Informe de revisión de políticas, iniciativas, procedimientos y experiencias relacionadas con la economía circular en el cierre de parques solares del corredor vida César-Magdalena

Convenio Interadministrativo No. CO1.PCCNTR.5495859 suscrito entre la Unidad De Planeación Minero-Energética - UPME y la Universidad del Magdalena

Aunar esfuerzos técnicos, financieros y administrativos para elaborar el Mapa de riesgos frente a las situaciones que llevaron al estado actual de los procesos de cierre de la minería de Carbón que faciliten iniciativas de Economía Circular en los cierres de los parques solares del Corredor vía del Cesar-Magdalena en términos tecnológicos, ambientales, sociales y de género.

Presentado a:
Unidad de Planeación Minero-Energética UPME

Por:
Universidad del Magdalena
Semillero de Transición Energética
Grupo de Investigación Magma Ingeniería

Santa Marta, diciembre de 2023.

CONTENIDO

LISTA DE ABREVIATURAS 5

LISTADO DE FIGURAS 6

LISTADO DE TABLAS 8

1. INTRODUCCIÓN 9

2. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE PROCESOS DE CIERRE DE PARQUES SOLARES 12

2.1. Bases de datos 13

2.1.1. Documentos por país o territorio 13

2.1.2. Documentos por año 14

2.1.3. Documentos por tipo 15

2.1.4. Documentos por editorial 16

2.1.5. Documentos por afiliaciones 16

2.1.6. Documentos por patrocinadores de financiación 17

2.1.7. Documentos por área temática 18

2.1.8. Análisis con VOSviewer 18

3. ECONOMÍA CIRCULAR EN PROCESOS DE CIERRE DE PARQUES SOLARES 21

3.1. Análisis comparativo entre la evaluación del ciclo de vida de paneles fotovoltaicos de silicio y análisis de ciclo de vida del proceso de reciclaje de módulos solares 21

3.1.1. Evaluación del ciclo de vida de paneles fotovoltaicos de silicio 23

3.1.2. Caso de estudio proceso de reciclaje de Deutsche solar AG 28

3.1.3. Impacto ambiental de modelo lineal y circular para el manejo de residuos 30

3.2. Economía circular y la participación de las comunidades en los procedimientos de cierre de parques solares 33

3.2.1. Estrategias de economía circular asociadas a residuos fotovoltaicos 33

3.2.2. Cierre de parques solares con procesos de economía circular 35

3.3. Propuesta de diagrama proceso de cierres de parques solares con enfoque de economía circular 36

4. POLÍTICAS E INICIATIVAS NACIONALES E INTERNACIONALES 37

4.1. Políticas e iniciativas nacionales 37

4.2. Políticas e iniciativas internacionales 46

4.3. Aspectos relevantes para posibles aplicaciones 56

5. PROCEDIMIENTOS Y EXPERIENCIAS EN PROCESOS DE CIERRE 57

5.1. Información primaria de las comunidades del corredor vida César-Magdalena 57

5.1.1. Oportunidades identificadas por las comunidades en La Loma (Cesar), Ciénaga y Fundación del departamento del Magdalena. 62
5.2. Prospectiva de cierre y manejo de residuos por parte de Enel Green Power Colombia S.A.S. 63
5.3. Lecciones aprendidas en procesos de cierre en proyectos de parques solares 64
5.4. Propuesta de estrategias de responsabilidad empresarial en procesos de cierres de parques solares. 67
5.4.1. Elaboración y socialización del plan de cierre y abandono 68
5.4.2. Mecanismos de recuperación ambiental de suelos 68
5.4.3. Identificación de zonas de proyectos energéticos en el POT 69
5.4.4. Socializaciones comunitarias de las medidas de manejo ambiental implementadas por la empresa 69
5.4.5. Diseñar Proyectos Ciudadanos de Educación Ambiental (PROCEDA) 70
5.4.6. Planes de sostenimiento sociocultural y diversificación económica 70
6. MEJORES PRÁCTICAS Y RECOMENDACIONES EN PROCESOS DE CIERRE 71
6.1. Antecedentes de cierre de diversas industrias 71
6.1.1. Caso de cierre de las minas de carbón en Calenturitas y La Jagua del grupo Prodeco en Colombia 71
6.1.2. Caso del cierre del parque eólico Windpeshi en la Guajira Colombia 73
6.1.3. Caso de cierre de la mina de carbón As Pontes en Coruña España 74
6.1.4. Caso del cierre de actividad ferroviaria para el lavado, cargue y transporte de carbón en Villagatón-Brañuelas, España 75
6.1.5. Caso del plan de repotenciación del parque eólico Malpica en Bergantiños, Coruña, España75
6.1.6. Caso del cierre de la mina de carbón de la ciudad de Taiyuán - China 76
6.1.7. Caso del programa de conservación de suelos en el parque solar Nueva Xcala, México 77
6.2. Patrones negativos y mejores prácticas asociadas al cierre de proyectos 77
6.3. Elaboración y socialización del plan de cierre y abandono 78
6.4. Mecanismos de recuperación ambiental de suelos 80
6.5. Mecanismos gubernamentales propuestos 85
6.5.1. Identificación de zonas de proyectos energéticos en el POT 86
6.6. Diagnóstico de planificación territorial 87
6.7. Socializaciones comunitarias de las medidas de manejo ambiental implementadas por la empresa 89

