaopu, Xinyi, Xiaodong, Lingling, & Chunxiang, 2022).

En relación con las anteriores materias primas, ya se discutió anteriormente la capacidad que tiene el país el suministro de arenas silíceas, por lo tanto, es fundamental que dichos minerales adicionales se analicen de la misma manera que las arenas silíceas. Para el caso de cobre, fósforo, plata, plomo se identifica explotación de recursos minerales a nivel nacional (ANM), mientras que para los demás materiales se identifican los posibles países proveedores para estas materias primas:

Tabla 14. Suministro de materias primas requeridas para la fabricación de paneles solares.

| MATERIAL | PRODUCCIÓN NACIONAL ANUAL (TONELADAS) | FUENTES DE IMPORTACIÓN A COLOMBIA |
|--------------------|--|-----------------------------------|
| Aluminio | 200.000 (aproximada en 2022) fuente: OEC | China, Rusia, Canadá, Brasil |
| Boro | No significativa | EE. UU., Turquía, Chile |
| Caja de Conexiones | No disponible | China, México |
| Dióxido de Estaño | No disponible | China, Indonesia |

| MATERIAL | PRODUCCIÓN NACIONAL ANUAL (TONELADAS) | FUENTES DE IMPORTACIÓN A COLOMBIA |
|----------------------|--|-----------------------------------|
| Polímeros (EVA, PVF) | Producción limitada | Corea del Sur, Alemania, Japón |
| Acero | 1.5 millones (aproximado en 2023) fuente: Mincomercio | China, México, Brasil |
| Cemento gris | Aproximadamente 13.000 miles de toneladas. fuente: DANE | Producción nacional suficiente |

4.8. FABRICACIÓN DE MICROCHIPS A PARTIR DEL SILICIO DE GRADO SOLAR O POLISILICIO.

Otro posible uso del polisilicio es la fabricación de microchips. Una vez obtenidas las obleas de silicio (wafers), estas se someten a los siguientes procesos para la fabricación de chips.

4.8.1. FOTOLITOGRAFÍA

La fotolitografía es el proceso fundamental para crear patrones extremadamente detallados en la superficie de las obleas de silicio, que se convertirán en los circuitos de los chips. Este proceso consta de varios pasos:

- **Aplicación de photoresist:** Una capa fina de resina fotosensible llamada photoresist se aplica sobre la oblea. Esta sustancia es sensible a la luz ultravioleta (UV).
- **Exposición a luz UV:** Se coloca una máscara con el patrón de los circuitos sobre la oblea, y se expone a luz UV. La luz pasa a través de la máscara solo en las áreas deseadas, alterando la solubilidad del photoresist.

- **Desarrollo:** El photoresist expuesto se disuelve con un solvente, dejando una plantilla del patrón en la oblea. Las áreas cubiertas por el photoresist no expuesto permanecen protegidas. Este proceso se repite para cada capa del chip, permitiendo crear las complejas estructuras tridimensionales de transistores y otros componentes.

4.8.2. IMPLANTACIÓN DE IONES (DOPAJE):

- **Propósito del dopaje:** Para que el silicio se convierta en un semiconductor, sus propiedades conductoras deben ser ajustadas. Esto se logra mediante el proceso de dopaje, que introduce impurezas controladas (generalmente átomos de boro o fósforo) en el silicio.
- **Implantación de iones:** A través de un acelerador de iones, se bombardean átomos cargados eléctricamente (iones) en las áreas del silicio que no están cubiertas por el photoresist. Este proceso permite cambiar las propiedades eléctricas de áreas específicas del silicio, creando regiones tipo n (negativo) y p (positivo) necesarias para formar transistores.
- **Precisión del dopaje:** La energía con la que se lanzan los iones y el tiempo de exposición se controlan cuidadosamente para determinar la profundidad y concentración de los átomos implantados en el silicio

4.8.3. DEPOSICIÓN DE METALES Y CREACIÓN DE CONEXIONES:

Una vez que los transistores están formados, las diferentes capas del chip

deben conectarse eléctricamente. Aquí es donde entra en juego la deposición de metales, típicamente cobre o aluminio.

- **Electroplateado:** El cobre se deposita mediante electroplateado, un proceso en el que los iones de cobre se adhieren a la superficie del silicio que actúa como cátodo en una solución de sulfato de cobre. Este metal formará las conexiones eléctricas que interconectan los transistores.
- **Capas múltiples:** En los chips modernos, puede haber hasta 30 capas de metal, todas cuidadosamente dispuestas para conectar los diferentes transistores y componentes. Las capas se crean mediante la aplicación de una capa de metal, seguida de un patrón y un proceso de grabado para eliminar el exceso, dejando solo las conexiones necesarias.

4.8.4. PRUEBAS Y CORTE (SLICING):

- **Pruebas:** Después de que los chips han sido creados en las obleas, se someten a pruebas iniciales para verificar que los transistores y circuitos funcionan correctamente. En esta etapa, los chips se prueban individualmente en la oblea.
- **Corte de las obleas (Slicing):** Una vez que las pruebas iniciales se completan, la oblea se corta en pequeñas unidades individuales llamadas dies. Cada die contiene un chip completo, que es una copia exacta de los demás chips de la oblea

4.8.5. EMPAQUETADO Y PRUEBAS FINALES:

- **Montaje:** Los chips individuales se montan en un sustrato que proporciona

conexiones eléctricas con otros dispositivos y permite el manejo del calor generado durante el funcionamiento. Esta etapa también incluye encapsular el chip en una carcasa protectora de plástico o metal.

- **Pruebas finales:** Se realizan pruebas adicionales para verificar que los chips funcionen correctamente bajo diferentes condiciones de estrés, incluyendo pruebas de temperatura y voltaje. Solo los chips que pasan todas las pruebas de verificación son empaquetados y enviados para su uso final.

4.9. VIDRIO SOLAR

El vidrio es un producto transparente e inorgánico, con diferentes características de color, densidad y calidad dependiendo de su composición química. Sus propiedades de transparencia, dispersión, absorción y respuesta térmica permiten que tenga múltiples aplicaciones (Technology Cluster Manager; Technology Center System Program, 2019).

Para los paneles solares, se emplea vidrio solar, que consiste en un vidrio templado con revestimiento antirreflexivo. Este vidrio es un componente importante en los paneles solares puesto que (Vishakha renewables, 2024):

- Protege las células fotovoltaicas que están dentro del panel puesto que estas son frágiles y no deben estar expuestas al polvo, aire y lluvia
- Mejora la eficiencia del panel ya que por su revestimiento antirreflexivo reduce la pérdida de luz solar maximizando su absorción.
- Garantiza durabilidad puesto que evitan la deformación del panel y los daños causados por agentes externos

La fabricación de vidrio templado, particularmente para aplicaciones en paneles solares, requiere materias primas de alta calidad que aseguren las propiedades mecánicas, ópticas y térmicas del producto final. Este proceso depende principalmente de la pureza y disponibilidad de minerales como la sílice, la caliza, la dolomita, el sodio y ciertos sulfatos.

La sílice (SiO_2), proveniente de arenas silíceas con un contenido superior al 95%, es el componente esencial para garantizar la transparencia, resistencia y durabilidad del vidrio templado. (Glass for Europe, 2020).

La caliza y la dolomita se utilizan en la industria del vidrio como estabilizadores que aportan brillo y mejoran las propiedades térmicas del producto final (AGC Inc, 2024) . Por su parte, el sulfato de sodio, utilizado en pequeñas cantidades durante la producción de vidrio, ofrece diversos beneficios, como favorecer la reacción con la sílice y prevenir la formación de impurezas durante el proceso de fusión (Manufacturas Silíceas S.A.S, 2024) .

También se puede emplear vidrio reciclado, lo que además de garantizar la pureza de la sílice ayuda en la reducción de emisiones de CO_2 ¹⁰ en el proceso de manufactura (Glass for Europe, 2020).

Según la patente CN104513008A (China Patente n° CN104513008A, 2013), este tipo de vidrios está compuesto de:

- **SiO_2 : 71 –73%**
- **Na_2O : 12,5 – 14%**
- **CaO : 10-12%.**
- **MgO : 1-3%**
- **Al_2O_3 : 1-3%**
- **Na_2SO_4 : 0,1-0,5%**
- **Sb : 0,1-0,5%**
- **Na_2NO_3 : 0,1-0,5%**
- **FeO : 0,008-0,02%**

¹⁰ Una tonelada de vidrio reciclado reemplaza 0,7 toneladas de arena silícea

El vidrio templado plano utilizado en el armado de los paneles es de bajo contenido de hierro, lo cual le confiere una excelente captabilidad de los rayos ultravioleta e infrarrojos, resistencia a las altas temperaturas y capacidad de operar bajo condiciones climáticas extremas (Argilaga, Sales, Cuevas, Abril, & Ripoll, 2005).

El proceso de fabricación puede resumirse en las siguientes etapas:

- 1. Cribado, pesada y dosificación de materias primas:** Las materias primas, como carbonato de sodio, carbonato de calcio, carbonato de magnesio, agua y dióxido de silicio, se reciben ya purificadas. Se utilizan sistemas automatizados de pesaje y dosificación para garantizar la precisión en las proporciones de cada componente.

Se pueden utilizar los siguientes equipos:

- **Cribadoras Vibratorias:** Estas máquinas separan partículas no deseadas mediante vibraciones controladas, asegurando que solo los materiales con las características deseadas continúen en el proceso. Son esenciales para eliminar impurezas y clasificar materiales según su tamaño (Allgaier Process Technology , 2024)
- **Básculas de Precisión:** Garantizan el pesaje exacto de cada componente, lo cual es crucial para mantener la consistencia en la composición del vidrio. La precisión en el pesaje influye directamente en las propiedades físicas y químicas del producto final (Bühler Group, 2024).
- **Sistemas de Dosificación Automática:** Controlan la cantidad de cada materia prima que se incorpora al proceso, permitiendo una mezcla homogénea. Estos sistemas mejoran la eficiencia y la calidad del producto final (DirectIndustry, 2024).

2. Secado: La mezcla de materias primas se seca mediante corrientes de aire caliente en secadores rotatorios o de lecho fluidizado, eliminando la humedad antes de la fusión.

Pueden ser utilizados los siguientes equipos:

- **Secadores de lecho fluidizado:** operan haciendo pasar aire caliente a través de un lecho de partículas sólidas, suspendiéndolas y permitiendo una transferencia de calor eficiente que resulta en un secado uniforme (Machinery, 2023).
- **Secadores rotatorios:** Consisten en cilindros que giran mientras una corriente de aire caliente seca el material en su interior. Son versátiles y pueden manejar una amplia variedad de materiales con diferentes tamaños y formas. Su diseño permite un secado uniforme y eficiente, siendo una opción popular en diversas industrias (TCPEL, 2023).

3. Mezclado: Las materias primas secas se homogeneizan en mezcladoras cerradas, como mezcladoras de tambor o de paletas, asegurando una distribución uniforme de los componentes.

Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran:

- **Mezcladoras de tambor rotatorio:** Estas máquinas consisten en un tambor que gira sobre su eje horizontal, permitiendo la mezcla uniforme de los componentes en su interior. Son especialmente útiles para materiales que requieren un mezclado suave y homogéneo (SD Industrial, 2024).
- **Mezcladoras de paletas:** Equipadas con paletas internas que agitan y mezclan los componentes, estas mezcladoras son ideales para materiales que necesitan una mezcla más vigorosa. Las paletas giratorias mueven el producto de abajo hacia arriba y de

regreso, creando un efecto de tamboreo que asegura una mezcla uniforme (PT Chronos, 2024).

- 4. Fusión:** Los componentes sólidos se funden en hornos de cuba, donde se emplea gas natural como combustible. Estos hornos alcanzan temperaturas superiores a 1,500 °C, transformando la mezcla en una masa vítrea homogénea. Posteriormente, el vidrio fundido entra en un proceso de enfriamiento (1100 – 1300°C) donde se eliminan las burbujas de aire y se controla la temperatura previa al baño metálico, esto último en caso de que se utilice la técnica de vidrio flotado para la fabricación de la lámina.
- 5. Estirado:** El vidrio fundido se enfría lentamente hasta la temperatura ambiente mediante sistemas de refrigeración con agua y ventilación controlada. El estirado tradicional se realiza simultáneamente utilizando máquinas de estiraje con rodillos que moldean y adelgazan la masa vítrea según las especificaciones deseadas. Mientras que, con la técnica de vidrio flotado, la masa vítrea se extiende uniformemente sobre la superficie de metal fundido de manera que el vidrio se moldea uniformemente sobre el metal líquido (estaño), mezclado con hidrogeno y nitrógeno para prevenir la oxidación del vidrio
- 6. Recubrimiento:** Una vez conformadas las láminas de vidrio, estas son tratadas con revestimientos antireflectivos para mejorar la eficiencia de los paneles.
- 7. Recocido:** Las láminas de vidrio se introducen en hornos de recocido, donde se someten a un calentamiento controlado seguido de un enfriamiento brusco. Este proceso alivia las tensiones internas del vidrio, mejorando su resistencia y durabilidad.

Como se indicó anteriormente, la producción de vidrio requiere temperaturas

que superan los 1,500 °C en los hornos de fusión, y que produce gases de efecto invernadero como subproducto (dióxido de azufre, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno).

Según un informe de la European Energy Innovation Platform (EEIP), las industrias de envases y vidrio plano emiten conjuntamente más de 60 millones de toneladas de CO₂ al año. Este dato subraya el impacto ambiental significativo de la producción de vidrio plano y la necesidad de implementar tecnologías emergentes para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en este sector (H, B, A, & M, 2018)

En Colombia, se identificó un estudio realizado en 2012 cuyo objetivo principal fue determinar las propiedades físicas y estimar el consumo energético en la producción de materiales como acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros, incluidos materiales alternativos y de uso no convencional, utilizados en la construcción de edificaciones colombianas.

En este estudio, se calculó que, para la producción de vidrio plano, el consumo energético es de 28.952 MJ/ton, mientras que las emisiones de CO₂ alcanzan 1,8591 ton CO₂/ton (Jaramillo & Ecoingeniería, 2012)

La producción de un kilogramo de vidrio en un horno de gas puede generar alrededor 0,6kg de CO₂, de los cuales 0,45kg provienen de la quema de combustible y 0,1kg de la disociación de la materia prima carbonatada (Technology Cluster Manager; Technology Center System Program, 2019).

De manera general, se requeriría realizar estudios más detallados sobre los consumos actuales energéticos en la industria del vidrio en Colombia. Esto permitiría identificar si se han adoptado tecnologías que permitan reducir el consumo energético y la emisión de gases efecto invernadero.

4.10. REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE PANELES SOLARES

La cadena productiva para la fabricación de paneles solares a partir de arenas silíceas es intensiva en consumo energético, de acuerdo con las cifras que presenta el “Informe Especial sobre las Cadenas de Suministro Globales de Energía Solar Fotovoltaica” de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) de 2022 (IEA, 2022).

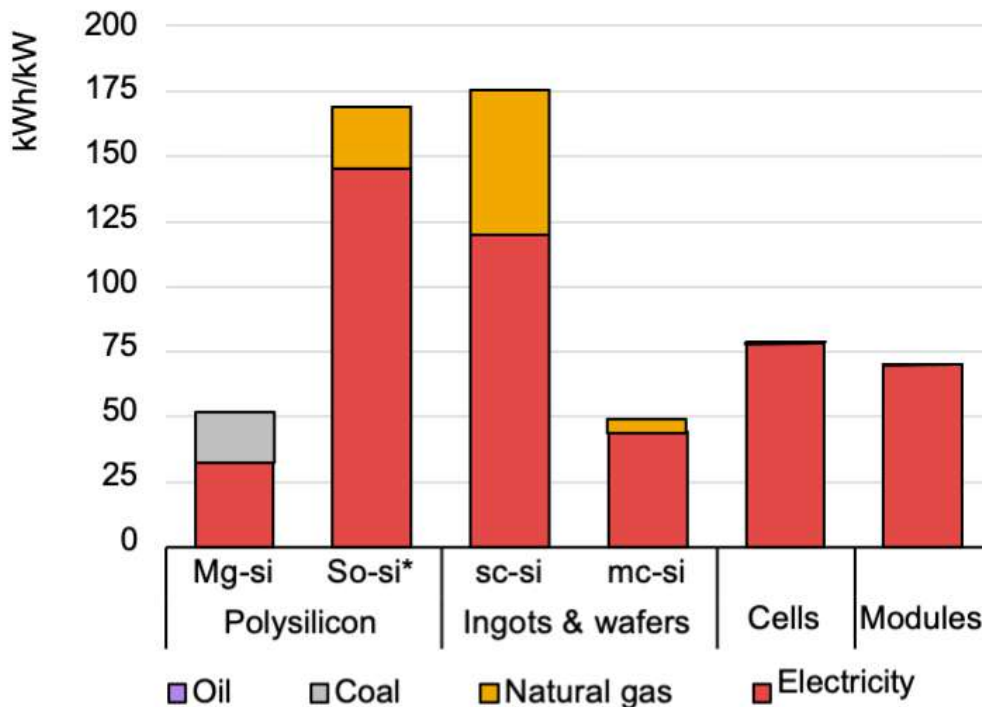


Figura 41. Consumo energético por etapa de la cadena productiva.

Fuente: Tomado de (IEA, 2022).

En la Figura 41 se muestra que se requieren cerca de 30 kWh/kW para la producción de silicio de grado metalúrgico (Mg-si), 145 kWh/kW para la producción de silicio de grado solar (So-si), 120 kWh/kW para la producción de

polisilicio monocristalino (sc-si), 45 kWh/kW para la producción de polisilicio policristalino, 80 kWh/kW para la producción de células solares y 70 kWh/kW para la fabricación de módulos solares (IEA, 2022).

Por ejemplo, para producir un (1) GW de potencia instalada en paneles solares monocristalinos, de acuerdo con los consumos estimados por la Agencia Internacional de Energía, se requerirían cerca de 445 GWh. Este requerimiento energético representaría el consumo de 2.573.254 hogares colombianos en un mes, considerando un consumo mensual de 173 kWh por hogar¹¹.

Ahora bien, no solo es importante el esfuerzo en materia de electricidad que debe ceder el Sistema Interconectado Nacional para la construcción de paneles solares monocristalinos, sino también el impacto positivo que esta capacidad instalada puede generar.

Si se logra la instalación de 1 GW de paneles solares monocristalinos al año, la meta del gobierno nacional en su estrategia “Estallido 6G”¹² podría cumplirse con una velocidad mayor a la que ha venido realizando. Por ejemplo, si en un hogar se instalan 3 paneles solares de 500 W cada uno, considerando una eficiencia del 80% y 5 horas solares equivalentes diarias, cada hogar produciría 180 kWh mensuales, lo cual supera el mínimo vital para los hogares ubicados por debajo de 1000 m.s.n.m. Bajo dichos supuestos se podría impactar el consumo energético vital de más de 660 mil hogares, contribuyendo significativamente a las metas de transición energética en Colombia.

Para el cálculo anterior, es importante indicar que se asume una eficiencia promedio del 18% de los paneles solares, 5 horas solares equivalentes diarias, un consumo mensual promedio por hogar de 173 kWh y la ausencia de pérdidas significativas en transmisión o almacenamiento, permitiendo realizar una estimación conservadora del impacto de 1 GW de capacidad

¹¹ Se considera este consumo de 173 kWh/mes debido a que representa el consumo básico para hogares que viven en municipios de climas cálidos (por debajo de 1.000 MSNM).

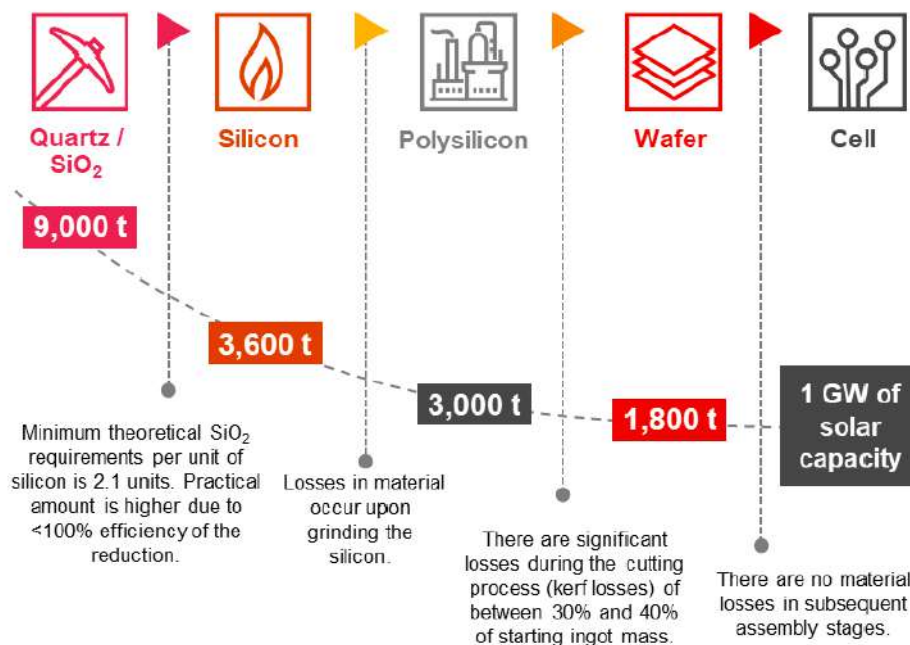
¹² Estrategia impulsada por el Ministerio de Minas y Energía desde 2023 que busca acelerar la Transición Energética Justa en Colombia, cuya meta es incorporar 6GW de energía renovable entre 2023 y 2026

solar instalada al año en el país.

Otra referencia que dimensiona los consumos energéticos por etapa en la cadena de producción de paneles solares es el plan de acción australiano para el silicio (PWC, 2022) donde se estima que los requisitos energéticos para la producción de silicio de grado metalúrgico, como primera etapa de la cadena, es de aproximadamente 12 kWh por kg (0,012 GWh/t) de silicio de grado metalúrgico producido, y cerca de 100 kWh por cada kg (0,1 GWh/t) para la segunda etapa de producción de polisilicio.

Considerando la relación que presenta el mismo plan de acción en el siguiente gráfico:

Figura 42. Pérdidas de material en la cadena productiva.



Fuente: (PWC, 2022) (IEA, 2022)

Se tiene que el requerimiento energético se convierte en 43,2 kWh/kW para producir silicio de grado metalúrgico y en 300 kWh/kW para producir

polisilicio. Estos valores, de llegar a ser más acertados que los presentados por la IEA, representarían un crecimiento en la demanda de electricidad de aproximadamente un 44% para la producción de silicio de grado metalúrgico y un 107% para la producción de polisilicio, considerando los valores de referencia de la IEA, que son 30 kWh/kW y 145 kWh/kW, respectivamente. En cuanto a las demás etapas de la cadena productiva de paneles solares, esta referencia del plan de acción australiano para el silicio no presenta datos.

No obstante, si bien existe una diferencia significativa en la etapa de producción de polisilicio entre ambas fuentes mencionadas, la IEA en su informe manifiesta que, la eficiencia energética y de los materiales en el proceso de Siemens ha mejorado significativamente durante la última década logrando un ahorro de energía de casi el 50 % en los últimos diez años.

La EIA indica que esos ahorros son el resultado de la disminución de la intensidad eléctrica del proceso, que pasó de más de 70 kWh/kg en 2011 a aproximadamente 50 kWh/kg en 2021. Esto se ha logrado gracias a la implementación de hornos más grandes, materiales de pared de horno mejorados, un mayor número de varillas de silicio y el ajuste en la mezcla de gases utilizada durante la purificación del silicio.

4.11. INFRAESTRUCTURA ENERGÉTICA PARA EL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA

Al revisar la capacidad energética futura del país, el Plan Energético Nacional 2022 – 2052 (UPME, 2022) analiza diversos factores, como datos económicos, demográficos, el consumo histórico de energía, la cobertura de servicio y la eficiencia energética en los sectores residencial, terciario e industrial. Con base en esta información, proyecta escenarios a futuro que identifican las necesidades energéticas y las capacidades requeridas para su expansión.

En todos los escenarios, se realizan proyecciones sobre la capacidad instalada

necesaria y las expansiones requeridas, que se basan en la información recopilada y en los supuestos que de allí se derivan.

Para el sector minero, se estima un crecimiento anual de la necesidad energética que varía entre 2,5% y 3,1%, según el escenario de análisis. Por su parte, en el sector industrial, se proyecta un crecimiento anual de la necesidad energética entre 1,4% y 1,9%. Estas estimaciones consideran que se espera que tanto las actividades mineras como las industriales tengan mayor eficiencia energética a lo largo del tiempo. Es importante señalar que estos porcentajes no reflejan el crecimiento de las actividades en sí, sino exclusivamente el aumento en su necesidad energética proyectada.

Asimismo, se tuvo en cuenta la información del Plan de Acción Indicativo del Programa de Uso Racional de Energía (PAI-PROURE), que indica que el consumo energético de los sectores minero e industrial aumentará a 2030, aunque ambas industrias presentan un alto potencial de ahorro energético.

En el caso del sector minero, este potencial se debe principalmente al cambio tecnológico, mientras que en la industria se centra en el uso eficiente de calor indirecto y directo, así como en la implementación de las medidas del Sistema de Gestión en Energía (SGE) (UPME, 2022.).

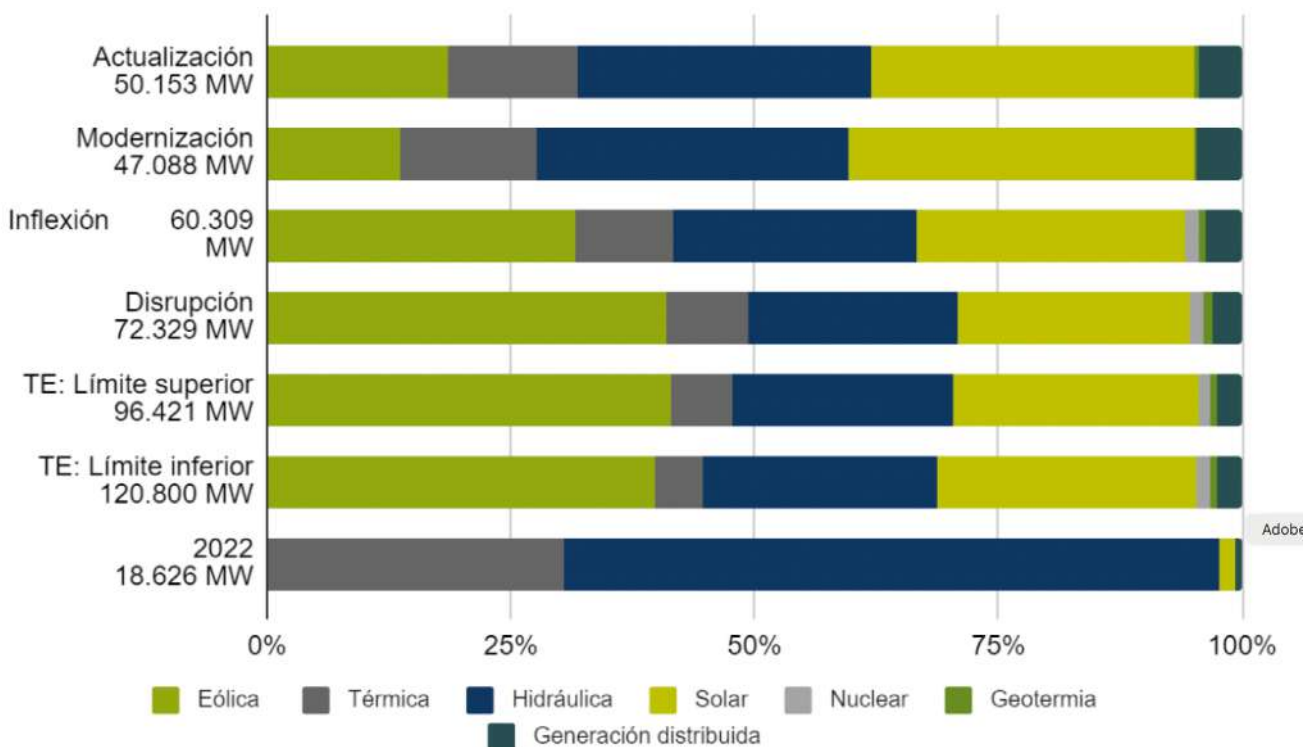
A pesar de los avances en eficiencia energética, se requiere una capacidad energética instalada que cubra las necesidades de consumo. Esta necesidad se puede cubrir con la energía que haya disponible en los lugares donde se planea realizar tanto la actividad minera de extracción de arenas silíceas como el desarrollo de una industria de procesamiento de materiales y/o fabricación de paneles solares.

Para suplir esa necesidad, el PEN propone la expansión del parque de generación eléctrica con visión a 2052 para todos sus escenarios. Este crecimiento se fundamenta a partir de tecnologías estudiadas, como la energía solar fotovoltaica y la eólica. Como se puede ver en la Figura 43, las metas de cada escenario varían, pero todas incluyen un aumento significativo de la

capacidad instalada en comparación con el año de referencia (2022).

Actualmente, el Gobierno Nacional adelanta la Misión Transmisión, con la cual se proyecta el desarrollo de infraestructura para la transmisión de la energía en el territorio nacional.

Figura 43. Participación por tecnología de generación por escenario en 2052



Fuente: UPME, 2022 (PEN)

Al tratarse de metas ambiciosas, el PEN afirma que, para lograr las proporciones estimadas, se requiere de la implementación oportuna de todos los proyectos de generación limpia asignados, así como el desarrollo de una red de transmisión adecuada para evacuar la energía eléctrica producida lejos de los centros de consumo.

Igualmente, se requiere el desarrollo de tecnologías de electrónica de potencia dentro del Sistema Interconectado Nacional, con el objetivo de garantizar la

calidad y seguridad del sistema. Estas y otras múltiples variables se están identificando y analizando constantemente para cubrir las necesidades energéticas del país.

Respecto a las redes del Sistema Interconectado Nacional (SIN), si bien en el PEN se mencionan acciones encaminadas a mejorar y poder aportar en el transporte de energía desde las plantas de generación, actualmente se presenta un cubrimiento que aporta al país y la gestión de la energía.

Particularmente, departamentos como Valle del Cauca, Cundinamarca y Meta, que son aquellos que cuentan con recursos y reservas para arenas silíceas, también cuentan con subestaciones del Sistema de Transmisión Nacional (STN) de 220 kV y subestaciones del Sistema de Transmisión Regional (STR) de 110-115 kV. Esta información se puede detallar en el ANEXO 1: Sistema Interconectado Nacional

4.12. LOGÍSTICA DE TRANSPORTE

Con el fin de favorecer las capacidades locales de la industria solar en Colombia, a continuación, se proponen algunas rutas para la posible distribución y comercialización de los productos derivados de la transformación de las arenas silíceas que contribuirán a mejorar la competitividad de la cadena de valor. Asimismo, es relevante analizar el sistema ferroviario activo en el territorio nacional, ya que representa una oportunidad valiosa en términos logísticos.

Para esto, es primordial identificar los principales corredores comerciales del país, así como los puertos marítimos que facilitan las exportaciones e importaciones de productos en el territorio nacional, estos puertos tienen una enorme ventaja debido a la geografía, ya que conectan los océanos Atlántico y Pacífico.

De acuerdo con información de “The Logistics World” (Juárez, 2022), Colombia cuenta con 10 zonas portuarias, 8 de ellas localizadas en la costa Caribe: La Guajira, Santa Marta, Ciénaga, Barranquilla, Cartagena, Golfo de Morrosquillo, Urabá y San Andrés; y dos en el Pacífico: Buenaventura y Tumaco. Sin embargo, en la actualidad se destacan 2 puertos de contenedores principales: Cartagena (Caribe) y Buenaventura (Pacífico).

Tabla 15. Puertos en Colombia

| NOMBRE DE PUERTO | DESCRIPCIÓN |
|--------------------------------------|---|
| <p>Puerto de Cartagena</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Localizado a corta distancia del canal de Panamá y la bahía de Cartagena, lo que brinda grandes ventajas para las operaciones marítimas. ● Es el principal puerto marítimo colombiano para la llegada de turistas y representa el 75% del volumen de las importaciones realizadas en la zona, así el 55 % de las exportaciones. |
| <p>Puerto de Buenaventura</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Este puerto se encuentra en la costa Pacífica, en el suroccidente de Colombia. ● Este puerto es el responsable de aproximadamente el 25% del total de los ingresos que reciben las aduanas de Colombia. ● Su localización geográfica hace que sea uno de los puertos marítimos de Colombia de mayor interés para el comercio. |
| <p>Puerto de Barranquilla</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Está ubicado al norte del Puerto de Cartagena, y cerca de la capital del Atlántico. ● Puede almacenar más de 350 mil barriles de petróleo y otros productos derivados de las refinerías. ● Se considera el puerto marítimo más moderno de ese país. |
| <p>Puerto de Santa Marta</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Este puerto está ubicado en el extremo noroccidental de la ciudad de Santa Marta. ● Carga de combustibles, grano y otros productos como el aceite de palma con los que dan vida a esta terminal, que cuenta con una amplia capacidad para el transporte y almacenamiento de contenedores. |

| | |
|-------------------------|--|
| Puerto de Tumaco | <ul style="list-style-type: none"> • Este puerto se encuentra al suroccidente de Colombia, cerca de las fronteras con Ecuador. • Las dos principales actividades de este puerto marítimo son la exportación de crudo y los bananos, un símbolo de la agricultura colombiana. |
|-------------------------|--|

Fuente: The Logistic World, 2022.

4.12.1. PRINCIPALES CORREDORES LOGÍSTICOS

El Ministerio de Transporte, mediante el Decreto 1478 de 2014, fijó los lineamientos para el establecimiento de corredores de importancia estratégica para el país, y mediante la Resolución 20223040002435 de 2022, en su artículo tercero, se definieron cuáles son estos corredores de importancia estratégica para el país, los cuales son:

- **Bogotá – Buenaventura – Ipiales**
- **Cali – Medellín- Cartagena**
- **Bogotá – Barranquilla**
- **Bogotá – Cúcuta**
- **Medellín – Bucaramanga**
- **Bogotá – Yopal**
- **Bogotá - Puerto Asís**

En el ANEXO 2: Detalle de los corredores logísticos de Colombia se describe de manera detallada el recorrido terrestre, el eje fluvial, los aeropuertos y la conexión ferroviaria que poseen estos corredores logísticos. En el siguiente plano, se presentan los corredores logísticos identificados.

Plano 1. Corredores logísticos de Colombia



Fuente: Elaboración propia

4.12.2. ALTERNATIVAS DE TRANSPORTE FERROVIARIO

Aunado a lo anterior, El Plan Maestro Ferroviario¹³ destaca que el territorio nacional cuenta con una red ferroviaria que tiene una extensión aproximada de 3.533 kilómetros, caracterizada por su complementariedad con los modos de transporte carretero y fluvial. Sin embargo, se debe aclarar que esta red presenta algunos problemas de articulación en algunos segmentos por la falta de mantenimiento, rehabilitación y mejoramiento.

Actualmente, la red férrea está administrada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y el sector privado. Entre los correderos férreos más importantes se destacan el Corredor Central, el Corredor Pacífico y el Corredor Atlántico. En la siguiente imagen se presenta la red férrea Nacional.

¹³ Plan Maestro Ferroviario Departamento Nacional de Planeación <https://colaboracion.dnp.gov.co> > CDT > Prensa

Plano 2. Red férrea de Colombia



- Sitios
- Concesiones Portuarias**
- ZONA PORTUARIA DE BUENAVENTURA
- ZONA PORTUARIA DE CARTAGENA Y CIENAGA
- ZONA PORTUARIA DE SANTA MARTA Y CIENAGA
- ZONA PORTUARIA DE TUMACO
- ZONA PORTUARIA DE BARRANQUILLA
- Alternativas de Transporte Férreo**
- Estación de Tren
- Red Férrea**
- Red Activa (Privada)
- Red Inactiva
- Red Férrea del Atlántico
- Red Férrea del Pacífico
- Red Férrea Central

Fuente: Elaboración propia

4.12.3. ALTERNATIVAS DE TRANSPORTE TERRESTRE

A continuación, se presentan algunas alternativas para la comercialización y exportación de productos derivados de las arenas silíceas desde diferentes ubicaciones geográficas del territorio nacional que son de alto interés para el desarrollo de la cadena de valor.

Tabla 16. Alternativas de transporte terrestre

| NO | NOMBRE DE LA RUTA | VÍA | DISTANCIA (KM) | TIEMPO DE VIAJE (HR/ MIN) | PEAJES |
|----|---------------------------------|--|----------------|---------------------------|--------|
| 1 | Valledupar – P. Cartagena | Transversal Momposina Transversal Carmen - Bosconia - Valledupar - Maicao - Puerto Bolívar Troncal de occidente | 435,66 km | 5 h 3 min | 5 |
| 2 | Agustín Codazzi – P. Cartagena | Troncal del Carbón Troncal del Magdalena - Transversal Depresión Momposina Transversal Carmen - Bosconia - Valledupar - Maicao - Puerto Bolívar | 375,29 km | 4 h 10 min | 4 |
| 3 | El paso – P. Cartagena | Troncal del Carbón Troncal del Magdalena - Transversal Depresión Momposina Transversal Carmen - Bosconia - Valledupar - Maicao - Puerto Bolívar | 317,09 km | 3 h 31 min | 4 |
| 4 | La Jagua Ibirico – P. Cartagena | Troncal del Carbón Troncal del Magdalena - Transversal Depresión Momposina Transversal Carmen - Bosconia - Valledupar - Maicao - Puerto Bolívar | 387,14 km | 4 h 20 min | 6 |

| NO | NOMBRE DE LA RUTA | VÍA | DISTANCIA (KM) | TIEMPO DE VIAJE (HR/ MIN) | PEAJES |
|----|----------------------------------|---|----------------|---------------------------|--------|
| 5 | Valledupar – P. Buenaventura | Troncal del Carbón Troncal del Magdalena Transversal Las Animas – Bogotá Acceso a Manizales Troncal del eje cafetero Troncal de occidente Transversal Buenaventura - Villavicencio - Puerto Carreño | 1150,24 km | 13 h 3 min | 12 |
| 6 | Agustín Codazzi– P. Buenaventura | Troncal del Carbón Troncal del Magdalena Transversal Las Animas – Bogotá Acceso a Manizales Troncal del eje cafetero Troncal de occidente Transversal Buenaventura - Villavicencio - Puerto Carreño | 1087,53km | 12 h 8 min | 11 |
| 7 | El Paso– P. Buenaventura | Troncal del Carbón Troncal del Magdalena Transversal Las Animas – Bogotá Acceso a Manizales Troncal del eje cafetero Troncal de occidente Transversal Buenaventura - Villavicencio - Puerto Carreño | 1057,64km | 11 h 48 min | 11 |

| NO | NOMBRE DE LA RUTA | VÍA | DISTANCIA (KM) | TIEMPO DE VIAJE (HR/ MIN) | PEAJES |
|----|--------------------------------------|---|----------------|---------------------------|--------|
| 8 | La Jagua de Ibirico- P. Buenaventura | Troncal del Carbón Troncal del Magdalena Transversal Las Animas – Bogotá Acceso a Manizales Troncal del eje cafetero Troncal de occidente Transversal Buenaventura - Villavicencio - Puerto Carreño | 1033,35km | 11 h 32 min | 11 |

Fuente: INVIAS, 2024

Plano 3. Alternativas de transporte terrestre



Fuente: Elaboración propia

4.12.4. ALTERNATIVAS DE TRANSPORTE INTERMODAL

Ahora bien, es importante articular en la logística otros medios de transporte, para este caso la red ferroviaria del territorio nacional juega un papel clave. Para el departamento del Cesar, se destaca la presencia del corredor ferroviario “Atlántico – Santa Marta – Chiriguana”, operado por FENOCO (Ferrocarriles del Norte de Colombia S.A).