6.8. PROCEDA 90
6.9. Planes de sostenimiento sociocultural y diversificación económica 92
6.10. Transición sostenible: tecnologías emergentes para la operación y cierre de parques solares 94
BIBLIOGRAFÍA 95
ANEXOS 102
Anexo 1. Consentimiento informado 102
Anexo 2. Encuesta 103

LISTA DE ABREVIATURAS

AEE	Aparatos Eléctricos y Electrónicos
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
CAR	Corporación Autónoma Regional
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
CSV	Valores Separados por Comas
DOE	Departamento de Energía de los Estados Unidos
ENEC	Estrategia Nacional de Economía Circular
FNCER	Fuente no Convencional de Energía Renovable
FV	Fotovoltaica
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GW	Gigavatio
I+D	Investigación y Desarrollo
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables
ISO	Organización Internacional de Normalización
IIT System	Indian Institute of Technology System
LCA	Evaluación Del Ciclo De Vida
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MDPI	Multidisciplinary Digital Publishing Institute
MW	Megavatio
PAM	Pasivos Ambientales Mineros
PROCEDA	Proyectos Ciudadanos de Educación Ambiental
RAEE	Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
RCRA	Resource Conservation and Recovery Act
REP	Responsabilidad Extendida del Productor
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
RIS	Research Information Systems
RSC	Royal Society of Chemistry
SENA	Servicio Nacional de Aprendizaje
SIG	Sistemas Integrados de Gestión
UE	Unión Europea
UOR	Indicador de Índice de Ocupación en Uso
VITAL	Ventanilla Integral de Trámites Ambientales en Línea
WoS	Web of Science
ZSVR	Zentrale Stelle Verpackungsregister (Central Packaging Register)

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Número de publicaciones por países. 14
Figura 2. Número de publicaciones por años. 15
Figura 3. Número de publicaciones por tipo de documento. a) Scopus; b) WoS. 15
Figura 4. Número de publicaciones por editoriales. a) Scopus; b) WoS. 16
Figura 5. Número de publicaciones por afiliaciones. a) Scopus; b) WoS. 17
Figura 6. Número de publicaciones por patrocinadores de financiación. a) Scopus; b) WoS. 17
Figura 7. Número de publicaciones por área temática, WoS. 18
Figura 8. Redes de coocurrencia de palabras clave utilizando los datos de Scopus. 19
Figura 9. Enlaces para el clúster 1 del mapa de coocurrencias. 20
Figura 10. Residuos de módulo solar fotovoltaico [17]. 22
Figura 11. Requisitos de energía para fabricación de paneles fotovoltaicos vs porcentaje de energía bruta [20]. 24
Figura 12. Producción de un módulo de silicio [19]. 25
Figura 13. Emisiones de dióxido de carbono clasificadas según el tipo de módulo [22]. 26
Figura 14. Proceso un panel fotovoltaico de silicio [24]. 27
Figura 15. Proceso de una celda [24]. 28
Figura 16. Entradas y salidas importantes durante el proceso de reciclaje de módulos fotovoltaicos [25]. 29
Figura 17. Descarga y carga del proceso de reciclaje de Deutsche Solar AG [25]. 29
Figura 18. Emisiones derivadas de la remanufactura del panel (segunda fase de suministro) [28]. 31
Figura 19. Impacto por componente [28]. 31
Figura 20. Propuesta de diagrama proceso de cierres de parques solares con enfoque de economía circular. Elaboración propia 36
Figura 21. Fases de Políticas Públicas Ambientales [33]. 38
Figura 22. Cuadro sinóptico de recomendaciones en normativa. 46
Figura 23. Habilidades comunitarias. a) La Loma; b) Ciénaga; c) Fundación. 59
Figura 24. Economía circular. a) La Loma; b) Ciénaga; c) Fundación. 60
Figura 25. Sitios clave. a) La Loma; b) Ciénaga; c) Fundación. 61
Figura 26. Programas educativos. a) La Loma; b) Ciénaga; c) Fundación. 61
Figura 27. Reciclaje. a) La Loma; b) Ciénaga; c) Fundación. 62
Figura 28. Propuesta de estrategias de responsabilidad empresarial. Elaboración propia. 67