En este sentido, se establecen algunas alternativas para el transporte intermodal de los productos derivados de la transformación de arenas silíceas, como se presenta a continuación:

Tabla 17. Alternativas de transporte intermodal

| NO | NOMBRE DE LA RUTA | VÍA | DISTANCIA (KM) | TIEMPO DE VIAJE (HR/ MIN) | PEAJES |
|----|---|---------------------------------------|----------------|---------------------------|--------|
| 1 | Valledupar – Bosconia | Troncal del Magdalena | 156,99 km | 1 h 57 min | 1 |
| | Bosconia – Puerto Santa Marta | Red Ferroviaria | 177 km | 1 h 30 min | 0 |
| 2 | Agustín Codazzi – Bosconia | Ruta del sol III | 96,62 km | 1 h 4 min | 0 |
| | Bosconia – Puerto Santa Marta | Red Ferroviaria del Atlántico | 177 km | 1 h 30 min | 0 |
| 3 | Agustín Codazzi – El paso (Cesar) | Ruta del sol III – Troncal del carbón | 77,68 km | 51 min | 0 |
| | Estación El paso (Cesar) – Puerto Santa Marta | Red Ferroviaria del Atlántico | 201 km | 2 h 30 min | 0 |
| 4 | Estación El paso (Cesar) – Puerto Santa Marta | Red Ferroviaria del Atlántico | 201 km | 2 h 30 min | 0 |

| | | | | | |
|---|---|-------------------------------|----------|------------|---|
| 5 | La Jagua de Ibirico – Estación Chiriguana (Cesar) | Troncal del carbón | 40,16 km | 29 min | 1 |
| | Estación Chiriguana (Cesar) – Puerto Santa Marta | Red Ferroviaria del Atlántico | 246 km | 3 h 30 min | 0 |

Fuente: INVIAS, 2024

Ahora bien, puesto que Cundinamarca es el departamento que más registra explotación de arenas silíceas (50%), se realiza un análisis de las alternativas de transporte terrestre e intermodal para la comercialización que puede existir. Este análisis parte del supuesto de que la empresa de transformación se localizará en alguno de los municipios con mayor explotación, como Zipaquirá (87%), Ricaurte (4%), Tocancipá (4%), Soacha (4%) y en menor proporción, Villeta (1%).

Tabla 18. Alternativas de transporte terrestre e intermodal en Cundinamarca

| NO | NOMBRE DE LA RUTA | VÍA | DISTANCIA (KM) | TIEMPO DE VIAJE (HR/ MIN) | PEAJES |
|----|---------------------------------------|--|----------------|---------------------------|--------|
| 1 | Mina el tunal – Zona Franca Tocancipá | Tocancipá - Zipaquirá, Briceño - Tunja - Sogamoso/Carretera 55 y Zipaquirá – Tocancipá hacia Zona Franca. | 15,7 km | 28 min | 0 |
| | Zona Franca – Puerto Buenaventura | Troncal Central del Norte Transversal Buenaventura - Villavicencio - Puerto Carreño Autopista del Café | 538,36 km | 6 h 11 min | 9 |

| NO | NOMBRE DE LA RUTA | VÍA | DISTANCIA (KM) | TIEMPO DE VIAJE (HR/MIN) | PEAJES |
|----|---|--|----------------|--------------------------|--------|
| 2 | Mina el tunal – Zona Franca Tocancipá | Tocancipá - Zipaquirá, Briceño - Tunja - Sogamoso/Carretera 55 y Zipaquirá – Tocancipá hacia Zona Franca. | 15,7 km | 28 min | 0 |
| | Zona Franca – Puerto de Santa Marta | Troncal Central Transversal del Carare Troncal del Magdalena | 892,79 km | 9 h 55 min | 11 |
| 3 | Mina el tunal – Zona Franca Tocancipá | Tocancipá - Zipaquirá, Briceño - Tunja - Sogamoso/Carretera 55 y Zipaquirá – Tocancipá hacia Zona Franca. | 15,7 km | 28 min | 0 |
| | Zona Franca Tocancipá – Estación La Dorada (Caldas) | Troncal Central del Norte Transversal Medellín - Bogotá Vía Honda - Guaduas Transversal Las Animas - Bogotá | 209,8 km | 2 h 27 min | 3 |
| | Estación La Dorada (Caldas) – Puerto de Cartagena | Sistema Ferroviario Central | 766, 18 km | min | 0 |

Fuente: Google maps & INVIAS, 2024

Plano 4. Alternativas de transporte intermodal



Fuente: Elaboración propia

4.13. INVERSIONES REQUERIDAS

Según (First Green, 2023), la implementación de una planta de producción completamente integrada requiere un desembolso económico considerable. De acuerdo con los estándares de la industria, el costo estimado para establecer una planta de este tipo, con capacidad para fabricar 1 GW de módulos, asciende a 32.000 millones de INR¹⁴, equivalente a aproximadamente 384 millones de USD (con una tasa de cambio de 1 INR = 0.012 USD).

Adicionalmente, el estudio proporciona un desglose detallado de los costos de capital necesarios para la producción del mismo GW en cada etapa del proceso productivo, como lo evidencia la siguiente tabla:

Tabla 19. Costos de capital aproximados para producir 1GW de módulos

| SEGMENTO | GASTOS DE CAPITAL (INR, MILES DE MILLONES) | GASTOS DE CAPITAL (USD, MILLONES) |
|------------------------------|--|-----------------------------------|
| Silicio de grado metalúrgico | 3.20 | 38.4 |
| Polisilicio | 13.60 | 163.2 |
| Oblea | 6.40 | 76.8 |
| Célula | 6.40 | 76.8 |
| Módulo | 2.40 | 28.8 |
| Total | 32.00 | 384.0 |

Fuente: (First Green, 2023)

El mismo reporte presenta los costos asociados a la fabricación de módulos fotovoltaicos y a la producción de lingotes/ obleas, desagregados por componente de manera porcentual, presentados a continuación:

¹⁴ INR o rupias es la moneda oficial de la República de la India.

Tabla 20. Distribución del costo de fabricación de módulos

| COMPONENTE DE COSTO DE FABRICACIÓN DE MÓDULOS | PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN |
|---|-----------------------------|
| Célula solar | 60% |
| Bill of materials (BOM ¹⁵) | 32% |
| Otros materiales | 2% |
| Energía | 1% |
| Mano de obra | 1% |
| Otros costos | 4% |

Fuente: (First Green, 2023)

Tabla 21. Distribución del costo de producción de lingotes/ obleas

| COMPONENTE DE COSTO DE PRODUCCIÓN DE LINGOTES/ OBLEAS | PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN |
|---|-----------------------------|
| Polisilicio | 32% |
| Otros materiales | 28% |
| Energía | 13% |
| Otros gastos | 23% |
| Depreciación | 2% |
| Mano de obra | 2% |

Fuente: (First Green, 2023)

¹⁵ Una lista de materiales o Bill of Materials o BOM, es un listado completo de las materias primas, las piezas y las herramientas necesarias para fabricar un determinado producto.

Estos datos muestran que los costos en la producción de módulos fotovoltaicos y lingotes/obleas están dominados por materiales clave, como las células solares (60%) y el polisilicio (32%), respectivamente.

Además, componentes asociados al BOM (Bill of Materials)¹⁵ y otros materiales representan una proporción significativa. Esto destaca la importancia de optimizar estos insumos y reducir el consumo energético para mejorar la competitividad de la industria solar.

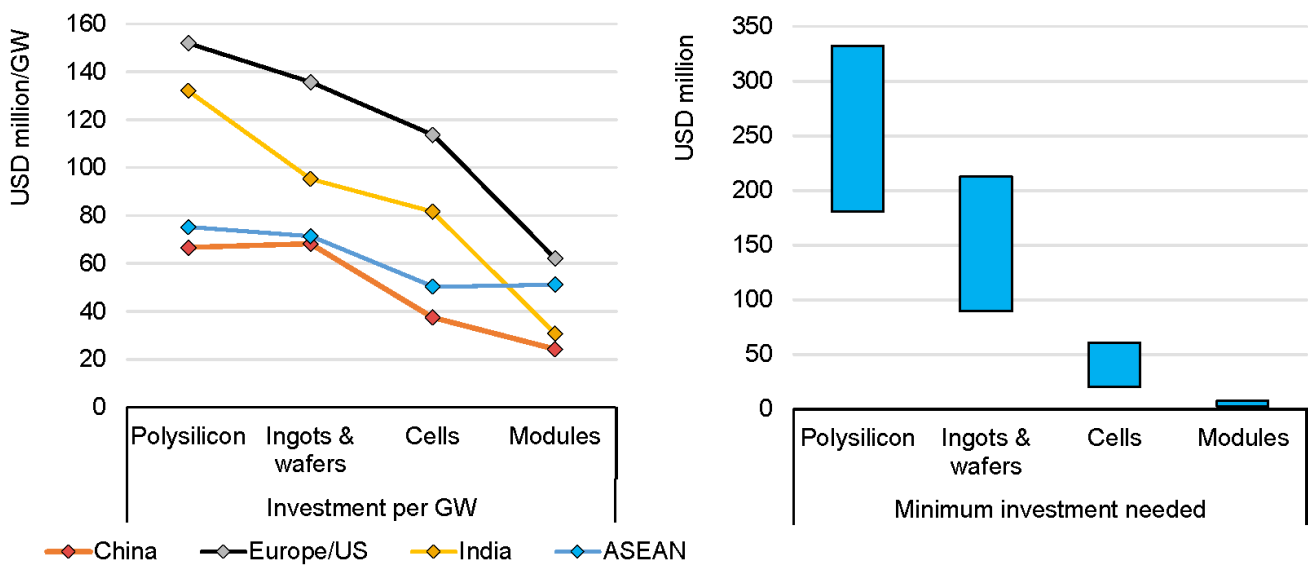
No obstante, según el Informe Especial sobre las Cadenas de Suministro Globales de Energía Solar Fotovoltaica de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) de 2022 (IEA, 2022), el capital inicial necesario para construir una planta de fabricación de paneles solares fotovoltaicos depende significativamente de factores como la región, el tipo de equipamiento, y los costos asociados al terreno, la construcción y el financiamiento.

Además, el informe señala que el capital inicial está netamente asociado a la economía de escala: a mayor capacidad instalada, menor será la inversión por unidad de producción.

Otro dato que vale la pena destacar de este informe hace referencia a la capacidad mínima instalada para la producción de polisilicio, la cual no debe ser inferior a 10.000 toneladas (3 GW) para poder garantizar la viabilidad de la inversión.

Finalmente, la IEA, presenta en la siguiente gráfica los costos de inversión al costado izquierdo, y las inversiones mínimas requeridas por segmento de la cadena productiva de paneles solares:

Figura 44. Inversiones para la fabricación de paneles solares



Fuente: Tomado de (IEA, 2022).

Es decir, de acuerdo a estas estimaciones de la IEA y de manera indicativa, un proyecto de producción de polisilicio con una capacidad instalada de 1GW podría requerir una inversión que oscile entre los 175 y 325 millones de USD. Un proyecto de producción de lingotes y obleas se estima entre 90 y 210 millones de USD, mientras que uno de células solares requeriría entre 25 y 55 millones de USD, y uno para la fabricación de módulos de hasta 5 millones de USD. Si se integra toda la cadena productiva, las inversiones mínimas variarían entre 290 y 595 millones de USD.

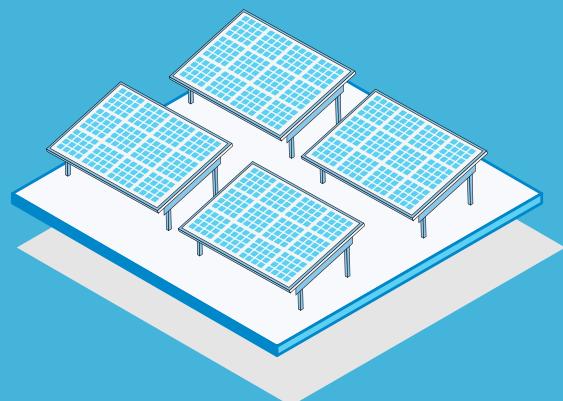
Por último, la empresa HPQ Silicon Solutions, presentó en 2019 (HPQ Silicon, 2019) una serie de estimaciones de costos de inversión para la fabricación de silicio de grado metalúrgico, que representa la primera etapa de la cadena productiva. Según estas estimaciones, para nuevas plantas tipo Greenfield con capacidad superior a 30.000 toneladas métricas por año (MTY), los costos de capital oscilan entre 8 y 9 USD por kg de capacidad anual, lo que se traduce en inversiones totales aproximadas de 240 a 270 millones de USD.

Por otro lado, las nuevas plantas basadas en la tecnología HPQ PUREVAP™ permiten alcanzar eficiencias óptimas a una escala de 5,000 MTY. En este caso, la inversión varía entre 8,59 USD/kg para una planta de 2.500 MTY y 5,93 USD/kg para una planta de 5.000 MTY, lo que implica inversiones totales de 21 a 30 millones de USD.

Esta tecnología ofrece costos operativos más bajos gracias a un mejor control del proceso, posicionándola como una alternativa más eficiente y rentable en comparación con las instalaciones tradicionale

05

ESCENARIOS PARA EL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA



Como se mencionó en el capítulo 3.1 Energías Renovables, la cadena de suministro de la energía solar fotovoltaica ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años. Sin embargo, factores como las perspectivas económicas más restrictivas, la reducción de márgenes de ganancia y la incertidumbre sobre el ritmo de implementación de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) a nivel global han llevado a diversas empresas a revisar sus planes de expansión.

Este panorama, aunque desafiante, presenta oportunidades para fortalecer la cadena productiva en diversas regiones, incluida Colombia. A medida que la industria global se ajusta, los mercados emergentes tienen la posibilidad de optimizar sus capacidades de producción, mejorar su infraestructura y consolidar procesos más eficientes.

En este contexto, el país podría desempeñar un papel clave en la expansión de la energía solar fotovoltaica, aprovechando su potencial para integrarse a la cadena global de suministro y al mismo tiempo, fomentar el desarrollo de capacidades locales. Este proceso debe comenzar con la producción de vidrio para la protección de los paneles solares, y realizar una integración progresiva de otros eslabones de la cadena de suministro de células solares

a nivel local, o de las demás industrias que utilizan el silicio como materia prima, aprovechando la diversificación productiva, la transición energética y los procesos de descarbonización son prioridades globales.

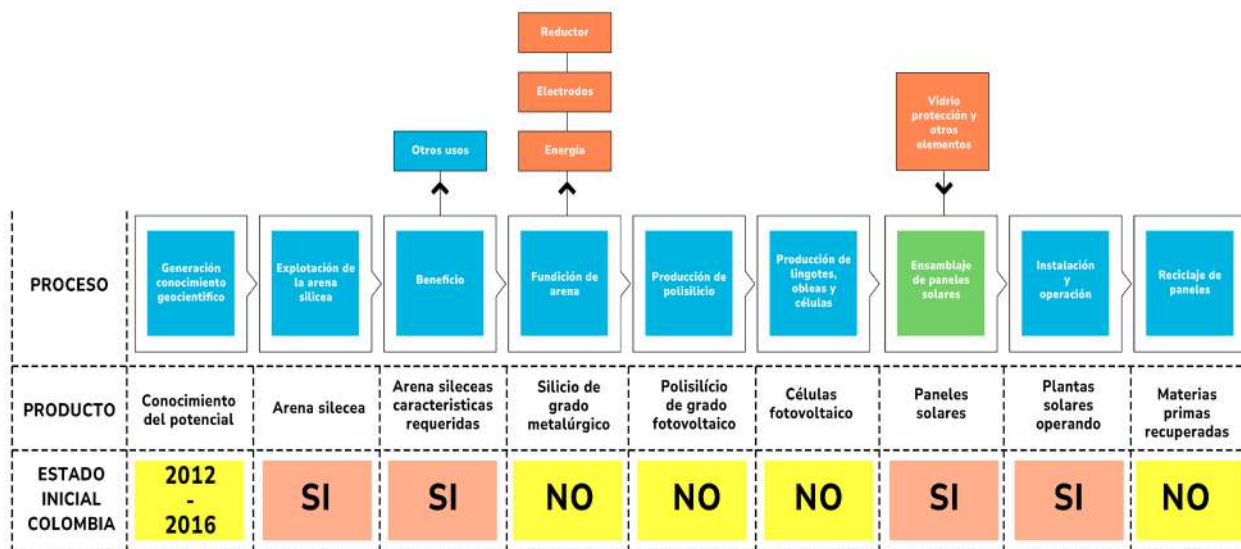
5.1. LA CADENA PRODUCTIVA EN COLOMBIA

La producción de paneles solares fotovoltaicos requiere de una cadena productiva altamente compleja y eficiente, compuesta por numerosos eslabones interconectados, cada uno con unos ciclos de producción característicos y un gran número de insumos. En este contexto, la gestión integrada de este proceso productivo es crucial para garantizar la disponibilidad de materiales en el momento adecuado, en las cantidades necesarias y a un costo competitivo (Lee & Kim, 2021).

Una coordinación efectiva entre todos los actores, desde las partes encargadas de ampliar la generación de conocimiento geocientífica de los minerales requeridos, hasta los fabricantes y empresas dedicadas al reciclaje de paneles solares, es esencial para mantener la competitividad de la industria.

En el capítulo 4. análisis de la cadena productiva de este documento, se describen los procesos y productos de la cadena productiva de los paneles solares. A partir de dicha información, se hizo una revisión de la situación actual en Colombia con el fin de identificar cuales eslabones se están desarrollando en el país y cuáles no. Los resultados obtenidos se ilustran en la Figura 45.

Figura 45. Proceso, producto y estado actual de la cadena productiva.



Fuente: Elaboración propia.

La cadena productiva de paneles solares inicia con la generación de conocimiento geocientífico, una etapa que puede ser desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) o por algún otro actor interesado en profundizar en la generación de este conocimiento. En esta fase, se identifican y caracterizan zonas con potencial para la sílice.

Seguido a esta, se encuentra la explotación minera, llevada a cabo por los titulares mineros, quienes después de haber obtenido el contrato de concesión deben tener aprobados los instrumentos técnicos mineros y ambientales. Este proceso tiene una logística asociada a la extracción y transporte de la arena sílicea desde las minas hasta las plantas de beneficio que pueden o no estar ubicadas dentro del mismo título minero (Martínez & Pérez, 2022).

La etapa siguiente consiste en la refinación de la sílice para la obtención ya sea de silicio de grado metalúrgico y sus productos posteriores, o de vidrio solar. Este proceso debe realizarse en lugares estratégicos que optimicen las rutas de transporte de insumos y productos finales, minimizando costos operativos e impactos ambientales. Además, es crucial considerar la disponibilidad y

acceso a fuentes de energía, proveedores de materias primas y la proximidad a empresas que ensamblen paneles solares.

Posteriormente, se realiza el ensamblaje y la comercialización de los paneles solares. Finalmente, una etapa crítica es la logística inversa, entendida como la gestión de los desechos generados al final de la vida útil de los paneles solares.

A partir de la etapa de refinación, las actividades son desarrolladas principalmente por empresas del sector industrial de transformación.

Es relevante destacar que los tres primeros eslabones de la cadena productiva se desarrollan actualmente en Colombia, lo que representa una ventaja competitiva para el país en términos de suministro de materia prima.

Por otro lado, las fases intermedias de la cadena, como la fundición para la obtención de silicio de grado metalúrgico, la producción de polisilicio fotovoltaico, la fabricación de lingotes, obleas y células solares, y vidrio solar aún no se desarrollan a nivel local.

Sin embargo, los procesos de ensamblaje y montaje de módulos solares ya cuentan con un nivel avanzado de desarrollo en Colombia, puesto que son realizados por empresas locales que han logrado alcanzar un alto nivel de madurez en sus operaciones.

Adicionalmente, el desarrollo de procesos industriales para el reciclaje de paneles solares se encuentra en etapas incipientes. No obstante, este eslabón es de vital importancia, ya que una adecuada gestión de los residuos, incluyendo el reciclaje de materiales como el vidrio, aluminio y silicio, es crucial para garantizar la sostenibilidad ambiental del sector solar (Chen, Wang, & Liu, 2018).

La implementación de un sistema eficiente de recolección, reciclaje y disposición de paneles solares fuera de uso es esencial no solo para mitigar los impactos ambientales, sino también para aprovechar las oportunidades comerciales

que ofrece la economía circular en el contexto de la industria fotovoltaica.

La colaboración estrecha entre fabricantes, instaladores, operadores de plantas de reciclaje y autoridades regulatorias es fundamental para establecer marcos normativos claros y sistemas eficientes de gestión de residuos. Esta integración permitiría a Colombia dar un paso hacia la construcción de una industria solar fotovoltaica sostenible y eficiente, que contribuya a la transición energética del país y la generación de valor en toda la cadena productiva.

Las etapas de la cadena productiva que aún no se ejecutan en el país representan una oportunidad clave para el desarrollo industrial, ya que la capacidad de producción nacional en estas fases podría reducir considerablemente la dependencia de proveedores externos y, al mismo tiempo, generar valor agregado en el mercado local.

Además, es importante tener en cuenta que el país ha experimentado un crecimiento en la instalación de sistemas fotovoltaicos, impulsado por políticas de incentivos a las energías renovables y un marco normativo que favorece las energías limpias.

Sin embargo, a medida que se avanza en la cadena productiva, los desafíos logísticos se intensifican debido a las exigencias de infraestructura especializada, el alto consumo energético el uso de tecnologías avanzadas y la necesidad de un sistema de transporte adecuado para productos frágiles y de alto valor, como el polisilicio y las células solares (Zhang & al., 2018). (IEA, 2022).

La cadena productiva de paneles solares implica no solo la manufactura de componentes, sino también un control de calidad riguroso, dado que la más mínima imperfección en el proceso de fabricación puede afectar el rendimiento de los paneles a largo plazo.

Para el desarrollo de la cadena productiva de paneles solares, es importante identificar los actores clave que permitan entender con mayor detalle los encadenamientos productivos, articularlos de manera efectiva para tomar decisiones relevantes, estratégicas y fomentar la innovación. Este enfoque

es esencial para garantizar la sostenibilidad en el tiempo de la producción de paneles solares.

Estos actores pueden provenir del sector público, privado y la academia, y de ellos depende un proceso que es transversal a toda la cadena productiva: la innovación (ver Figura 46). Este proceso, además de potenciar la competitividad, busca promover prácticas sostenibles que aseguren la permanencia y el crecimiento de la industria lo largo del tiempo.



Figura 46. Cadena productiva de paneles solares

Fuente: Elaboración propia.

- **Actores gubernamentales y su rol**

El rol del gobierno en la creación de ventajas competitivas para el país y sus industrias es fundamental. Según Porter (1990), éste debe actuar como un catalizador y un agente de cambio que desafíe el statu quo de la industria, promoviendo, observando y facilitando un entorno competitivo en el sector. Así mismo, debe incentivar y motivar a las empresas a elevar sus aspiraciones competitivas, aclarando que no es el responsable directo de formar una industria competitiva, sino de establecer algunos de los prerequisites para la construcción de conglomeraciones empresariales.

Por otro lado, según el GIZ (2016), las intervenciones del gobierno deben enfocarse en el establecimiento de planes de desarrollo claros y de largo plazo, y en la capacitación a nivel regional.

Tabla 22. Actores del sector público

| ACTOR | ROLES |
|---|---|
| Departamento Nacional de Planeación | <ul style="list-style-type: none"> • Apoyar la formulación, seguimiento y evaluación de políticas públicas, planes y programas a corto, mediano y largo plazo relacionados con los paneles solares. • Desarrollar planes estratégicos que alineen las políticas de gobierno con los objetivos y metas de la transición energética e industrialización. • Coordinar las diferentes carteras y agencias del gobierno para la creación de encadenamientos productivos. • Establecer un marco legal que favorezca el acceso a la infraestructura compartida, ya sea pública o privada. |
| Ministerio de Transporte | <ul style="list-style-type: none"> • Formular y adoptar políticas, planes y proyectos en materia de transporte, infraestructura y logística. Estas medidas permiten, por una parte, acceder a través del transporte multimodal a los mercados para exportar arena silíceas e importar las materias primas necesarias para el ensamble de paneles solares. • Conectar a los agentes económicos nacionales que hacen uso de los paneles solares, impulsando el desarrollo logístico de la cadena productiva de paneles solares. |
| Ministerio de Comercio, Industria y Turismo | <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar una política de diversificación industrial que proyecte el desarrollo económico del país. • Formular, adoptar e impulsar políticas públicas, planes y programas que fomenten la competitividad, el desarrollo e integración en cadenas locales, regionales y globales relacionadas con la industria de paneles solares. • Formular e impulsar las políticas públicas en materia de comercio exterior y promoción de la inversión extranjera directa que impacten la industria de paneles solares. • Diseñar incentivos y sanciones para fortalecer la cadena productiva • Crear o impulsar mecanismos para apoyar a pequeñas y medianas empresas que participan en la cadena productiva con el fin de mejorar la calidad del producto o servicio que prestan, sus procesos de gestión, entre otros. • Incentivar la asociatividad entre las empresas involucradas a lo largo de la cadena. • Revisar tratados y acuerdos internacionales de comercio e inversión para garantizar espacios para encadenamientos locales. |

| ACTOR | ROLES |
|---|--|
| <p>Ministerio de Educación y Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Formular y adoptar las políticas referentes con el establecimiento de lineamientos curriculares de las carreras técnicas, tecnológicas y profesionales en el país, así como la articulación de las entidades educativas y el sector productivo referente a la industria de paneles solares. • Formular, adoptar e impulsar las políticas públicas, planes y programas que permitan impulsar el desarrollo y adopción de avances científicos, tecnológicos y de innovación que favorezcan la productividad, el emprendimiento, la competitividad de la industria. • Promover programas educativos específicos que aumenten el conocimiento y las habilidades técnicas relacionadas con la cadena productiva de paneles solares. Esto incluye formación en áreas clave como minería sostenible, refinación de sílice, fabricación de componentes para paneles solares y desarrollo de tecnologías avanzadas para la transición energética. • Incentivar la innovación y el desarrollo tecnológico en aras de mejorar la productividad y sostenibilidad de la economía nacional. |
| <p>Ministerio de Minas y Energía</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Formular e impulsar la adopción de las políticas públicas, planes y programas en relación con el sector minero y particularmente con las arenas silíceas, que son materia prima de la industria de paneles solares con el objetivo de contribuir a su desarrollo en el país. • Impulsar los planes y programas de formalización minera para garantizar prácticas sostenibles, trazabilidad y competitividad en la extracción de arenas silíceas. • A partir de los planes estratégicos de transición energética e industrialización, definir el potencial de recursos y reservas de los minerales necesarios para el desarrollo la cadena productiva. • Conectar el sector extractivo y el industrial para la generación de valor agregado de los minerales. |
| <p>Agencia Nacional de Minería</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Administrar los recursos minerales del Estado, promoviendo y concediendo los derechos de explotación y exploración, para el caso particular de la cadena de paneles solares, de las arenas silíceas. • Administrar y hacer seguimiento a los contratos de concesión y demás títulos mineros previamente concedidos, así como realizar asistencia técnica y acompañamiento. • Proponer y apoyar al Ministerio de Minas y Energía en la formulación de política gubernamental y planes sectoriales |
| <p>Servicio Geológico Colombiano</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Adelantar programas de reconocimiento, prospección y exploración de minerales de interés (arenas silíceas) en el territorio nacional • Definir el potencial de recursos y reservas de los minerales necesarios para el desarrollo la cadena productiva, a partir de los planes estratégicos de transición energética e industrialización, • Asesorar al Ministerio de Minas y Energía en la formulación de políticas, planes y programas en materia de geociencias |
| <p>Unidad de Planeación Mine-ro-Energética</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Apoyar al Ministerio de Minas y Energía en la formulación de políticas, planes y programas que permitan satisfacer los requerimientos mineros y energéticos que requieran los agentes económicos a nivel nacional, relacionados con la industria de paneles solares. • Definir y actualizar el requerimiento de energía solar fotovoltaica del país teniendo en cuenta el consumo doméstico e industrial. |

| ACTOR | ROLES |
|---|---|
| <p>Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Ejecutar las políticas del Ministerio de Minas y Energía, relacionadas con la infraestructura energética. • Realizar estudios y análisis de diagnóstico de las necesidades energéticas de las regiones que constituyen las zonas no interconectadas en el país. • Determinar el desarrollo de proyectos energéticos solares en las regiones no interconectadas. |
| <p>Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Formular e impulsar la conservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible, incluyendo la regulación ambiental de los proyectos de energía solar y la promoción de prácticas sostenibles en toda la cadena de valor de paneles solares. |
| <p>Entidades públicas departamentales y municipales</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Cooperar en la articulación de las empresas privadas y el sector público. • Adoptar y poner en marcha las políticas, programas y proyectos que permitan el desarrollo de la cadena productiva. |

Fuente: Elaboración propia a partir de las funciones de las entidades y de (GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit), 2016)

• ACTORES PRIVADOS Y SU ROL

Los actores privados son los más relevantes y críticos para la competitividad de la industria, y por ende para el desarrollo de las cadenas productivas. Según Porter (1990), el rol de las empresas debe enfocarse en:

- Crear presión de innovación, es decir, fomentar un entorno competitivo con proveedores y clientes sofisticados y exigentes.
- Establecer mecanismos de alertas tempranas ante cambios en la industria y el sector.
- Participar activamente en la formación de clústeres para potenciar la ventaja competitiva de toda la cadena.
- Favorecer la competencia doméstica para formar entornos

favorables para la innovación de manera local.

- Globalizar las ventajas, esto es, organizar las actividades propias de la empresa que requieran proveedurías externas y priorizarlas a nivel local, teniendo un red de provisión extranjera para actividades selectivas y suplementarias, pero sin poner en riesgo los estándares de calidad.
- Generar alianzas selectivas para el desarrollo del sector.
- Seleccionar de manera óptima la localización de las operaciones, dado que el entorno define las ventajas competitivas.

Para esta cadena productiva en los diferentes eslabones se han identificado algunas empresas que son relevantes ya sea por el volumen de producción de arenas, experiencia en el sector, valor agregado que generan a las arenas, y su relación con la producción, instalación y operación de paneles solares:

Tabla 23. Actores del sector privado

| Etapa | Empresas |
|--|---|
| Generación de conocimiento geocientífico | Arenas Industriales del Llano LTDA, Cementos Argos S.A, Industrial de Materias Primas S.A.S, Mastercat LTDA, Pegomax S.A.S, entre otros ¹⁶ |
| Explotación de sílice | |
| Beneficio | Tecnoglass, Peldar, Vidrios Andinos, Vitelsa |
| Ensamblaje de paneles solares | Thermo Wire |

¹⁶ Ver ítem 2.3 Proyectos mineros

| | |
|------------------------------------|---|
| Instalación y operación de paneles | Ambiente Solar, Autosolar, Celsia, Empresas Públicas de Medellín, Enexa Energy, Enik, Erco Energy, Green Yellow, Lesso Solar Group, SolarGreen, entre otros ¹⁷ |
|------------------------------------|---|

Fuente: Páginas web de las empresas e información de la ANM

Para los procesos que aún no se realizan en Colombia, las principales empresas que desarrollan estas actividades se encuentran China, Estados Unidos, Japón, India, Alemania, y Canadá. Estos países también son actores relevantes en la producción mundial de paneles solares y la puesta en marcha de proyectos de energía solar.

- **LA ACADEMIA Y SU ROL**

La academia desempeña un papel importante en el desarrollo de las cadenas productivas al proveer mano de obra calificada para satisfacer las demandas de la industria. Las instituciones educativas deben desarrollar y ofrecer programas académicos y de formación orientados a las necesidades de la industria de paneles solares.

Además, es crucial que trabajen en conjunto con las entidades del sector público y privado para impulsar el proceso de innovación que permita impulsar la sostenibilidad de la cadena de paneles solares.

A continuación, se presenta un listado de las principales instituciones que ofrecen programas académicos orientados a satisfacer las necesidades de la industria en cada uno de los eslabones de la cadena productiva de paneles solares:

¹⁷ Según la página <https://es.enfsolar.com/directory/installer/Colombia> hay 148 empresas instaladoras de paneles solares.

Tabla 24. Oferta educativa aplicada al sector

| | NIVEL | NOMBRE PROGRAMA | UNIVERSIDAD | MUNICIPIO | DEPARTAMENTO |
|-------------|--------------------------|------------------------------------|--|--------------|--------------------|
| 1. | Pregrado | Ingeniería en minas | Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia | Sogamoso | Boyacá |
| | | | Universidad Francisco de Paula Santander | Cúcuta | Norte de Santander |
| | | | Fundación Universitaria del Área Andina | Valledupar | Cesar y Bogotá D.C |
| | | Ingeniería de minas y metalurgia | Universidad Nacional de Colombia | Medellín | Antioquia |
| | | Ingeniería metalúrgica | Universidad Industrial de Santander | Bucaramanga | Santander |
| | | | Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia | Tunja | Boyacá |
| | | Ingeniería de materiales | Universidad de Antioquia | Medellín | Antioquia |
| | | | Institución Universitaria Pascual Bravo | Medellín | Antioquia |
| | | | Universidad de Medellín | Medellín | Antioquia |
| | | | Universidad del Valle | Cali | Valle del Cauca |
| | | Fundación Universitaria Monserrate | Bogotá D.C | Cundinamarca | |
| | | Ingeniería geológica | Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia | Sogamoso | Boyacá |
| | | | Universidad Nacional de Colombia | Medellín | Antioquia |
| | | | Fundación Universitaria del Área Andina | Valledupar | Cesar |
| | | Geología | Universidad EAFIT | Medellín | Antioquia |
| | | | Universidad del Norte | Barranquilla | Atlántico |
| | | | Universidad Nacional de Colombia | Bogotá D.C | Cundinamarca |
| | | | Universidad Industrial de Santander | Bucaramanga | Santander |
| | | | Universidad de Santander | Bucaramanga | Santander |
| | | | Universidad de Caldas | Manizales | Caldas |
| | | | Universidad de Pamplona | Pamplona | Norte de Santander |
| Geociencias | Universidad de los Andes | Bogotá D.C | Cundinamarca | | |

| | NIVEL | NOMBRE PROGRAMA | UNIVERSIDAD | MUNICIPIO | DEPARTAMENTO |
|----|-----------|--|--|-------------------------------|--------------------|
| 2. | Posgrado | Especialización en Gestión del Negocio Minero | Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín | Medellín | Antioquia |
| | | Especialización en Materiales y Procesos | Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín | Medellín | Antioquia |
| | | Especialización en Recursos Minerales | Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín | Medellín | Antioquia |
| | | Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales | Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín | Medellín | Antioquia |
| | | Maestría en Ingeniería – Materiales y Procesos | Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín | Medellín | Antioquia |
| | | Especialización en Derecho Minero y Ambiental | Universidad Autónoma Latinoamericana-UNAULA | Medellín | Antioquia |
| | | Maestría en Ingeniería de Materiales | Universidad Industrial de Santander | Bucaramanga | Santander |
| | | Maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales | Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia | Tunja | Boyacá |
| | | Maestría en Energías Renovables | Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia | Duitama | Boyacá |
| | | Maestría en Materiales y procesos industriales | Universidad ECCI | Bogotá D.C | Cundinamarca |
| | | Maestría en Ciencias – Geología | Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá | Bogotá D.C | Cundinamarca |
| 3. | Doctorado | Doctorado en Geociencias | Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá | Bogotá D.C | Cundinamarca |
| | | Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de los Materiales | Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín | Medellín | Antioquia |
| | | Doctorado en Ingeniería y Ciencia de los Materiales | Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia | Tunja | Boyacá |
| | | Doctorado en Ingeniería de Materiales | Universidad Industrial de Santander | Bucaramanga | Santander |
| 4. | Tecnólogo | Supervisión de labores mineras | SENA | El Bagre Antioquia y Sogamoso | Antioquia y Boyacá |

| | NIVEL | NOMBRE PROGRAMA | UNIVERSIDAD | MUNICIPIO | DEPARTAMENTO |
|----|---------|--|---|-------------|--------------|
| 5. | Técnico | Aplicación de la normatividad y estándares de Seguridad e higiene en procesos de minería a Cielo abierto | SENA | El Bagre | Antioquia |
| | | Técnico profesional en microfundición de metales | Corporación Escuela Tecnológica del Oriente | Bucaramanga | Santander |

Fuente: Páginas web de los centros educativos y del Sistema Nacional de Información de la Educación Superior (SNIES)¹⁸

Si bien la industria del silicio metalúrgico, el polisilicio, lingotes, obleas y células fotovoltaicas aún no se realiza aún en Colombia, es importante que estos programas empiecen a integrar este conocimiento en la formación de profesionales y técnicos; que los grupos de investigación se vinculen con la industria de las energías renovables con el fin de identificar mejoras en los procesos y productos, y alternativas para la implementación de tecnologías y fabricación de los insumos requeridos.

5.2. ANÁLISIS DE OPORTUNIDADES Y DEBILIDADES

El potencial de Colombia para desarrollar la cadena productiva alrededor del mineral estratégico de arenas silíceas se encuentra estrechamente ligado a la abundancia de este recurso en el territorio nacional. En este sentido, se presenta un mapeo de oportunidades y debilidades que, si se gestionan adecuadamente, podrían convertirse en un insumo clave para el crecimiento de la industria solar a nivel nacional.

Estas acciones podrían facilitar la posibilidad de crear un mercado local de materiales de alta calidad y competitivos a nivel internacional. Invertir en investigación, desarrollo e innovación, así como promover incentivos para la

¹⁸ <https://snies.mineducacion.gov.co/portal/>

producción local, permitiría a Colombia aprovechar al máximo sus minerales estratégicos y desarrollar una industria solar competitiva a nivel internacional.

Figura 47. Necesidades específicas en la cadena productiva de paneles solares



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detalla un análisis de las necesidades específicas identificadas en la ilustración anterior en función de la caracterización de las arenas silíceas, producción de silicio de grado metalúrgico, producción de polisilicio, lingotes, obleas y células, y ensamblaje de paneles solares.

5.2.1. CONOCIMIENTO DEL RECURSO

- **Definición del potencial mineral:** Si bien el SGC ha identificado unas zonas con favorabilidad geológica para arenas silíceas en Colombia, es importante definir el potencial minero. Esto permitirá tener más información del recurso con el que eventualmente se podría contar para el desarrollo de la industria.
- **Reportes bajo el ECRR:** Como se ha mencionado anteriormente, solo 7 de los 59 títulos que tienen instrumento técnico aprobado para arenas silíceas han presentado el reporte de sus recursos y reservas (R&R) bajo el estándar. Adicionalmente, solo 5 de ellos presentan información sobre la calidad química de su mineral. Esta situación limita las proyecciones necesarias para el desarrollo de la industria del silicio metalúrgico con los productos posterior, y el vidrio solar.

Si bien con los recursos reportados bajo el estándar, y las proyecciones de consumo interno con el escenario más ambicioso de expansión energética presentado en el capítulo 3.2.2, se evidencia que se cubre la demanda interna, es necesario contar con más información para evaluar si Colombia tiene el potencial para ingresar y competir en el mercado regional.