Figura 29. Diagrama de Ishikawa sobre problemas asociados al cierre insostenible de proyectos. Elaboración propia 78

Figura 30. Mapa de degradación de suelos en Colombia del geoportal IGAC y su caracterización en los municipios de estudio. Elaboración propia. 81

Figura 31. Infraestructuras de retención de agua (zanjas de infiltración, media lunas de retención y jagüeyes) [74]. 82

Figura 32. Caso de éxito, Parque solar Nueva Xcala – México. Programa de conservación de suelo y agua [71]. 83

Figura 33. Planta solar agro voltaica en Totana (Murcia) – España [74]. 84

Figura 34. Instalación de canaletas para la recolección de agua lluvia AQUAVOLTAICA [75]. . 84

Figura 35. Recarga y reconducción de agua lluvia a reservorios de agua AQUAVOLTAICA [75]. 85

Figura 36. Emprendimiento comunitario, Casa del Adulto Mayor, La Loma (Cesar). 91

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Enfoques para el análisis del ciclo de vida. 30
Tabla 2. LCA vs ACV. 33
Tabla 3. Componentes específicos de proyectos de parques solares. 35
Tabla 4. Normatividad nacional aplicable al proceso de cierre de parques solares. 39
Tabla 5. Marco normativo internacional. 48
Tabla 6. Experiencias en procesos de cierre de parques solares por diferentes motivos. 65
Tabla 7. Actores claves y retos asociados a la formulación de plan de cierre con enfoque comunitario. 80
Tabla 8. Cultivos bajos en las áreas de influencia de los proyectos solares. 83
Tabla 9. Actores clave, fondos de inversión e indicadores. 86
Tabla 10. Actores clave, inversión asociada y retos probables. 88
Tabla 11. Actores principales y escenarios propuestos de socialización. 89
Tabla 12. Actores clave y fuentes de inversión para programas Proceda. 90
Tabla 13. Actores clave y fuentes de inversión para apoyo cultural. 93

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar ha emergido en los últimos años como un pilar fundamental en la transición hacia un sistema energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. El rápido crecimiento de parques solares y la adopción generalizada de la energía fotovoltaica han contribuido significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y al impulso de una matriz energética más limpia y renovable. Sin embargo, con el aumento de la instalación de estas infraestructuras, se plantea un nuevo desafío: la gestión adecuada del final de su vida útil [1].

El cierre de parques solares es un aspecto crítico y complejo que requiere una correcta planificación para garantizar su desmantelamiento, manejo de residuos y recuperación de recursos de manera responsable y eficiente. Este proceso implica consideraciones técnicas, económicas, ambientales y sociales; puesto que se deben minimizar los impactos negativos en el entorno y aprovechar al máximo los materiales valiosos contenidos en los paneles solares [2].

En este contexto, la economía circular emerge como una estrategia fundamental para abordar los desafíos asociados al cierre de parques solares, puesto que se basa en la maximización del valor de los recursos mediante la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales, en contraposición al modelo lineal de producción y consumo tradicional que genera grandes cantidades de residuos [3].

La transición hacia la economía circular en el cierre de parques solares implica repensar y rediseñar los procesos para asegurar la recuperación y reintegración de los materiales y componentes valiosos en nuevos ciclos de producción y uso. Desde la etapa inicial de diseño de los paneles solares hasta su desmantelamiento al final de la vida útil, se deben considerar estrategias para prolongar la durabilidad, facilitar la reparación, el reciclaje eficiente y la gestión adecuada de los residuos [4].

Las comunidades deben jugar un papel fundamental en los procesos de cierre de parques solares, puesto que su participación y compromiso pueden tener un impacto significativo en la gestión sostenible de estos procesos [5]. En primer lugar, la educación y la sensibilización de las comunidades locales son esenciales. La difusión de información sobre los beneficios ambientales, sociales y económicos de la economía circular puede aumentar la conciencia y el apoyo de las comunidades locales hacia prácticas más sostenibles en el cierre de estos proyectos.

La colaboración entre las comunidades, las autoridades locales, el gobierno nacional, las empresas y otros actores involucrados es crucial. La creación de plataformas de diálogo y espacios de participación comunitaria permite la inclusión de perspectivas locales en la

toma de decisiones, fomentando así la co-creación de soluciones adaptadas a las necesidades y realidades específicas de cada comunidad [6].

En el ámbito práctico, las comunidades pueden desempeñar un rol activo en la gestión de residuos provenientes de los parques solares. La implementación de programas de reciclaje a nivel comunitario, la separación adecuada de residuos y la promoción de prácticas de reutilización pueden ser acciones clave para maximizar la recuperación de materiales valiosos y minimizar la cantidad de desechos destinados a vertederos.