- **Caracterización físico - química:** Realizar este tipo de caracterización es fundamental para determinar la calidad del recurso, y evaluar si

cumple con los requisitos de pureza para el desarrollo de la industria fotovoltaica y del vidrio solar. Este análisis también permite definir la mejor alternativa de procesamiento que requiere el mineral para lograr el máximo beneficio económico de la explotación de recursos (Cook, 2000).

Entre más alta sea la pureza del sílice (>99,9%) mayor será su valor de venta y el valor agregado que pueda tener, ya que puede ser usado en industrias especiales o de alta tecnología (semiconductores para, paneles solares, fibra óptica para redes de telecomunicaciones y biotecnología, entre otros) y fabricación de vidrios y vidrios especializados (Febriana, y otros, 2024).

Adicionalmente, en algunos reportes y literatura consultada (Vatalis, Charalambides, & Ploutarch Benetis, 2015) (PWC, 2022) se menciona que para la producción de silicio de grado metalúrgico se requieren cristales de cuarzo de alta pureza (HPQ, por sus siglas en inglés); es decir, que contenga menos de 50 µg/g de impurezas y que no tenga inclusiones microminerales y líquido atrapado, adicionalmente los tamaños deben ser mínimo de 10 mm para que el proceso de fundición sea más eficiente.

Por otra parte, investigaciones recientes (Bogner, 2023), señalan que la mayoría de las arenas de sílice de alta pureza contienen elementos no deseados, incluso después del procesamiento. Además, el tamaño de grano es menor al requerido lo que incrementa la necesidad de caracterizar químicamente los yacimientos de interés.

Por lo anterior, resulta esencial que los explotadores mineros lleven a cabo una caracterización detallada del yacimiento, en cumplimiento de la normativa minera vigente en Colombia, particularmente lo estipulado en el Código de Minas (Ley 685 de 2001) y otras disposiciones reglamentarias. Esta caracterización debe incluir la elaboración de un modelo geológico-geotécnico que permita determinar la distribución espacial y las propiedades físicas y químicas del depósito mineral. Asimismo, es indispensable realizar análisis integrales de calidad o tenor, para garantizar la optimización del aprovechamiento del recurso y su alineación con las exigencias del mercado.

El planeamiento minero, debe diseñarse de manera técnica y estratégica, en concordancia con los requerimientos establecidos por las autoridades mineras y ambientales. Igualmente, se deben desarrollar estudios de mercado que identifiquen oportunidades de comercialización y evalúen la demanda, tanto local como regional, del mineral a explotar.

En paralelo, los procesos de beneficio y transformación deben estar enmarcados en estándares técnicos que maximicen el valor agregado del recurso, promoviendo tecnologías limpias y eficientes.

Finalmente, estas acciones no solo deben enfocarse en determinar los usos óptimos de los minerales, sino también en implementar estrategias que fomenten encadenamientos productivos. Este enfoque contribuye al fortalecimiento del desarrollo socioeconómico del país y se alinea con las metas trazadas en los planes nacionales de desarrollo.

Tabla 25. Mapeo de oportunidades y debilidades en el conocimiento del recurso.

| OPORTUNIDADES | DEBILIDADES |
|--|--|
| <p>Las arenas silíceas han sido identificadas como uno de los minerales estratégicos necesarios para el autoabastecimiento, desarrollo industrial, transición energética justa e infraestructura pública</p> <p>Existe disponibilidad de yacimientos de arenas silíceas en diferentes regiones del país</p> <p>Se dispone de información inicial asociada a la caracterización de las arenas silíceas (química, física, forma)</p> <p>Uso sostenible de recursos para el desarrollo de energías renovables</p> | <p>Limitada inversión en investigación geocientífica y recursos para ampliar el desarrollo de estudios detallados</p> <p>Se requiere mayor conocimiento de recursos y reservas bajo estándares nacionales e internacionales</p> <p>Necesidad de disponer información generalizada acerca de las características químicas de las arenas silíceas en Colombia.</p> |

5.2.2. PROCESAMIENTO Y LA PURIFICACIÓN

Capacitación del personal: Como se mencionó y se explicó anteriormente, existe una carencia de recursos humanos capacitados en el sector de procesamiento de arenas silíceas para la fabricación de silicio de grado metalúrgico y los productos posteriores, lo cual limita la capacidad del país para desarrollar estos procesos y que los productos cumplan con los estándares internacionales de calidad y tengan un costo competitivo en el mercado.

Infraestructura inadecuada: La infraestructura necesaria para el procesamiento del silicio es insuficiente. Esto incluye desde la falta de plantas de procesamiento adecuadas hasta el transporte ineficiente de los materiales, lo que incrementa los costos y reduce la competitividad.

Tabla 26. Mapeo de oportunidades y debilidades en el procesamiento y purificación.

| OPORTUNIDADES | DEBILIDADES |
|--|---|
| <p>Potencial de establecer las actividades de beneficio necesarias para alcanzar las especificaciones requeridas por la industria a un costo competitivo</p> <p>Oportunidad para adoptar tecnologías avanzadas en el procesamiento del silicio, como el uso de métodos de purificación más eficientes y menos costosos</p> <p>Existe a nivel de gobierno incentivos fiscales y programas de apoyo para la inversión en tecnologías limpias, que podrían aplicarse a la purificación y procesamiento del silicio</p> <p>La adopción de procesos de purificación más sostenibles podría mejorar la competitividad de los productos colombianos en el mercado internacional, especialmente en mercados verdes</p> | <p>Es necesario establecer si las arenas silíceas disponibles en Colombia cumplen las especificaciones requeridas para la fabricación de silicio de grado metalúrgico</p> <p>Falta de formación técnica, lo cual limita la capacidad del país para desarrollar procesos de purificación que cumplan con los estándares internacionales de calidad</p> <p>Carencia de plantas de procesamiento e infraestructura necesaria a nivel nacional</p> <p>Falta de acuerdos y alianzas estratégicas con actores globales que permitan el acceso a tecnologías de purificación avanzadas y el intercambio de conocimientos</p> |

5.2.3. INTEGRACIÓN EN CADENAS DE VALOR GLOBALES

Baja participación en cadenas de valor: Colombia ha tenido dificultades para integrarse efectivamente en las cadenas de valor globales, especialmente en el sector de manufactura. Aunque hay un aumento en la participación de este sector, esto no ha resultado en un incremento significativo del valor agregado a nivel nacional.

Dependencia de mercados externos: La economía colombiana es vulnerable a las fluctuaciones de los mercados internacionales, lo que puede afectar la demanda de silicio y sus derivados. La dependencia de la exportación de

materias primas sin un valor agregado limita el desarrollo de la industria local.

Tabla 27. Mapeo de oportunidades y debilidades en cadenas de valor globales.

| OPORTUNIDADES | DEBILIDADES |
|--|---|
| <p>La creciente demanda global de energías renovables abre oportunidades para que Colombia participe en mercados internacionales, especialmente en América Latina y el Caribe</p> <p>Potencial para formar alianzas con empresas multinacionales y líderes del sector, facilitando la transferencia de tecnología y acceso a mercados globales</p> <p>El país ha firmado acuerdos internacionales y políticas públicas sobre el cambio climático y la energía renovable, lo que facilita la integración en cadenas de valor sostenibles a nivel global</p> <p>Colombia tiene la posibilidad de adoptar estándares internacionales de calidad y sostenibilidad, lo que le permitiría posicionarse como un proveedor confiable en el mercado</p> | <p>La falta de competitividad en precios, debido a costos altos de producción e importación de materiales, limita el acceso a mercados internacionales clave.</p> <p>La limitada presencia de empresas colombianas en el sector solar global dificulta la construcción de relaciones estratégicas a largo plazo</p> <p>La dependencia en la importación de materias primas e insumos incrementa los costos y reduce la competitividad de la industria</p> <p>La economía colombiana es vulnerable a las fluctuaciones de los mercados internacionales, lo que puede afectar la demanda de silicio y sus derivados. La dependencia de la exportación de materias primas sin un valor agregado limita el desarrollo de la industria local</p> |

5.2.4. PRODUCCIÓN DE VIDRIO SOLAR PARA PANELES

Actualmente, Colombia no produce vidrio solar para paneles de manera local, aunque cuenta con una capacidad instalada para la producción de vidrio convencional. Sin embargo, la industria nacional no ha desarrollado esta alternativa de producto debido a la falta de un mercado garantizado que pueda cubrir las inversiones necesarias para su transformación.

Es decir, la oportunidad asociada a la producción de vidrio solar en el país requiere que las capacidades mínimas de producción para alcanzar la rentabilidad esperada por los industriales sean utilizadas plenamente. Esto

requiere no solo satisfacer la demanda de la industria colombiana, sino también identificar mercados adicionales en países cercanos que puedan mantener esa capacidad instalada operando de forma continua.

Ahora bien, si revisamos las cifras de vidrio templado comercializados en la región de América Latina y el Caribe, insumo requerido para el vidrio solar de paneles, se hace evidente su importancia en la región. El total importado en 2023 fue de US 201 millones, siendo México y Brasil los principales importadores con una participación de 59,2% y 9,9% respectivamente (IRENA, 2024). En ese sentido, los mercados de ambos países pueden ser considerados como objetivos potenciales para la producción de vidrio templado colombiano.

Así mismo, es importante considerar que las exportaciones de vidrio templado de la región representan tan solo el 0,55% del total del mundo, lo que claramente refleja un mercado dominado por otros países fuera de la región. Esta situación puede convertirse en una oportunidad de negocio para Colombia si se realizan de manera adecuada las inversiones para la transformación del actual aparato productivo de este sector en el territorio.

5.2.5. ENSAMBLAJE DE PANELES SOLARES

Este eslabón de la cadena de producción, que puede implementarse como una medida a corto plazo, está asociada a la creciente demanda que se espera para la instalación de paneles solares en América Latina y el Caribe. Esta tendencia abre oportunidades significativas para la creación de nuevas empresas dedicadas al ensamblaje de paneles solares, fortaleciendo así la industria regional.

En correspondencia con lo anterior, resulta destacable observar como en la región existió un incremento del valor de las importaciones de las células fotovoltaicas ensambladas en módulos o formadas en paneles del año 2022

al 2023 (IRENA, 2024). Este crecimiento fue del 12,43 %, equivalente a US 539 millones de dólares adicionales. Si bien es cierto la cifra representa tan solo el 3,9 % del aumento total en el mundo para 2023, muestra el auge del mercado de los paneles ensamblados en la región.

En cuanto a la participación por país en estas importaciones en 2023, Brasil concentra el 78,8% del valor total, seguido por Colombia (8,2%), República Dominicana (3,7%), Chile (2,8%) y México (2,7%). En conjunto, estos países concentran el 96,3 % de las importaciones de paneles solares ensamblados en América Latina y el Caribe. A pesar de esta concentración, es importante mencionar que el crecimiento de las importaciones entre 2022 y 2023, también corresponde al incremento que han registrado países como Nicaragua, Jamaica o Uruguay.

Alineado con lo anterior, es interesante observar cómo Panamá ha emergido como un exportador significativo de células fotovoltaicas ensambladas en módulos o formadas en paneles en la región. Aunque esto no obedece a la manufactura de estos productos, se encuentra orientado al ensamblaje. Su mayor mercado, de acuerdo con cifras de 2023, es Nicaragua (16,3 %), pero también registra operaciones con otros países de la región como Honduras (8,6 %), República Dominicana (8,1 %), Chile (7 %), Guatemala (5,6 %), El Salvador (4,3 %) y Perú (3,9 %), entre otros.

Por estos argumentos, es posible concluir que existe un mercado potencial para el ensamblaje de paneles en la región, al cual Colombia podría ampliar su comercio. Esto incluye fortalecer las relaciones comerciales con mercados donde ya se han hecho algunas exportaciones, como Jamaica o República Dominicana, así como explorar nuevos mercados que están despegando como Nicaragua, Perú, Honduras o Chile. Además, Colombia podría incursionar en mercados de alta demanda como es el caso de Brasil, México o República Dominicana.

5.3. ANÁLISIS AMBIENTAL DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

Al igual que los distintos procesos productivos en el mundo generan emisiones de gases de efecto invernadero, la obtención de silicio, sea de grado metalúrgico (Si-MG) o polisilicio (Poly-Si), también. A nivel internacional se han desarrollado múltiples estudios que permiten determinar la huella de carbono que genera este proceso y lograr comparaciones entre los distintos grados de silicio.

En la producción de obleas de silicio se comprenden las etapas de minería, refinación, purificación y formación de lingotes. Desde el inicio de la cadena se generan emisiones de gases de efecto invernadero. En la obtención de silicio se reportan dos valores de emisión, de manera estequiométrica se reporta que emite 3,26 kg CO_{2 eq} por cada kg de Si, el otro valor es de 0,017 kg CO_{2 eq} producto de un análisis de ciclo de vida desarrollado en China.

Figura 48. Uso de electricidad y emisión de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) de los procesos involucrados para producir 1 kg de SOG poli-Si.

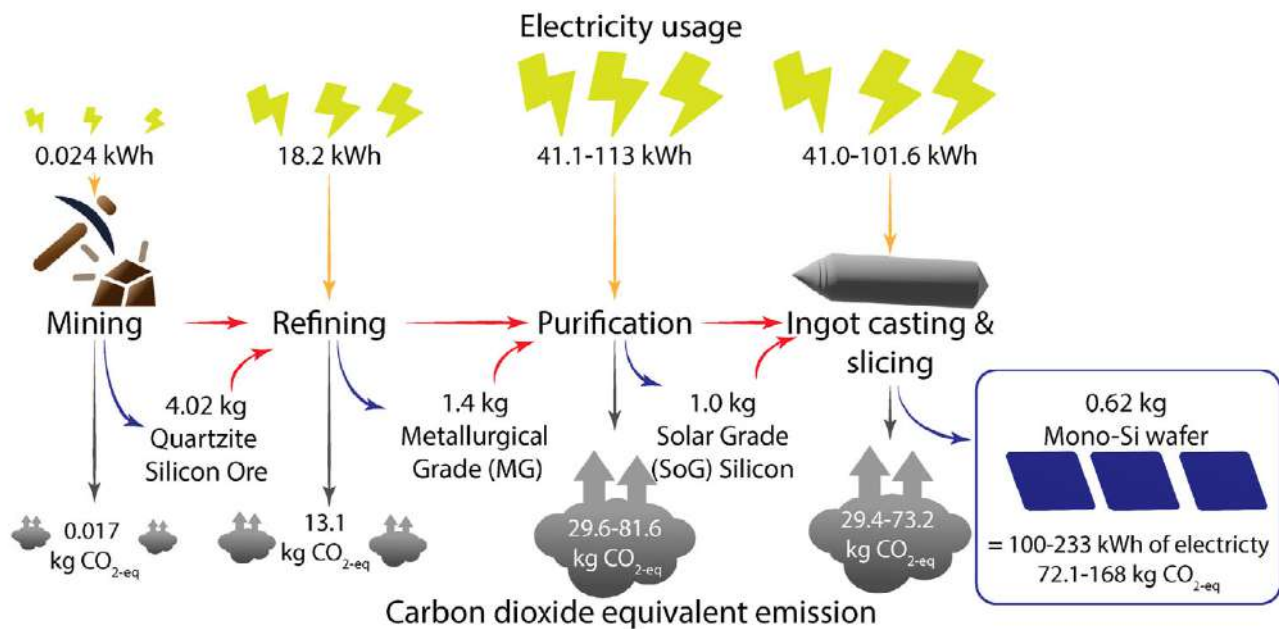


Figure 3. Electricity usage and carbon dioxide equivalent (CO₂-eq) emission from the processes involved for producing 1 kg of SOG poly-Si or a 0.62 kg silicon wafer from 4.02 kg of quartzite.

Fuente: Hallam et al., 2022

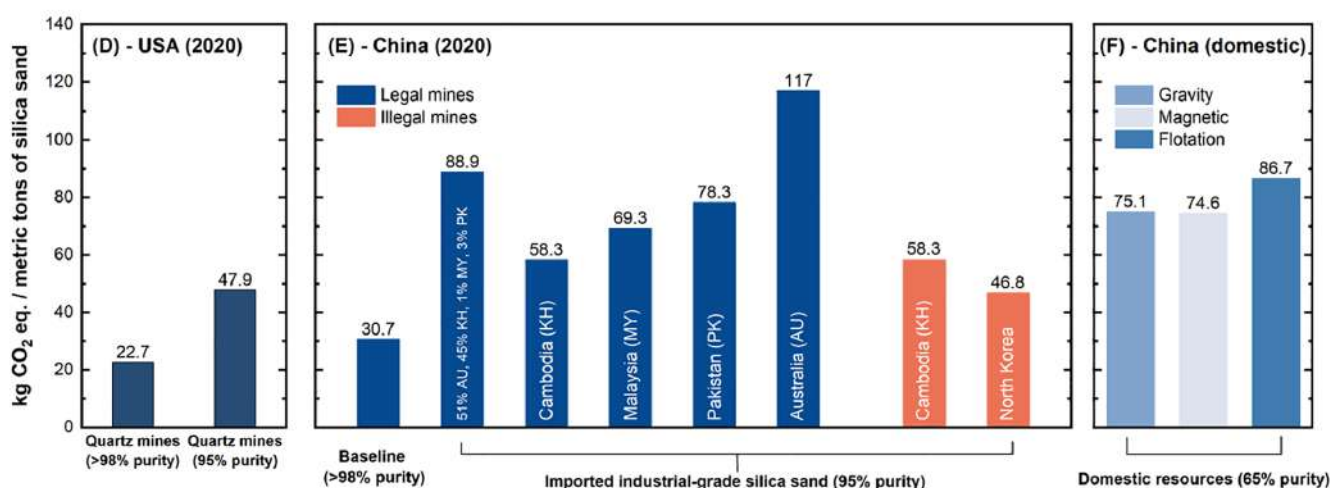
Como muestra la Figura 48, el silicio se somete a un proceso de refinación para obtener silicio grado metalúrgico. En los análisis de ciclo de vida que se han desarrollado se reportan distintos valores de emisiones para el Si-MG. Por un lado, se encuentra que la producción de 1,4 kg de Si-MG emite 13,1 kg CO₂eq. Otro estudio reporta la emisión de 14,57 kg CO₂eq por 1 kg de Si-MG.

Es importante resaltar que las emisiones generadas dependen del grado de pureza del silicio empleado debido a que, un menor grado de pureza implica mayor procesamiento para lograr la pureza requerida.

La Figura 49 muestra la diferencia en las emisiones de gases de efecto

invernadero en dióxido de carbono equivalente, dependiendo de la pureza del cuarzo y, en el caso de China, del país de origen. En ella se evidencia que las emisiones asociadas a las minas de cuarzo con una pureza superior al 98% es casi la mitad de aquellas con una pureza del 95%, en el caso estadounidense. En el caso chino, se encuentra que las emisiones de un cuarzo de pureza superior al 98% incrementan un poco más que en Estados Unidos debido a las fuentes energéticas empleadas. Para definir las emisiones asociadas a la producción de Si-MG en Colombia es necesario definir la pureza del cuarzo a emplear.

Figura 49. Emisiones en Kg CO₂eq por tonelada métrica de arena sílicea dependiendo de la pureza del cuarzo y el país de origen



Fuente: Heidari y Anctil, 2022

Asociado a lo anterior, el Si-MG se somete a un proceso de purificación con el fin de obtener silicio grado solar (SoG) o Poly-Si. En este proceso se generan emisiones importantes por el proceso que la purificación conlleva.

Los estudios sobre las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de silicio grado solar (SoG) presentan un rango considerable.

(Yang, y otros, 2023), reportan que los procesos desarrollados después de la obtención de Si-MG emiten cerca de 21,17 kg CO_{2eq}; por su parte, (Hallam, y otros, 2022). registran una emisión de entre 29,6 – 81,6 kg CO_{2eq} para el mismo proceso. Estos valores son considerablemente más altos que las emisiones directas de la producción de Si-MG, que según otros estudios oscilan entre 13,1 y 14,57 kg CO_{2eq} por kg de Si-MG. Esto indica que la purificación del silicio es una etapa altamente emisora en el proceso de fabricación de obleas.

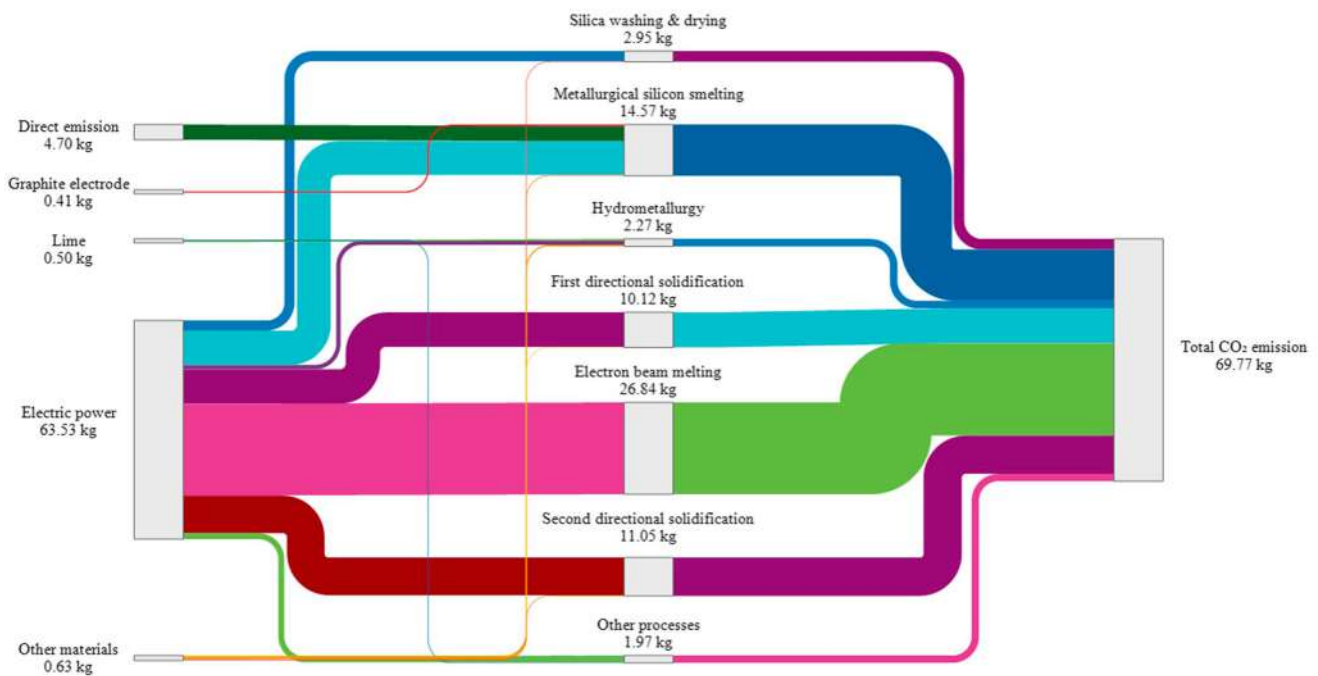
Al considerar el ciclo de vida completo, producir 1 kg de SoG emite cerca de 69,77 y 186 kg CO_{2eq}, según los estudios mencionados. Este amplio rango se debe a diversos factores, como la pureza del cuarzo inicial, la fuente de energía utilizada y las tecnologías de purificación empleadas. Es importante destacar que una proporción significativa de estas emisiones se atribuye al consumo de energía eléctrica, especialmente en regiones donde la generación eléctrica depende en gran medida de combustibles fósiles.

Dentro de la huella de carbono asociada a la producción de obleas de silicio se encuentra el uso de energía como un gran aportante a esta primera debido a las grandes cantidades de energía que implica el producir las obleas de silicio. De acuerdo con (Hallam, y otros, 2022) se requiere 18,2 kWh por cada 1,4 kg de silicio MG, que a su vez se utiliza para fabricar 1 kg de Poly-Si de grado solar altamente purificado, también se requiere entre 70 y 90 kWh de electricidad directa en reactores Siemens de nueva generación. La formación de lingotes a partir de 1 kg de (Poly-Si) de grado solar requiere 41 kWh de electricidad para el crecimiento de cristales y la formación de obleas para producir 0,62 kg de obleas de Si. En total se requiere directamente de un rango de 161 a 375 kWh por cada kg de oblea de Si.

Aunque la información presentada anteriormente puede ser cuestionada por la emisión de CO_{2eq} a la atmósfera, es importante considerar que, en los análisis realizados, la electricidad proviene de combustibles fósiles, como el carbón (0,7 - 1 kgCO_{2eq} por cada kWh consumido para la electricidad en China),

y las emisiones para las necesidades directas de electricidad de las obleas de Si están cerca de 244 - 300 kg CO_{2 eq} por cada kg Oblea de Si (considerando nuevamente la producción en China). Por su parte, (Yang, y otros, 2023) como producto de la simulación realizada, reportan que la producción de 1 kg de Poly-Si emite 69,77 kg de CO_{2 eq} (Figura 50), donde aproximadamente el 91% de las emisiones se relacionan directamente al suministro de energía empleado.

Figura 50. Emisiones asociadas a la producción de 1kg de Poly-Si.



Fuente: Yang et al., 2023

Ahora bien, es importante resaltar que, a diferencia de China, cuya matriz energética aún es altamente dependiente del carbón, Colombia tiene como fuente principal de energía la hidroeléctrica. Este tipo de energía permite una reducción del 96,2% en las emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación con las fuentes energéticas que aún dependen de los combustibles fósiles.

Además de lo anterior, es importante indicar cuales son los procesos que directamente pueden ser electrificables en el proceso de producción de paneles solares y aquellos que aún se encuentran en fase de investigación. Como se muestra en la Tabla 28, la mayoría de los procesos pueden ser alimentados directamente con energía eléctrica, lo que para el caso de Colombia es una ventaja competitiva toda vez que aproximadamente el 70% de su generación eléctrica proviene de fuentes renovables, como la hidráulica y la solar.

Tabla 28. Fuente de emisiones

| PROCESO | FUENTE DE EMISIÓN |
|---------------------------------------|--------------------|
| Fusión por haz de electrones | Eléctrico |
| Solidificación direccional secundaria | Eléctrico |
| Solidificación direccional primaria | Eléctrico |
| Fusión de silicio metalúrgico | Eléctrico |
| Fusión de silicio metalúrgico | Emisión directa |
| Fusión de silicio metalúrgico | Emisión directa |
| Lavado y secado de sílice | Eléctrico |
| Fractura | Eléctrico |
| Refinamiento secundario | Eléctrico |
| Hidrometalurgia | Cal |
| Hidrometalurgia | Ácido clorhídrico |
| Hidrometalurgia | Ácido fluorhídrico |

| PROCESO | FUENTE DE EMISIÓN |
|-------------------|-------------------|
| Pesaje y embalaje | Eléctrico |

Es por ello que, tomando como referencia el factor de emisión calculado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) para la energía eléctrica, el cual es de 0,126 kgCO₂/kWh, y multiplicando por el consumo aproximado para la producción de un kg de oblea de silicio reportado anteriormente (161 – 375 kWh), se obtiene que las emisiones aproximadas para Colombia oscilarían entre 20,29 y 47,25 kg CO₂_{eq}. Esto representa una reducción de cerca del 88% en las emisiones en comparación con a China, cuya matriz energética sigue dependiendo en gran medida de combustibles fósiles.

Adicionalmente, la reducción de emisiones también se puede lograr haciendo uso de la misma energía fotovoltaica. En este caso, las emisiones asociadas a la producción de 1 kg de oblea de Silicio oscilarían entre 26,46 y 61,64 kg CO₂_{eq}, tomando como referencia el factor de emisión reportado por el portal XM que es de 164,38 g CO₂_{eq}/kWh. A

Este enfoque implicaría un total de 11,3 - 26,5 Gt de CO₂_{eq} para una electrificación total de 63,4 TW. Ahora bien, en lo que va corrido del 2024, el país ya ha incorporado aproximadamente 2GW de energía renovable en su matriz energética. Además, se proyecta la incorporación de nuevos proyectos de energía renovable, lo que fortalecerá aún más la sostenibilidad de la matriz energética nacional, posicionándola como una de las más limpias de la región.

5.4. ALTERNATIVAS PARA EL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA EN COLOMBIA

En la Tabla 29 se presentan tres alternativas para el desarrollo de la industria en el país, el primer escenario propone impulsar la producción nacional de

vidrio para paneles solares. Esto reduciría la dependencia de importaciones, generaría empleo y fomentaría el desarrollo tecnológico local. Para lograrlo, se sugieren alianzas entre el sector público y privado para investigación y desarrollo, así como la creación de centros de investigación especializados en vidrio solar.

El segundo escenario consiste en la producción nacional de silicio de grado metalúrgico, que además de impulsar la industria fotovoltaica, también apalancará a productos industriales y de consumo como: piezas de caucho de silicona, espuma de uretano, selladores, adhesivos, lubricantes, aditivos alimentarios, recubrimientos, cosméticos, aluminio y baterías (Ferroglobe, 2024).

El tercer escenario se centra en la producción nacional de polisilicio, que garantizaría el suministro, reduciría costos y fortalecería la cadena de valor de la industria fotovoltaica colombiana; haciendo énfasis en la adopción de tecnologías de producción de bajo consumo energético y fuentes de energía renovables.

Tabla 29. Descripción de escenarios para el desarrollo de la industria en Colombia.

| ESCENARIO | INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO | INCENTIVOS GUBERNAMENTALES | FOMENTO DE LA DEMANDA | INFRAESTRUCTURA |
|---|---|--|--|--|
| 1. Producción de vidrio para paneles solares | <p>Alianzas estratégicas: Establecer colaboraciones con países con experiencia en el desarrollo de la cadena, universidades, centros de investigación, empresas internacionales para desarrollar tecnologías de fabricación de vidrio solar adaptadas a las condiciones locales.</p> <p>Centros de investigación especializados: Crear centros de investigación dedicados al desarrollo de nuevos tipos de vidrio con mayor eficiencia y durabilidad, aprovechando la diversidad de recursos naturales de Colombia.</p> | <p>Exenciones tributarias: Ofrecer exenciones fiscales a las empresas que inviertan en la producción de vidrio solar.</p> <p>Crédito fiscal: Fomentar líneas de créditos para las empresas que adquieran vidrio solar producido nacionalmente.</p> <p>Programas de financiación: Establecer programas de financiación a bajo costo para la instalación de líneas de producción de vidrio solar.</p> | <p>Fomento en la instalación de plantas de ensamblaje de paneles solares: Se requiere promover este eslabón de cadena que a su vez permitirá el crecimiento de la demanda de partes que se requieren para el ensamblaje, entre ellas el vidrio solar.</p> <p>- Identificación de países cercanos geográficamente con industria ensambladora de paneles solares y que demanden vidrio fotovoltaico.</p> <p>Compras del sector público: Priorizar la adquisición de productos fabricados con vidrio solar colombiano en los procesos de compra del sector público.</p> | <p>Parques industriales especializados: Desarrollar parques industriales especializados en la fabricación de componentes fotovoltaicos, incluyendo el vidrio solar.</p> <p>Logística: Mejorar la infraestructura logística para facilitar el transporte de materias primas y productos terminados.</p> |

| ESCENARIO | INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO | INCENTIVOS GUBERNAMENTALES | FOMENTO DE LA DEMANDA | INFRAESTRUCTURA |
|--|---|---|---|---|
| <p>2. Producción de Silicio Metalúrgico</p> | <p>Nuevas tecnologías de producción: Desarrollar e implementar procesos y tecnologías para la reducción de arena silíceas que alcance las características de calidad del silicio de grado metalúrgico, y que de forma preliminar tenga oportunidad de competir en los mercados en términos de precio.</p> <p>Reducción de emisiones: Desarrollar procesos productivos que generen emisiones bajas de CO2 o que utilice tecnologías de captación de carbono.</p> | <p>Fondos de innovación: Crear fondos de innovación para apoyar proyectos de investigación y desarrollo en el área de producción de silicio de grado metalúrgico.</p> <p>Convenios: Promover alianzas con gobiernos del este asiático para transferencia de tecnología.</p> | <p>Identificar mercados para el uso del silicio de grado metalúrgico en países de la región, no solo para el uso en la industria fotovoltaica, sino en industrias química y metalúrgica, esto último para complementar las alternativas de demanda y no depender de una sola cadena productiva.</p> | <p>Acceso a energía: Garantizar el acceso a una fuente de energía confiable, a precios competitivos y cercana a las plantas de producción de silicio de grado metalúrgico.</p> |

| ESCENARIO | INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO | INCENTIVOS GUBERNAMENTALES | FOMENTO DE LA DEMANDA | INFRAESTRUCTURA |
|--|--|--|--|--|
| <p>3. Producción de polisilicio</p> | <p>- Nuevas tecnologías de producción: Investigar y desarrollar nuevas tecnologías de producción de polisilicio que sean más eficientes y menos intensivas en energía.</p> <p>- Reciclaje de silicio: Investigar y desarrollar tecnologías para el reciclaje de silicio a partir de residuos electrónicos y otros materiales, contribuyendo a una economía circular.</p> | <p>- Fondos de innovación: Crear fondos de innovación para apoyar proyectos de investigación y desarrollo en el área de producción de polisilicio.</p> <p>- Acuerdos de compra: Establecer acuerdos de compra con empresas estatales para garantizar un mercado local para el polisilicio producido en Colombia.</p> | <p>- Integración vertical: Promover la integración vertical de la industria fotovoltaica en Colombia, es decir, que las empresas que fabrican paneles solares también produzcan polisilicio.</p> <p>- Alianzas estratégicas: Establecer alianzas estratégicas con fabricantes internacionales de módulos fotovoltaicos para garantizar la demanda de polisilicio colombiano.</p> | <p>- Acceso a energía: Garantizar el acceso a una fuente de energía confiable y a precios competitivos para las plantas de producción de polisilicio, considerando la alta demanda energética de este proceso.</p> <p>- Gestión de residuos: Diseñar e implementar sistemas eficientes de gestión de residuos para minimizar el impacto ambiental de la producción de polisilicio.</p> |

06

RECOMENDACIONES



La nueva visión de la minería requiere de la implementación de nuevas industrias y proyectos mineros con un enfoque integral, que permitan los encadenamientos productivos que beneficien a la comunidad y el territorio. Es fundamental que estas iniciativas incluyan a las comunidades locales en su diseño y desarrollo, garantizando la protección de derechos laborales, promoviendo la diversificación productiva y fomentando la reconversión laboral para quienes actualmente dependen de actividades extractivas tradicionales. La participación ciudadana efectiva en la gobernanza del territorio debe ser central, asegurando que las decisiones reflejen las necesidades y aspiraciones de las comunidades, al tiempo que se promueve la apropiación social del territorio y los procesos de transformación. Además, la promoción de proyectos productivos sustentables y asociativos busca garantizar que los beneficios económicos y sociales derivados de estas industrias se distribuyan de manera equitativa, creando bienes y servicios que impulsen el bienestar de las comunidades y apoyen una transición energética justa.

El desarrollo de estas industrias debe también enfocarse en la sustentabilidad ambiental y la restauración socio ecológica del territorio. Esto implica la recuperación de fuentes hídricas, la disponibilidad de agua apta para el

consumo humano y actividades productivas, y la atención a los pasivos ambientales generados por la minería tradicional. Es esencial que los nuevos proyectos incluyan el mejoramiento de la infraestructura y bienes públicos, promoviendo una descentralización fiscal territorial que potencie las capacidades locales. Asimismo, el fomento de la industrialización local con tecnologías sustentables contribuirá a una democratización energética mediante el impulso asociativo comunitario en el desarrollo de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER).

Para lograr esto, se requiere un robustecimiento normativo y regulatorio, que garantice que las nuevas iniciativas mineras cumplan con altos estándares ambientales y sociales, así como también promuevan la cultura y apropiación social, cimentando una visión de la minería alineada con el bienestar humano, la equidad y la sostenibilidad a largo plazo. También se requiere el fortalecimiento de procesos educativos y formativos orientados hacia la transición energética, así como financiamiento y apoyo en procesos de relacionamiento y creación de figuras de cooperación. Algunas de las falencias identificadas y las sugerencias o recomendaciones que podrían aportar a dar solución, se encuentran en la Tabla 30.

Tabla 30. Recomendaciones para los diferentes eslabones de la cadena productiva

| ETAPA | FALENCIAS IDENTIFICADAS | RECOMENDACIÓN |
|---|--|---|
| <p>Exploración y explotación</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Bajo conocimiento de las características químicas, físicas y morfológicas de las arenas silíceas de los títulos mineros de este mineral en Colombia • Reducidos mecanismos de gestión y financiación de proyectos para la producción en industrias de transformación de minerales estratégicos en Colombia. • Insuficiencia de iniciativas por parte de entidades públicas descentralizadas en Colombia que faciliten la creación de figuras jurídicas empresariales público-privadas-populares en el orden territorial. | <ul style="list-style-type: none"> • Promover la actualización de las caracterizaciones químicas y físicas de las arenas silíceas para títulos nuevos y antiguos, así como el reporte de recursos y reservas siguiendo la ECRR. • Se recomienda realizar actividades de prospección para incrementar el conocimiento geocientífico del país en minerales estratégicos, específicamente para Arenas silíceas, Silicio (Si) y sus minerales asociados, derivados o concentrados. • Se recomienda aunar esfuerzos para la revisión y toma de decisiones sobre las solicitudes de licencias ambientales y permisos requeridos para la exploración y explotación de minerales estratégicos. • Crear un marco regulatorio para la transformación de minerales estratégicos. • Fomentar programas públicos de investigación aplicada, enfocados en desarrollar nuevas metodologías y aplicaciones industriales para minerales estratégicos. • Implementar programas para promover certificaciones ambientales necesarias para incrementar la competitividad de los minerales estratégicos en mercados emergentes (e.g. sellos ambientales). • Fomentar la colaboración entre el sector privado y universidades para desarrollar metodologías de vanguardia en la exploración, explotación, beneficio y transformación de minerales. • Se recomienda desarrollar proyectos de primera producción en territorios mineros. Los proyectos pueden ser financiados por organismos internacionales, que sirvan como modelo de buenas prácticas para la exploración, explotación, beneficio y transformación de minerales. • Se recomienda el diseño e implementación de una empresa pública que opere la cadena de valor de minerales estratégicos en el país – ECOMINERALES. • Diseñar e implementar una figura jurídica competente para la generación de asociaciones público - privadas - populares en el orden territorial como ancla para la reindustrialización a través de la transformación de minerales. • Diseñar, articular y vincular los planes estratégicos asociados a las nuevas figuras jurídicas de participación público-privada (PPP) y los planes estratégicos del distrito minero especial para la diversificación productiva (DMEDP). |