Además, las comunidades pueden participar en proyectos de economía circular a través de la reutilización de los principales componentes de los sistemas solares fotovoltaicos. Esto puede incluir la adaptación de paneles solares para usos locales, como la generación de energía descentralizada o la implementación de sistemas de energía renovable a pequeña escala, lo que no solo promueve la sostenibilidad, sino que también puede generar oportunidades económicas locales [7].

El Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 colombiano, denominado "*Colombia, potencia mundial de la vida*", propone una estrategia de diversificación económica centrada en la reindustrialización. Este enfoque busca cerrar brechas tecnológicas, fomentar cadenas productivas para la integración a nivel regional y global, así como fortalecer las habilidades laborales y empleos de alta calidad [8]. Además, se plantea impulsar actividades económicas que fomenten el uso sostenible de la biodiversidad, mediante la incorporación de principios de economía circular y la promoción de sectores intensivos en conocimiento e innovación, como es el caso del sector energético. El objetivo es impulsar proyectos que agreguen una capacidad de 2.000 MW en generación eléctrica para operación comercial, proveniente de fuentes de energía renovable no convencionales [9].

En vista de la necesidad de expandir considerablemente la generación de energía a partir de fuentes renovables, especialmente mediante sistemas solares fotovoltaicos, el desarrollo de nuevos proyectos de parques solares a lo largo del territorio nacional, la descarbonización económica y el estímulo a la investigación e innovación, se vuelve imperativo considerar las iniciativas gubernamentales que promueven la economía circular [10]. Esta visión se encuentra plasmada en la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), la cual prioriza seis flujos de materiales de gran relevancia para el país.

Esta política debe reflejarse en los planes de manejo ambiental, así como en el cierre de los parques solares que se están implementando en el Corredor Vida Cesar-Magdalena. Se requiere proponer alternativas que trasciendan el simple desmonte y desmantelamiento de estos proyectos, explorando oportunidades que fortalezcan los aspectos comunitarios en el territorio, basados en el concepto de economía circular. En

este aspecto es relevante establecer regulaciones específicas que aborden aspectos como el desmantelamiento, reciclaje y disposición final de los componentes de los paneles solares al final de su vida útil [11]. La gestión adecuada de los residuos generados por los paneles solares al llegar al final de su vida útil es un desafío, lo que implica establecer políticas claras para el manejo, tratamiento y reciclaje de estos materiales; para lo cual será importante revisar experiencias relacionadas en otros países con mayores avances en estos procesos relacionados con la economía circular en los procesos de cierre de parques solares [12].

Considerando el panorama anterior, la Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME y la Universidad del Magdalena, suscribieron el convenio interadministrativo No. CO1.PCCNTR.5495859, con el fin de aunar esfuerzos que faciliten iniciativas de economía circular en los procesos de cierre en los parques solares del Corredor vida del Cesar-Magdalena. Por lo tanto, en este documento se presenta una revisión de políticas, iniciativas, normativa, procedimientos y experiencias relacionadas con la economía circular en el cierre de parques solares, con el fin de identificar mejores prácticas y establecer recomendaciones que servirán de soporte para los procesos futuros relacionados con los cierres de estos parques solares.

2. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE PROCESOS DE CIERRE DE PARQUES SOLARES

Los parques solares han resultado una estrategia en el aprovechamiento de la energía solar y su uso ha sido promovido a nivel internacional a través de acuerdos internacionales como el protocolo Kyoto y a nivel nacional por medio de los planes de desarrollo que establecen los gobiernos en los cuales se potencializa la construcción e implementación de estas instalaciones. Consecuentemente, la demanda mundial de energía fotovoltaica aumentó de 1 GW en 2004 a 57 GW en 2015: una tasa de crecimiento anual de más del 20%, más rápida que cualquier otra industria, incluidas otras industrias emergentes de energía renovable [13]. Se prevé que los residuos de energía solar fotovoltaica en todo el mundo alcancen entre el 4% y el 14% de capacidad total de generación para 2030 y aumentará a más del 80% (alrededor de 78 millones de toneladas) para 2050 [14]. Si bien la vida útil de los paneles es de 25 años y en Colombia los proyectos se encuentran principalmente en fase de construcción y planeación, se hace necesario revisar y analizar sistemáticamente los casos de cierre de parques solares y/o la gestión de los residuos generados en estos proyectos.