| ETAPA | FALENCIAS IDENTIFICADAS | RECOMENDACIÓN |
|------------------------------|--|---|
| <p>Transformación</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Reducidos mecanismos de gestión y financiación de proyectos de primera producción en industrias de transformación de minerales estratégicos en Colombia. • Insuficiencia de iniciativas por parte de entidades públicas descentralizadas en Colombia que faciliten la creación de figuras jurídicas empresariales público-privadas-populares en el orden territorial. • Restricciones crediticias y condiciones financieras poco favorables para pequeñas empresas y cooperativas locales. • Escasez de programas de financiamiento específicos para la economía popular y proyectos mineros. • Deficiente articulación entre los grandes proyectos mineros y las pequeñas empresas locales, que no son consideradas dentro de los planes de desarrollo industrial. • Escasa infraestructura para el procesamiento de arenas silíceas. • Bajos incentivos fiscales y políticas que favorezcan el desarrollo de la industria fotovoltaica colombiana. | <ul style="list-style-type: none"> • Se recomienda implementar un marco regulatorio que permita la creación de fondos de inversión regionales, destinados a financiar proyectos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) en la transformación de minerales estratégicos. • Desarrollar un programa que ofrezca garantías estatales y seguros para proyectos industriales emergentes, reduciendo la aversión al riesgo de los inversionistas privados. • Incentivar a la banca privada para que desarrolle productos financieros adaptados a las necesidades de los proyectos de beneficio y transformación de minerales estratégicos. • Se sugiere invertir en la creación de centros regionales de investigación, agregación de valor e investigación en territorios mineros, para impulsar la innovación en la transformación de minerales. • Implementar plataformas para facilitar la innovación y adopción tecnológica por parte de empresas mineras e industriales en territorios mineros. • Crear un fondo de inversión público-privado que financie la fase de escalamiento de proyectos industriales en territorios mineros. • Se recomienda implementar convenios con organismos internacionales (BID, Banco Mundial) para financiar proyectos de beneficio y transformación de minerales estratégicos en Colombia. • Desarrollar estrategias para la promoción y fomento de minerales estratégicos y sus cadenas de valor, en eventos de carácter internacional para su divulgación y posibles sinergias. • A partir de Ecominerales, impulsar las asociaciones PPP, los incentivos necesarios para establecer clusters y aglomeraciones para la transformación de minerales a nivel territorial en Colombia. • Se recomienda crear líneas de crédito para emprendimientos locales alrededor de la explotación de minerales estratégicos. • Diseñar e implementar programas de financiamiento específicos para la economía popular y proyectos mineros, alrededor de la explotación de minerales estratégicos. • Se recomienda crear instrumentos de política pública que promuevan la articulación entre los grandes proyectos mineros y las pequeñas empresas locales, que no son consideradas dentro de los planes de desarrollo industrial. • Analizar la posibilidad de desarrollar planta (s) de procesamiento y fabricación de silicio grado metalúrgico. |

| ETAPA | FALENCIAS IDENTIFICADAS | RECOMENDACIÓN |
|---|--|--|
| <p>Capacidades territoriales</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Reducidos mecanismos de gestión y financiación de proyectos de primera producción en industrias de transformación de minerales estratégicos en Colombia. • Deficiencia de infraestructura en los territorios para estimular y optimizar costos logísticos para la transformación de arenas silíceas. • Insuficiente conectividad vial y portuaria para el transporte eficiente de minerales. • Falta de incentivos para la capacitación continua y especialización técnica de los trabajadores locales en las zonas mineras. • Desconocimiento de las oportunidades de negocio relacionadas con la cadena de valor minera. • Reducidos mecanismos de atracción de industrias electro-intensivas | <ul style="list-style-type: none"> • Establecer centros locales de soporte técnico y logístico que ayuden a las pymes a escalar sus operaciones industriales. • Establecer centros regionales para la transferencia de conocimiento y tecnologías avanzadas en la transformación de minerales estratégicos. • Se recomienda diagnosticar la infraestructura social de servicios básicos, salud y educación de los departamentos donde se proyecte la ubicación de las plantas para la implementación de industrias de transformación de minerales, así como los requerimientos de la matriz energética. • Diagnosticar la infraestructura de transporte local e interconexiones con rutas nacionales de valor del corredor industrial del silicio para la implementación de industrias de transformación de minerales. • Diseñar e implementar un programa de intervención en materia de infraestructura energética, social, de saneamiento básico, conectividad y transporte en el departamento de la zona de influencia de la planta para la implementación de industrias de transformación de minerales, en pro del desarrollo de sus territorios. • Diseñar e implementar proyectos de inversión que mejoren la infraestructura de transporte para el soporte la demanda establecida por la empresa ANCLA. • Se recomienda incentivar sistemas de generación y distribución de energía eléctrica a partir de FNCER, dimensionados para la demanda proyectada de la empresa ANCLA. • Incentivar la capacitación continua y especialización técnica por medio de becas y sostenimiento para programas de Formación para Trabajo y Desarrollo del talento humano en trabajadores locales en las zonas mineras. • Crear programas de educación gratuitos que abarquen las oportunidades de negocio relacionadas con las cadenas de valor mineras. • Se recomienda la implementación de estrategias de generación de energía abundante y a precios competitivos para la atracción de industrias electro intensivas (nearshoring y powershoring). • Se sugiere realizar un estudio de mercado para la comercialización de los productos asociados a la transformación de arenas silíceas iniciando por los países fronterizos, extendiendo a Latinoamérica, EE. UU. y UE. • Realizar un análisis de la fabricación, usos y mercado de los vidrios fotovoltaicos de uso arquitectónico. |

| ETAPA | FALENCIAS IDENTIFICADAS | RECOMENDACIÓN |
|-------------------------|---|---|
| Comercialización | <ul style="list-style-type: none"> Reducida información sobre comercialización de productos finales asociados al silicio y sus materias primas | <ul style="list-style-type: none"> Se recomienda realizar un estudio de mercado para la comercialización de los productos asociados a la transformación de arenas silíceas iniciando por los países fronterizos, extendiendo a Latinoamérica, EEUU y UE. |

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo de los habilitantes necesarios para una nueva visión de la minería requiere un enfoque colaborativo que articule a sectores productivos, entidades públicas y privadas, y diferentes ministerios en un esfuerzo conjunto y coordinado. Esta articulación es esencial para garantizar que las políticas, recursos y capacidades se alineen hacia objetivos comunes como la transición energética, la sostenibilidad ambiental, y la promoción de una vida digna en las comunidades. Los ministerios de Educación, Trabajo, Ambiente, Minas y Energía, entre otros, deben trabajar de manera integrada para diseñar programas educativos y de reconversión laboral, impulsar normativas que prioricen tecnologías sustentables, y garantizar la protección de los derechos laborales. Asimismo, la cooperación con sectores productivos y organizaciones comunitarias permitirá fomentar proyectos asociativos que generen bienes y servicios locales, mientras que la participación de entidades territoriales garantizará la descentralización fiscal y el fortalecimiento de las capacidades locales. Esta red de colaboración multisectorial y multinivel es fundamental para avanzar de manera efectiva hacia una minería transformadora y sostenible, alineada con los principios de justicia social y restauración ambiental.

07 CONCLUSIONES



- El análisis geológico realizado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) identificó varias áreas con alta favorabilidad para la presencia de arenas silíceas, particularmente en formaciones sedimentarias con alto contenido de cuarzo. Departamentos como La Guajira, Sucre, Córdoba, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Tolima y Huila destacan por sus condiciones geológicas favorables para el desarrollo de yacimientos de arenas silíceas.
- Se identificaron recursos y reservas distribuidos en siete títulos mineros, con una estimación de vida útil de 60 años, basada en las reservas probadas y el volumen actual de explotación. Estas reservas se concentran principalmente en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca, lo que representa una oportunidad estratégica para impulsar el desarrollo industrial en estas regiones.

No obstante, es importante señalar que estas cifras no son plenamente representativas, ya que una parte considerable de los títulos mineros todavía no ha presentado la documentación técnica de recursos y reservas conforme al estándar ECRR. Este hecho subraya la necesidad

de continuar analizando las cifras reportadas para obtener una visión más completa y precisa del potencial nacional.

Sin embargo, estas reservas reportadas bajo el estándar ECRR, son suficientes para suplir la demanda interna de este mineral en la elaboración de paneles solares, marcando un punto de partida clave para el desarrollo de la cadena productiva.

- Se evidenció un crecimiento significativo en la explotación de arenas silíceas entre 2020 y 2023, alcanzando 705,673 m³ en 2023. Cundinamarca representa más del 50% de la explotación nacional, siendo Zipaquirá el principal municipio productor, abasteciendo industrias de vidrio con aplicaciones en envases, cristalería y vidrio plano.
- Se han identificado yacimientos con un contenido de SiO₂ superior al 95%, lo que destaca su potencial para diversas industrias, como la fabricación de vidrio y paneles solares. Estos datos de alta calidad abren la posibilidad de realizar análisis detallados para determinar su viabilidad en la cadena productiva, especialmente en actividades como la producción de silicio de grado metalúrgico, la fabricación de polisilicio y, de forma complementaria, su uso en la producción de vidrio templado para la protección de paneles solares.

Sin embargo, es necesario profundizar en el conocimiento de los recursos y reservas de los títulos mineros para arenas silíceas, así como en la calidad del material extraído. Esto permitirá definir no solo el potencial para la elaboración de paneles solares, sino también para las demás actividades productivas que requieren este material como materia prima, tales como la industria de semiconductores, fibra óptica y aplicaciones biotecnológicas.

- Puesto que la literatura identifica al cuarzo de alta pureza como la principal fuente para la producción de silicio de grado metalúrgico, se requiere llevar a cabo análisis que permitan establecer si las litologías de las unidades geológicas sedimentarias, como las cuarzoarenitas, cumplen con los estándares de calidad requeridos para este fin.

Asimismo, se deben llevar a cabo estudios que permitan identificar si el cuarzo presente en depósitos vetiformes podría ser empleado como materia prima para la obtención de silicio de grado metalúrgico a nivel industrial.

- Dado que la cadena productiva para la fabricación de paneles solares en Colombia aún se encuentra en una etapa incipiente, y que las arenas silíceas explotadas actualmente se destinan a otras industrias, se hace necesario establecer mesas de trabajo que integren la visión de diversos actores del gobierno, la industria y la academia.

La participación de empresas extranjeras con experiencia en tecnología fotovoltaica será clave para capacitar a los actores nacionales, definir los requerimientos tecnológicos, seleccionar los equipos necesarios y abordar posibles patentes asociadas al proceso productivo. Estas mesas de trabajo no solo permitirán analizar nuevos riesgos y vulnerabilidades en la cadena, sino también explorar escenarios estratégicos para el desarrollo de la industria fotovoltaica en el país.

Adicionalmente, facilitarán la identificación de fuentes de financiamiento, incluyendo capital público, privado y cooperación internacional, para materializar los proyectos necesarios para consolidar esta cadena productiva en Colombia.

- Los panoramas, tanto a nivel nacional como internacional, reflejan que los procesos de descarbonización y diversificación energética, que han venido experimentando un crecimiento significativo en los últimos años, continuarán impulsando la necesidad y demanda de paneles solares para la generación de energía solar fotovoltaica. Este contexto permite afirmar que se trata de un mercado en expansión constante con un alto potencial de crecimiento a futuro.
- Aunque en este documento se realizó una identificación inicial, es necesario avanzar en el análisis detallado de las barreras de la oferta, incluyendo aspectos clave como la disponibilidad de recursos, los procesos de producción, la logística, la tecnología y los requerimientos de energía. Además, se debe profundizar en el estudio del mercado regional, considerando la demanda de insumos, materias primas y componentes, así como determinar con mayor precisión que porción de dicho mercado podría ser atendida por la industria nacional.
- Actualmente, Colombia no cuenta con producción de silicio metalúrgico ni de polisilicio; sin embargo, el país es ensamblador y consumidor de células y paneles fotovoltaicos. Por ello, resulta fundamental realizar estudios de prefactibilidad para la construcción de una planta de procesamiento de sílice, en los que se analicen aspectos clave como la localización, la disponibilidad energética, los requerimientos tecnológicos para la producción, el mercado de los productos y otros factores relevantes. Estos estudios deben considerar, entre otros elementos, la información recopilada en este documento, con el objetivo de garantizar la viabilidad técnica y económica del proyecto, y ser competitivos en el mercado. Ya que, contar con una planta de este tipo, le permitiría al país comercializar productos de mayor valor agregado, abarcar parte del mercado regional, crear empleos y aportaría a las políticas de gobierno de transición energética y reindustrialización del gobierno nacional.

Uno de los aspectos más relevantes de los estudios de factibilidad, será la definición de la ubicación de la planta, para la cual es necesario tener en cuenta la infraestructura logística con las alternativas de transporte disponibles, en aras de minimizar costos y facilitar el acceso a los mercados nacionales y regionales, y la infraestructura energética dado a que es una industria intensiva en consumo de energía.

- Es importante destacar las ventajas ambientales que tiene la matriz energética colombiana, ya que su fuente principal de energía son las hidroeléctricas, esto permite que en el proceso de fabricación de silicio de grado metalúrgico y polisilicio la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero sea del 96,2% en comparación con las fuentes energéticas que aún dependen de los combustibles fósiles, como por ejemplo China, lo que posicionaría a Colombia como un actor sostenible en esta industria.
- El encadenamiento productivo para la fabricación de paneles solares, particularmente a través de la elaboración de vidrio solar y los procesos de ensamblaje, debe tener en cuenta las potencialidades del mercado en América Latina y el Caribe. Entre 2022 y 2023, la región incrementó sus importaciones de paneles ensamblados en un 12,4% lo que refleja un crecimiento sostenido en la demanda. Adicionalmente, las proyecciones indican que la demanda de energía eléctrica en la región crecerá un 2,3% anual hasta 2050 (BID, 2024), consolidándola, en un mercado con alto potencial en el contexto de la transición energética mundial.

Este potencial no solo se relaciona con una ventaja comparativa frente Asia debido a la proximidad geográfica, sino también con la posibilidad de aprovechar la capacidad productiva ya existente en Colombia en cuanto a la fabricación de vidrio y el ensamblaje de paneles. Estas condiciones

refuerzan la oportunidad de posicionar al país como un actor relevante en este mercado en expansión.

- De la mano de lo anterior, es importante destacar que en América Latina y el Caribe se encuentra el segundo mayor importador mundial de paneles ensamblados, Brasil, que representa el 6,1% del total global, siendo su principal proveedor China, seguido de otros países asiáticos. Aunque las capacidades productivas de Colombia y la región son significativamente menores en comparación con Asia, Brasil se destaca como un mercado potencial debido a su alta demanda de energía fotovoltaica.

Además, es importante resaltar que países como Panamá o República Dominicana han comenzado a realizar exportaciones de paneles ensamblados hacia otros mercados de la región, como Nicaragua, Honduras, Chile, Guatemala, entre otros. Este dinamismo comercial refleja el creciente interés en la demanda de energía limpia, que se ha consolidado como una tendencia clave en los últimos años y representa una oportunidad estratégica para la región.

- Al igual que otros procesos productivos a nivel mundial, la obtención de silicio ya sea de grado metalúrgico (Si-MG) o polisilicio (Poly-Si), junto con las etapas de refinación, purificación y formación de lingotes, genera emisiones de gases de efecto invernadero. La magnitud de la huella de carbono asociada a estas actividades puede variar significativamente dependiendo de factores como la pureza del cuarzo utilizado, las tecnologías de producción empleadas y, especialmente, la fuente de energía utilizada en estos procesos.
- Colombia posee un potencial significativo para convertirse en un actor importante a nivel nacional e internacional en la producción de

paneles solares. Su abundancia de recursos naturales, como las arenas silíceas, combinada con una matriz energética cada vez más limpia y políticas gubernamentales favorables, crean un entorno propicio para el desarrollo de esta industria.

Para aprovechar al máximo esta oportunidad, es fundamental adoptar una estrategia integral que abarque todas las etapas de la cadena productiva, desde la extracción y procesamiento de materias primas hasta la producción y comercialización de paneles solares. Además, la inversión en investigación y desarrollo (I+D), la formación de capital humano especializado y la colaboración con actores internacionales son factores claves para impulsar la innovación y fortalecer la competitividad de este sector.

- Los escenarios analizados para el desarrollo de la industria de paneles solares en Colombia ofrecen diversas oportunidades estratégicas. Por un lado, la producción nacional de vidrio solar podría disminuir la dependencia de importaciones, generar empleo y fomentar el desarrollo tecnológico en el sector del vidrio. Por otro lado, el avance en la producción de silicio de grado metalúrgico no solo impulsaría la industria fotovoltaica, sino también mercados relacionados, como los de aleaciones y siliconas. Por último, un enfoque hacia la producción de polisilicio, materia prima base para la fabricación de paneles solares, permitiría reducir la dependencia de importaciones, fortalecer la cadena de valor y posicionar a Colombia como un actor relevante en la región.

En cada uno de los escenarios, la adopción de tecnologías eficientes y el uso de energías renovables serán factores fundamentales para garantizar la sostenibilidad de los procesos productivos y aumentar la competitividad de la industria.

- La promoción y el fomento del eslabón de ensamblaje de paneles solares es crucial para impulsar los procesos previos en la cadena de producción en Colombia, como la producción de silicio de grado metalúrgico, polisilicio, lingotes, obleas y celdas solares. Este enfoque, complementado con la identificación estratégica de mercados para los componentes de paneles solares en América Latina, podría abrir escenarios de demanda atractivos no solo para las celdas fotovoltaicas y vidrio solar, sino también para otros componentes clave que forman parte de los paneles solares.

8. REFERENCIAS

(s.f.).

AGC Inc. (2024). *Blog: Flat Glass Manufacturing Process*. Obtenido de AGC Electronic Solutions: <https://agc-electronics.com/en/specialty-glass/blog/detail/how-is-glass-made>

Alaa M.Kh. Mustafa, I. K. (2013). *Iraqi Bulletin Of Geology and Mining*.

Arjan Ciftja, T. A. (2008). Refining and Recycling of Silicon: A Review . *NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND* , 9-21.

Autosolar. (s.f.). Obtenido de <https://autosolar.pe/aspectos-tecnicos/silicio-policristalino-caracteristicas-y-aplicaciones>

BID. (2023). *La transición energética como oportunidad para el desarrollo industrial verde en América Latina y el Caribe: Recomendaciones políticas y hoja de ruta* .

BID. (2024). *Cadenas de valor de energías renovables y almacenamiento de energía en América Latina y el Caribe*.

Bogner, S. (2023). *THE ENERGY TRANSITION IS RUNNING LOW THE ENERGY TRANSITION IS RUNNING LOW ON HIGH-PURITY SILICA SAND*. Vancouver: Rockstone Research.

Bullon, J. (2022). New metallurgical way for the solar silicon production-the sisal project. *Proceedings of the Silicon for the Chemical & Solar Industry XVI*.

Cambio Energético. (s.f.). Obtenido de <https://www.cambioenergetico.com/blog/celulas-solares-tipo-n/>

Cambio Energético. (s.f.). Obtenido de <https://www.cambioenergetico.com/blog/celulas-solares-perc/>

Ceccaroli, B., Øvrelid, E., & Pizzini, S. (2017). *Solar Silicon Processes: Technologies, Challenges, and Opportunities*. CRC Press.

Chen, Y., Wang, Z., & Liu, H. (2018). Reverse logistics of solar panels: A review. . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 389-400.

- Cook, N. (2000). Mineral characterisation of industrial minerals deposits at the Geological Survey of Norway: a short. *Norges geologiske undersøkelse Bulletin*, 189-192.
- CSIRO. (2022). Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.csiro.au/-/media/MRF/Files/Australian-Silicon-Action-Plan/Australian-Silicon-Action-Plan-2.pdf&ved=2ahUKEwjOlZfpxvmHAxW4S-jABHZSBCiwQFnoECCEQAQ&usg=AOvVaw2VBtF4cXpcPFK04rvqm3sU>
- CSIRO. (2022). Obtenido de <https://www.csiro.au/-/media/MRF/Files/Australian-Silicon-Action-Plan/Australian-Silicon-Action-Plan-2.pdf>
- DNP. (2022). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 : Colombia, Potencia Mundial de la Vida*.
- DNP. (2022). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 : Colombia, Potencia Mundial de la Vida*.
- DS New Energy. (s.f.). Obtenido de <https://www.dsisolar.com/info/silicon-wafer-production-49738087.html>
- EE Power. (2021). Obtenido de <https://eepower.com/technical-articles/photovoltaic-cell-fabrication-and-types/#>
- Engineering ToolBox. (2024). *Density of materials - Silica Sand*. Obtenido de <https://www.engineeringtoolbox.com>
- Escuela de negocios. (2008). Obtenido de <https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/componente45343.pdf>.
- European Commission. (2019). *Masterplan for a competitive transformation of EU energy-intensive industries enabling a climate-neutral, circular economy by 2050*. Obtenido de <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/be308ba7-14da-11ea-8c1f-01aa75ed71a1/language-en>
- Febriana, E., Mayangsari, W., Budi Prasetyo, A., Irawan, J., Sulistiyono, E., Handayani, M., . . . Wahyuadi, J. (2024). *Reducing Impurities of Silica Sand by One Step and Two Step Leaching*. Depok: Published by AIP Publishing. .
- Ferroglobe. (06 de 11 de 2024). Obtenido de Ferroglobe: <https://www.ferroglobe.com/solutions/silicon-metal>

- First Green*. (2023). Obtenido de <https://firstgreen.co/how-much-does-it-cost-to-set-up-a-1-gw-integrated-solar-module-manufacturing-plant/>
- GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit). (2016). *Linkages to the Resource Sector, The Role of Companies, Government and International Development Cooperation*.
- Glass for Europe. (2020). *From sand to flat glass: Glass for Europe*. Obtenido de <https://glassforeurope.com/from-sand-to-flat-glass/>
- H, A., B, M., A, B., & M, A. S. (2018). Production of metallurgical-grade silicon from Egyptian quartz. *Scielo*, 143-148.
- Hallam, B., Kim, M., Underwood, R., Drury, S., Wang, L., & Dias, P. (2022). *A Polysilicon Learning Curve and the Material Requirements for Broad Electrification with Photovoltaics*. Solar RRL.
- HPQ Silicon*. (2019). Obtenido de https://hpqsilicon.com/wp-content/uploads/2019/06/HPQ_NEW_DECK_JUNE_2019_AGM_V2.pdf
- IEA. (2022). Obtenido de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2ee601d-6b1a-4cd2-a0e8-db02dc64332c/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf>
- IEA. (2022). Obtenido de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2ee601d-6b1a-4cd2-a0e8-db02dc64332c/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf>
- IEA. (2022). *Special report on solar PV global supply chains*.
- IEA. (2022). *Tracking Clean Energy Progress: Solar Photovoltaic*.
- IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. Paris. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- IEA. (2024). *Energy Technology Perspectives*.
- IEA. (2024). *Renewables 2023. Analysis and forecast to 2028*. Obtenido de https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf

IGF. (2022). *Minerales Críticos: Datos Básicos*. Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development. Obtenido de <https://www.igfmining.org/wp-content/uploads/2022/11/critical-minerals-primer-es-WEB.pdf>

Intechopen. (2015). Obtenido de <https://www.intechopen.com/chapters/47647>

International Trade Centre . (Noviembre de 2024). *Title - Trade Map*. Obtenido de <https://www.trademap.org/>

IOPscience. (2022). Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/983/1/012111>

IRENA. (27 de Marzo de 2024). *Crecimiento récord en energías renovables, pero el progreso debe ser equitativo*. Obtenido de Newsletter IRENA: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Mar/Record-Growth-in-Renewables-but-Progress-Needs-to-be-Equitable-ES>

IRENA. (11 de Julio de 2024). *Renewable energy highlights*. Obtenido de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/Renewable_energy_highlights_FINAL_July_2024.pdf

IRENA; USAID. (2021). *“Renewable energy auctions in Colombia”*.

JA Solar. . ((s.f.)). *JA Solar 500W Deep Blue 3.0 Specifications*. . Obtenido de Recuperado de [sitio web oficial del fabricante o distribuidor].

Jaramillo, S., & Ecoingeniería, E. d. (2012). *Determinación de propiedades físicas y estimación del consumo energético en la producción de acero, vidrio, concreto, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones*.

Juárez, C. (07 de Noviembre de 2022). *Colombia: Estos son sus principales Puertos Marítimos*. Available at: <https://thelogisticsworld.com/comercio-internacional/principales-puertos-maritimos-de-colombia>.

Lee, H. L., & Kim, S. W. (2021). Supply chain management for sustainable operations. . *International Journal of Production Economics*, 232., 118975.

- LinkedIn*. (2021). Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/manufacturing-process-silicon-solar-cell-solar-panel-products>
- Ltd, Q. S. (2013). *China Patente n° CN104513008A*.
- Martínez, J., & Pérez, A. (2022). *Análisis de la logística en la extracción de arena silíceas en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Mesurex. (2024). Obtenido de <https://mesurex.com/control-de-temperatura-en-la-fabricacion-de-vidrio-flotado/#:~:text=La%20materia%20prima%20se%20introduce,donde%20fluye%20como%20vidrio%20fundido.&text=En%20el%20horno%20de%20preparaci%C3%B3n,eliminan%20las%20burbujas%20de%20aire.>)
- MME. (2024). *Potenciales TEJ - 2024*. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/documents/12382/Potenciales-TEJ-2024.pdf><https://transferport.co/services/est-dorada/>
- Porter, M. (1990). *The competitive advantage of Nations*. Harvard Business Review.
- PWC. (2022). *Australian Silicon Action Plan*.
- REVE. (Septiembre de 2024). *Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico*. Obtenido de <https://www.evwind.com/2024/09/30/como-estados-unidos-perdio-la-carrera-de-la-energia-solar-fotovoltaica-ante-china/>
- Rima*. (06 de 11 de 2024). Obtenido de RIMA: <https://www.rima.com.br/en/silicon-metallic/>
- Sierterm*. (s.f.). Obtenido de <https://sierterm.es/content/silicio-policristalino/>
- SME. (2009). *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses (7th ed.)*. Obtenido de https://nasiri.iut.ac.ir/sites/nasiri.iut.ac.ir/files//files_course/industrial_minerals_rocks_commodities_markets_and_uses.pdf
- Solar Electric*. (s.f.). Obtenido de <https://www.solar-electric.com/lib/wind-sun/solar-energy-for-you-and-me.pdf>
- Summer Xia*. (2021). Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/manufacturing-process-silicon-solar-cell-solar-panel-products>
- T, F. (Agosto de 1970). *Electric Furnace Manufacture of Silicon Metal*. (J. o. Metals, Ed.) Obteni-

do de <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03355657>

Technology Cluster Manager; Technology Center System Program. (2019). *White Paper: Glass Industry*.

U.S. Geological Survey. (s.f.). *Silica Statistics and Information*. National Minerals Information Center. Obtenido de <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/silica-statistics-and-information>

UPME. (2022). *Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052*.

UPME. (2022.). *Plan de Acción Indicativo – Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (PAI-PROURE)*. .

UPME. (2024). *Geovisores*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Geovisores.aspx>

UPME. (2024). *Geovisores*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Geovisores.aspx>

UPME. (2024). *Geovisores*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Geovisores.aspx>

Vatalis, K., Charalambides, G., & Ploutarch Benetis, N. (2015). *Market of high purity quartz innovative applications*. Koila-Kozani: Elsevier.

Viridian Solar. (s.f.). Obtenido de <https://www.viridiansolar.co.uk/resources-4-2-photovoltaic-solar-cells.html>

Vishakha renewables. (2024). *Blog: Vishakha renewables*. Obtenido de Vishakha renewables web site: <https://vishakharenewables.com/blog/solar-glass-in-solar-panels/>

WAAREE. (2024). Obtenido de <https://waaree.com/blog/how-does-a-solar-panel-gets-manufactured/>

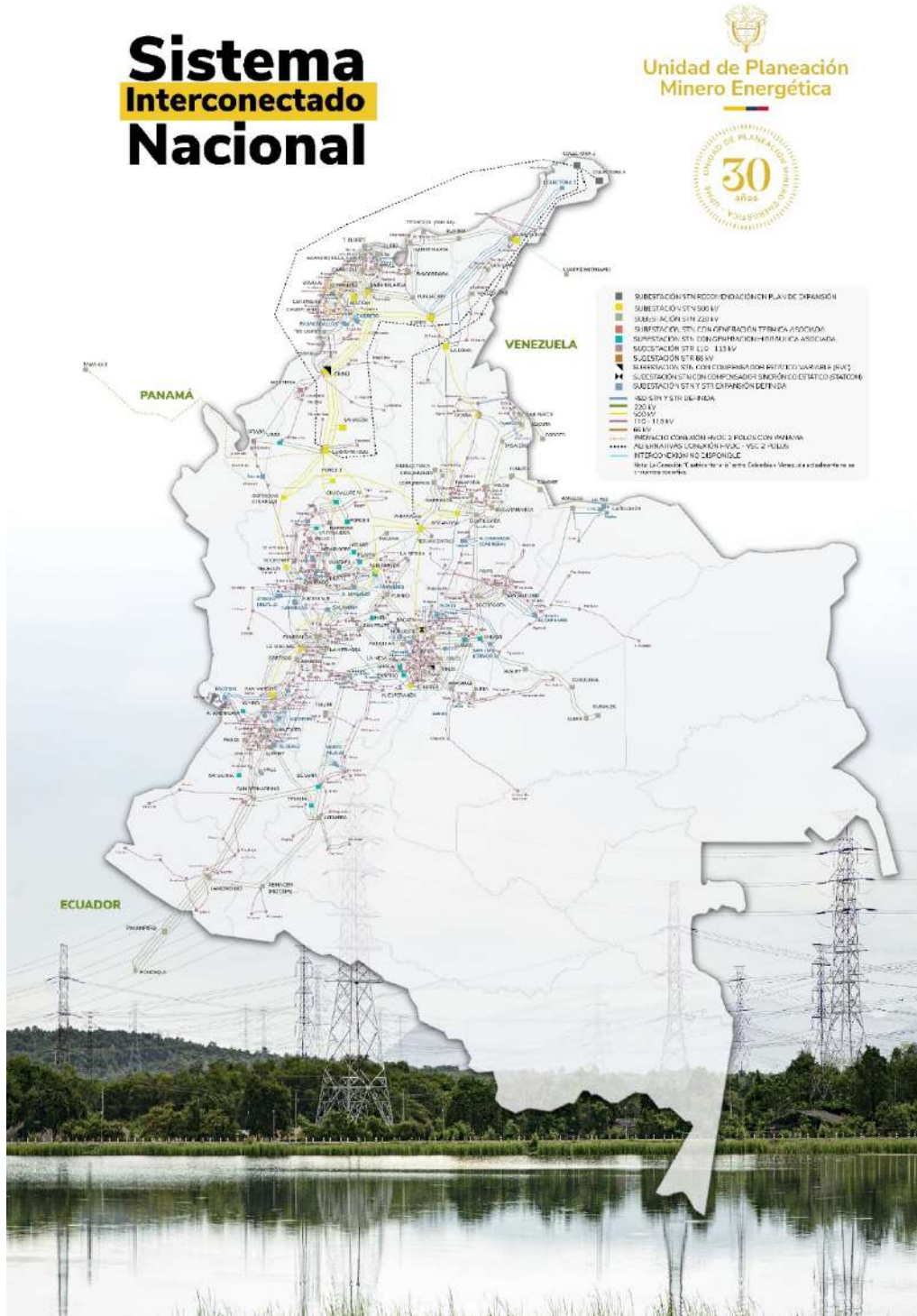
Xiaopu, W., Xinyi, T., Xiaodong, C., Lingling, R., & Chunxiang, G. (2022). *A review on end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology*. *Solar Energy, Materials and Solar Cells* 248.

Yang, S., Yu, Z., Ma, W., Ma, L., Li, C., Fu, L., . . . Yang, Y. (2023). *Research on Carbon Emission of Solar Grade Polysilicon Produced by Metallurgical Route Using Digital Simulation Technology*.

Zhang, W., & al., e. (2018). Logistics and transportation issues in the photovoltaic industry: A comprehensive review. . *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(2), 021304.

Zhengjie Chen, W. M. (07 de Mayo de 2017). *Journal of Cleaner Production*. Obtenido de <https://sci-hub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617309629>

ANEXO 1: Sistema Interconectado Nacional



Fuente: UPME, 2024

ANEXO 2: Detalle de los corredores logísticos de Colombia

A. BOGOTÁ - BUENAVENTURA – IPIALES

Este corredor tiene una gran importancia estratégica en el marco del intercambio y el desarrollo comercial, al enlazar entre sí importantes ciudades del país (Bogotá, Cali, Popayán, Pasto e Ipiales), como con las zonas portuarias del Pacífico (Buenaventura y Tumaco) y la conexión con el Ecuador

| | |
|----------------------------|--|
| Recorrido terrestre | Bogotá (salidas Autopista Sur y Mondoñedo) - Granada - Melgar - Girardot - Espinal (incluye variante) - Ibagué - Cajamarca - Calarcá - Armenia (incluye variantes) - Zarzal (La Paila) - Guadalajara de Buga – Yotoco - Calima - Dagua - Buenaventura. |
| Eje Fluvial | Rio Cauca |
| Red Férrea | Red férrea del pacífico (Buenaventura – Cartago) |
| Aeropuertos | Gerardo Tovar López de Buenaventura, Alfonso Bonilla Aragón de Cali, El Edén de Armenia, Perales de Ibagué, Santiago Vila de Flandes, Santa Ana de Cartago, Guillermo León Valencia de Popayán, Antonio Nariño de Pasto, San Luis de Ipiales y La Florida de Tumaco. |

Fuente: Mintransporte, 2024.

B. CORREDOR LOGÍSTICO CALI – MEDELLÍN- CARTAGENA

El corredor Cali-Medellín Cartagena es un corredor logístico de importancia estratégica, dado que se facilita el intercambio y el desarrollo del comercio en general entre dos de las principales ciudades del país (Medellín y Cali), entre las cuales se moviliza la carga tanto de comercio exterior como del comercio interno, permitiendo la vinculación entre los nodos de producción y consumo junto con sus áreas de influencia.

| | |
|----------------------------|---|
| Recorrido terrestre | Cali – Yumbo – Vijes – Guadalajara de Buga – Tuluá – Zarzal – Cartago – Santa Rosa de Cabal – La Pintada – Caldas – Medellín – Copacabana – Don Matías – Santa rosa de osos – Caucasia – Planeta Rica – Sahagún – Corozal – El Carmen de Bolívar – San Juan Nepomuceno – Arjona – Turbaco - Cartagena |
| Eje Fluvial | Rio Cauca, Rio Sinú, Rio Nechí, Rio San Jorge |
| Red Férrea | No aplica |
| Aeropuertos | Matecaña de Pereira, la nubia de Manizales, José Celestino Mutis de Mariquita, José María Cordova de Rionegro, Enrique Olaya Herrera de Medellín, Los Garzones de Montería, Las Brujas de Sincelejo, Rafael Nuñez de Cartagena. |

Fuente: Mintransporte, 2024.

C. CORREDOR LOGÍSTICO BOGOTÁ - BARRANQUILLA

El corredor Bogotá - Barranquilla es uno de los corredores logísticos de mayor importancia estratégica, dado que moviliza la carga, tanto de comercio exterior como de comercio interno, entre la capital y en general la zona centro del país con varias de las principales zonas portuarias marítima de Colombia, ubicadas en la costa del Mar Caribe.

| | |
|----------------------------|---|
| Recorrido terrestre | Bogotá (Salidas calle 80 y calle 13) – Guaduas – La Dorada – Puerto Salgar – Puerto Boyacá – Puerto Araujo – Barranca-bermeja (La Lizama) – San Alberto – Aguachica – Bosconia – Pueblo Viejo – Barranquilla – Galapa – Sabanalarga – Luruaco - Cartagena |
| Eje Fluvial | Rio Magdalena |
| Red Férrea | Bogotá – Puerto Salgar – La Dorada – Chiriguaná – Santa Marta |
| Aeropuertos | Almirante Padilla de Riohacha, Simón Bolívar de Santa Marta, Ernesto Cortissoz de Barranquilla, Gustavo Rojas Pinilla de San Andrés, Providencia de Providencia, Alfonso López Pumarejo de Valledupar. |

Fuente: Mintransporte, 2024.

D. CORREDOR LOGÍSTICO BOGOTÁ - CÚCUTA

El corredor Bogotá - Cúcuta fomenta el intercambio y el desarrollo comercial en condiciones de proximidad, en el sector central del país, mediante el enlace entre la capital con dos de las principales ciudades del país: Bucaramanga y Cúcuta, ésta última como ciudad de influencia del corredor.

| | |
|----------------------------|--|
| Recorrido terrestre | Bogotá – Chía – Tocancipá – Ventaquemada – Tunja – Arcabuco – Moniquirá – Barbosa – Oiba – Socorro – San Gil – Piedecuesta – Floridablanca – Bucaramanga – Pamplona – Los Patios – Cúcuta. |
| Eje Fluvial | No aplica |
| Red Férrea | Bogotá – La Caro – Zipaquirá – Lenguazaque - Chiquinquirá |
| Aeropuertos | El Dorado de Bogotá, Palonegro de Bucaramanga, Yariguies de Barrancabermeja, Camilo Daza de Cúcuta, Aguas Claras de Ocaña, Flaminio Suarez Camacho de Bogotá, Juan José Rondón de Paipa, General Gustavo Rojas Pinilla de Tunja. |

Fuente: Mintransporte, 2024.

E. CORREDOR LOGÍSTICO MEDELLÍN - BUCARAMANGA

El corredor Medellín - Bucaramanga fomenta el intercambio y el desarrollo comercial en condiciones de proximidad, en el sector central del país, mediante el enlace entre dos de sus principales ciudades: Medellín y Bucaramanga.

| | |
|----------------------------|--|
| Recorrido terrestre | Medellín – Bello – Cisneros – Puerto Berrio – (La Lizama) – Barrancabermeja – Lebrija – Girón – Bucaramanga (Conecta puerto Berrio con corredor Bogotá – Barranquilla) |
| Eje Fluvial | Río Magdalena |
| Red Férrea | No aplica |
| Aeropuertos | Palonegro de Bucaramanga, José María Cordova de Rionegro, Enrique Olaya Herrera de Medellín |

Fuente: Mintransporte, 2024.

F. CORREDOR LOGÍSTICO BOGOTÁ - YOPAL

El corredor tiene un marcado carácter estratégico en la medida que facilita el intercambio y el desarrollo del comercio en general entre el centro del país y las regiones comprendidas entre los departamentos del Meta y Casanare.

| | |
|----------------------------|--|
| Recorrido terrestre | Medellín – Bello – Cisneros – Puerto Berrio – (La Lizama) – Barrancabermeja – Lebrija – Girón – Bucaramanga (Conecta puerto Berrio con corredor Bogotá – Barranquilla) |
| Eje Fluvial | Río Magdalena |
| Red Férrea | No aplica |
| Aeropuertos | Palonegro de Bucaramanga, José María Cordova de Rionegro, Enrique Olaya Herrera de Medellín |

Fuente: Mintransporte, 2024.

G. CORREDOR LOGÍSTICO BOGOTÁ - PUERTO ASÍS

Este corredor es el enlace entre la región amazónica de los departamentos de Caquetá, Guainía, Guaviare, Vaupés, Putumayo y Amazonas con el centro del país. Es un corredor logístico multimodal ya que cuenta no solo con modo carretero, sino que abastece diferentes ciudades por medio del modo fluvial. Es un corredor por el cual transitan hidrocarburos, productos agropecuarios entre otros.

| | |
|----------------------------|--|
| Recorrido terrestre | Bogotá (Salidas Autopista Sur y Mondoñedo) – Granada – Melgar – Girardot – Espinal – El Guamo – Neiva – Pitalito – Mocoa – Puerto Caicedo – Puerto Asís. |
| Eje Fluvial | Río Putumayo, Río Amazonas, Río Caquetá. |
| Red Férrea | No aplica |
| Aeropuertos | Benito Salas de Neiva, 3 de mayo de Puerto Asís, Alfredo Vásquez Cobo de Leticia, Fabio Alberto León Bentley de Mitú, Gustavo Artunduaga de Florencia, |

Fuente: Mintransporte, 2024.