Se realizó el análisis bibliométrico como herramienta para estudiar la producción científica relacionada con temas de reciclaje, granjas solares, final del ciclo de vida de paneles solares, economía circular y desarrollo sostenible. Para realizar este análisis se establecieron tres fases:

Fase I. Definición de la ecuación de búsqueda para el análisis bibliométrico

Para optimizar la búsqueda y obtener resultados relevantes y precisos, se emplearon operadores lógicos (AND y OR) que permiten construir ecuaciones de búsqueda adaptadas a cada base de datos. De esta forma, se evita perder información relevante por el hecho de que las bases de datos no reconocen los sinónimos automáticamente. Este operador permite hacer uniones lógicas. Por lo tanto, se utilizaron las siguientes palabras clave para la búsqueda:

- ("solar farm" OR "solar panel" OR photovoltaic OR "solar power plant") AND ("end-of-life" OR "end of life") AND ("circular economy" OR "closed-loop economy" OR "sustainable development" OR "Cradle-to-Cradle" OR recycling).

Fase II. Revisión bibliométrica

Se realizó una búsqueda en las bases de datos científicas de Web of Science (WoS) y Scopus, utilizando la ecuación de búsqueda previamente definida. A continuación, se extrajeron archivos que contenían el conjunto de datos de las métricas claves como lo son documentos según: país de publicación, autores, año de divulgación, editores, tipo de

publicación, instituciones investigadoras, patrocinadores y áreas temáticas. Los archivos generados incluyen datos en formato de texto plano obtenidos de la plataforma Web of Science, así como archivos de Valores Separados por Comas (CSV) producidos en Scopus y archivos con extensión RIS (Research Information Systems) creados en ambas bases de datos, los cuales se utilizaron para el intercambio de información y metadatos entre diversas herramientas de gestión bibliométrica y de visualización.

Fase III. Análisis de resultados

Los datos obtenidos fueron posteriormente organizados y tabulados en Microsoft Excel. Seguidamente, se procedió a la generación de gráficos descriptivos utilizando Power BI. Además, se utilizó VOSviewer, una herramienta de visualización ampliamente adoptada en la comunidad académica debido a su capacidad para representar y analizar relaciones entre términos, autores, palabras clave y otras entidades que pueden visualizarse como una red. Estos gráficos fueron examinados con el fin de obtener descripciones detalladas de las métricas pertinentes.

2.1. Bases de datos

Al emplear la ecuación de búsqueda en las bases de datos utilizadas como fuente de información para este estudio, durante el periodo comprendido entre 2005 y 2023, en Scopus se obtuvieron 403 documentos y en Web Of Science 302.

2.1.1. Documentos por país o territorio

En la Figura 1, se evidencia que los documentos publicados por país o territorio alrededor de las temáticas propuestas en la ecuación de búsqueda se presentan mayoritariamente en Estados Unidos (75 en Scopus y 53 en WoS), seguidamente de China, Australia e Italia, que disponen de números de publicaciones similares, siendo de 103, 101 y 95 respectivamente. Es de anotar que este número de publicaciones reportadas en las dos bases de datos no es acumulativo, puesto que existen investigaciones que son indexadas en estos dos servicios en línea

Posterior a ello, se encuentran en la lista países predominantemente procedentes de Europa y Asia, resaltando que la mayoría de los países presentan más publicaciones en Scopus, mientras que países asiáticos como China y Japón, prefieren publicar trabajos en revistas indexadas en WoS. En la región latinoamericana, dentro del top 15 de los países que más publicaciones realizan únicamente se encuentra Brasil. Por su parte, Colombia no presenta hasta el momento ningún estudio relacionado con estas áreas de interés.

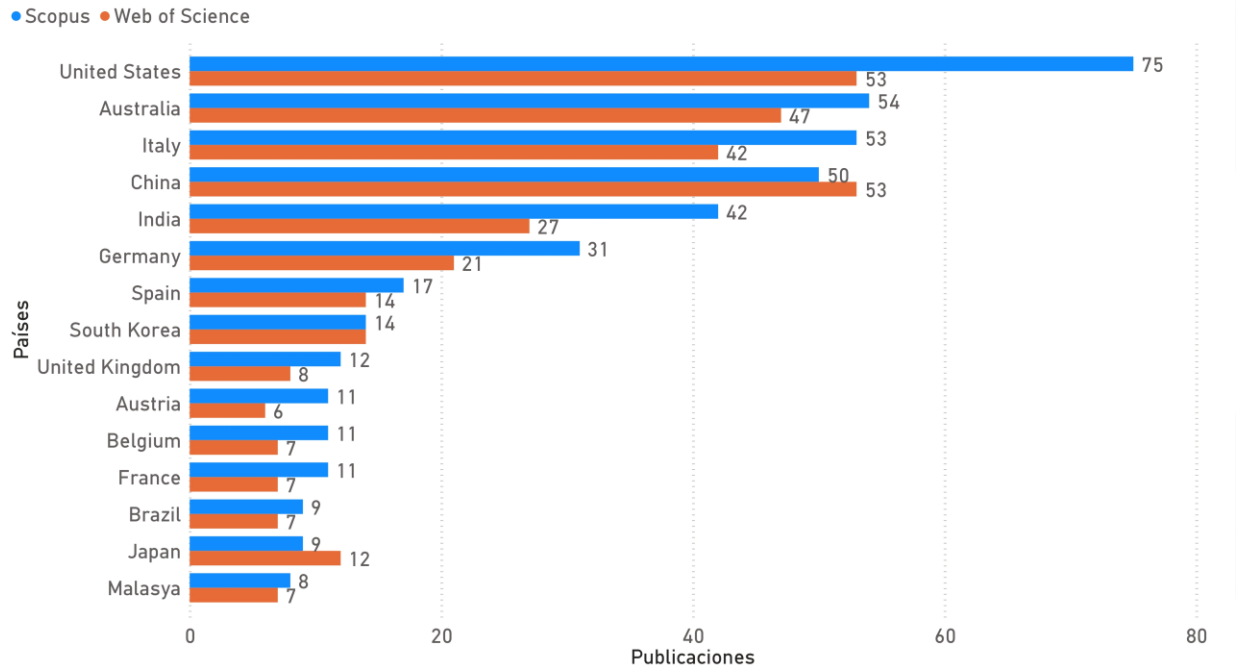


Figura 1. Número de publicaciones por países.

2.1.2. Documentos por año

La tendencia del número de publicaciones por año en ambas bases de datos se expone en la Figura 2, donde se observa que, a partir del 2005 hasta el año 2009, se presenta un periodo con series de publicaciones oscilantes, con 1 o 2 publicaciones, intercalados de años con ausencia de estudios. Por otro lado, a partir del año 2010, se presenta un aumento considerado del número de publicaciones, seis en el caso de Scopus y tres para Web of Science, marcando la tendencia de crecimiento para años posteriores.

Se resalta el periodo del año 2017 - 2023 presentando un crecimiento acelerado en la cantidad de publicaciones, con un total de 81 estudios en Scopus para este último año, mientras que en WoS se presentó la mayor cantidad de publicaciones en el año 2022 con 64 documentos, y se espera que al terminar el año 2023 este número sea superado. Asimismo, se observa que los investigadores tienden a publicar más artículos indexados en Scopus que en WoS.

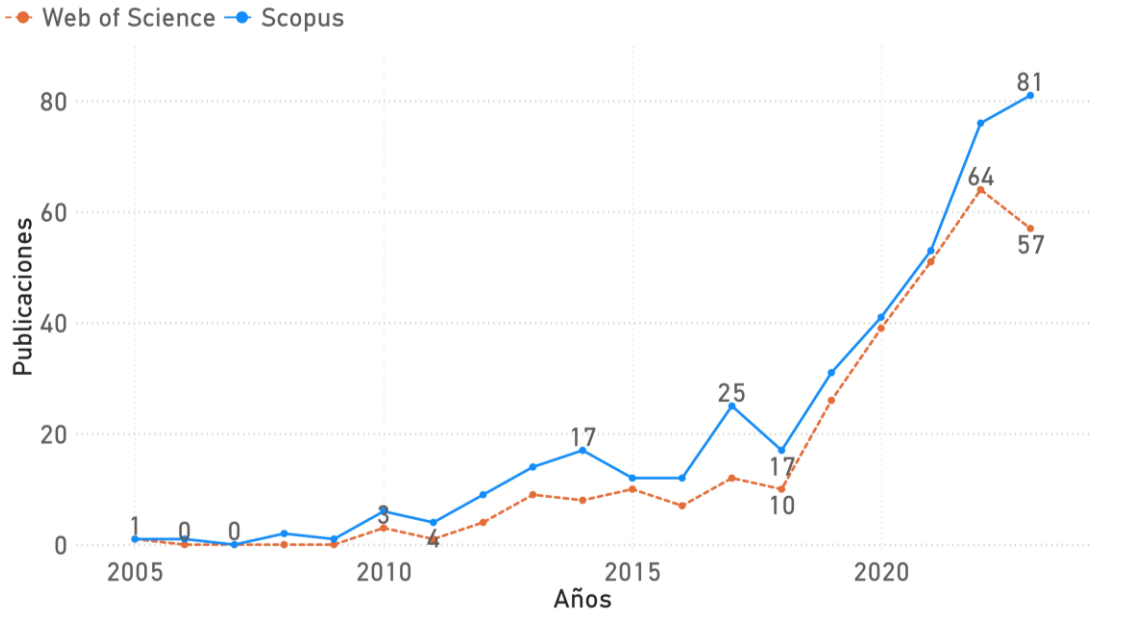
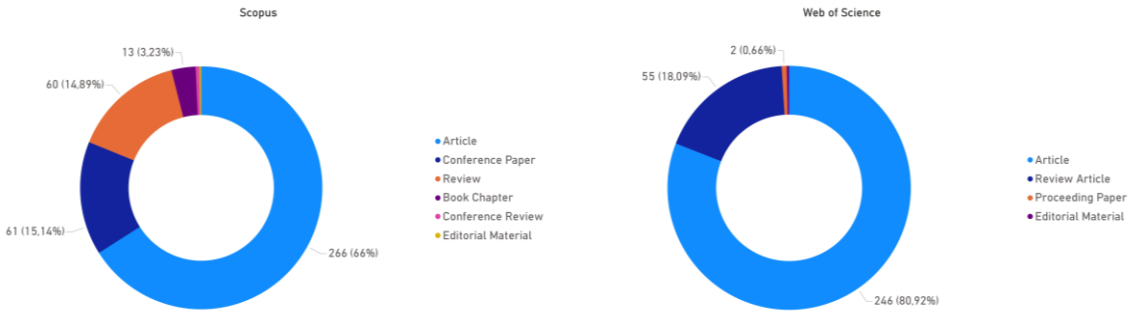


Figura 2. Número de publicaciones por años.

2.1.3. Documentos por tipo

Como se aprecia en la Figura 3, el tipo de documento que predomina en las publicaciones relacionadas con los temas de interés en ambas bases de datos son los artículos científicos, los cuales representan el 66% de los documentos publicados en Scopus como lo muestra la Figura 3a, y 80.92% de trabajos divulgados en WoS como lo presenta la Figura 3b. Asimismo, en WoS, en segundo lugar se encuentran los artículos de revisión con un 18.09%, mientras que en Scopus ese lugar lo tienen los artículos de conferencia con un 15.14% de representación; aunque en tercer lugar y con un 14.89% se encuentran los artículos de revisión. Los artículos de revisión son documentos muy importantes, puesto que agrupan gran cantidad de información lo cual resulta fundamental cuando se pretende tener un panorama extenso acerca de un área de interés.

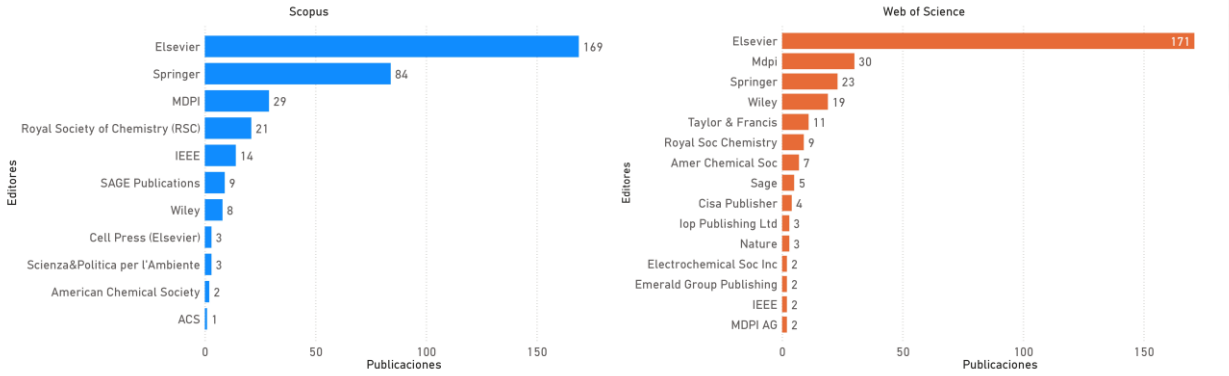


(a) (b)

Figura 3. Número de publicaciones por tipo de documento. a) Scopus; b) WoS.

2.1.4. Documentos por editorial

Los editoriales de revistas científicas en los que se pueden encontrar más publicaciones relacionadas con los temas de la búsqueda se presentan en la Figura 4, siendo Elsevier la editorial por la que más optan los investigadores para publicar sus trabajos, la cual cuenta con un total de 171 documentos presentes en WoS y 169 en Scopus. En el caso de Scopus, en la Figura 4a se aprecia que en segundo lugar se encuentra Springer con 84 publicaciones, seguido de MDPI con 29. Por su parte, en WoS, como lo presenta la Figura 4b, MDPI figura como segunda en el ranking con 30 publicaciones, y Springer de tercera con 23. Por último, en ambas Figuras se aprecian revistas como Royal Society of Chemistry (RSC), Wiley, IEEE y Taylor & Francis, las cuales cuentan con un número considerado de publicaciones en estas bases de datos.

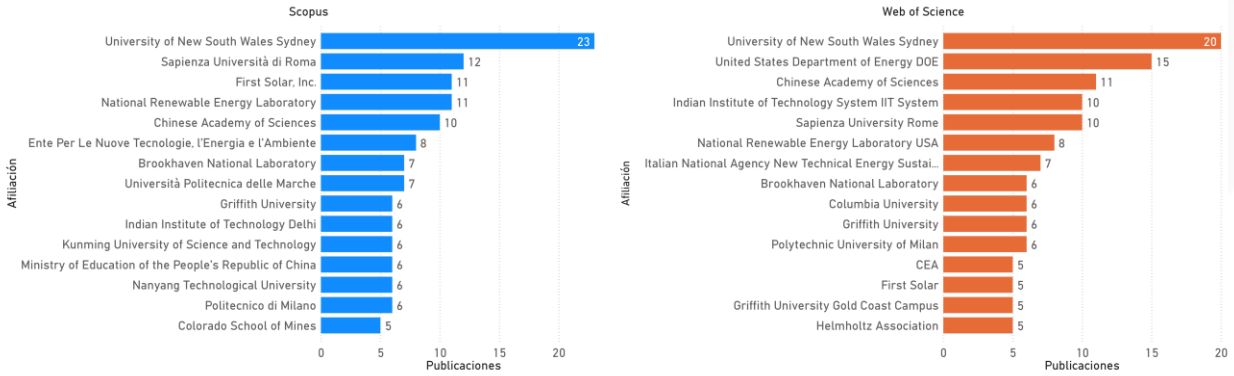


(a) (b)

Figura 4. Número de publicaciones por editoriales. a) Scopus; b) WoS.

2.1.5. Documentos por afiliaciones

Se identifican aquellas instituciones, empresas u organizaciones que han llevado a cabo investigaciones relacionada con los procesos de cierre de parques solares. En las Figuras 5a y 5b, se aprecia que la *University of New South Wales Sydney* es para ambas bases de datos, la institución u organización a la cual se encuentran afiliadas la mayor cantidad de publicaciones, con 23 y 20 publicaciones en Scopus y WoS, respectivamente. En WoS el *United States Department of Enegy Doey* se establece en el segundo puesto con 15 contribuciones, mientras que en Scopus este lugar lo tiene la *Sapienza Universita di Roma* con 12 publicaciones. Otras organizaciones referentes en el tema son el *United States Department of Energy (DOE)*, la *First Solar Inc.*, la *Chinese Academy of Sciences*, el *National Renewable Energy Laboratory*, y el *Indian Institute of Technology System (IIT System).*

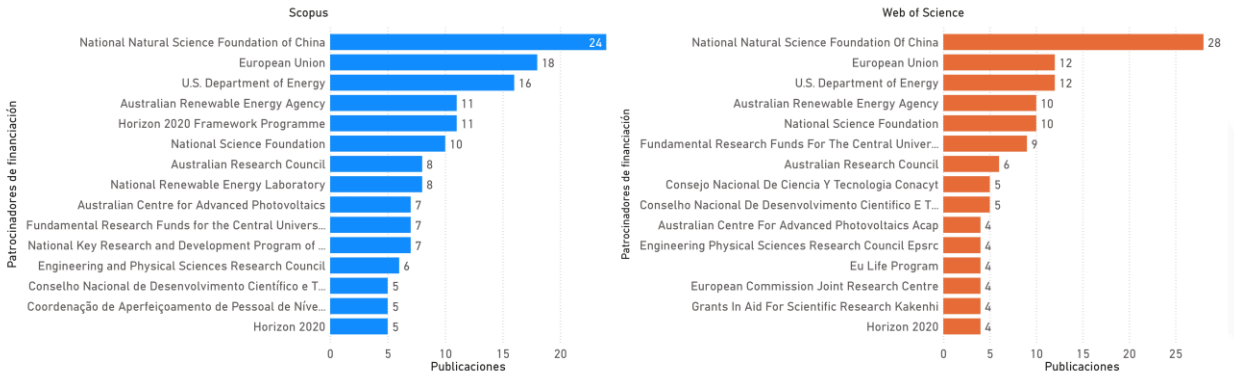


(a) (b)

Figura 5. Número de publicaciones por afiliaciones. a) Scopus; b) WoS.

2.1.6. Documentos por patrocinadores de financiación

La categorización de documentos según sus patrocinadores resulta fundamental para reconocer las fuentes de financiamiento, analizar las tendencias de inversión a lo largo del tiempo y fomentar colaboraciones estratégicas. En las Figuras 6a y 6b, se pueden detallar cuáles son los principales patrocinadores involucrados dentro del campo de estudio, siendo estos, la *National Natural Science Foundation of China*, contribuyendo a la publicación de 28 documentos en WoS y 24 en Scopus, seguidamente de la *European Union* con 12 y 18 publicaciones en Scopus y WoS, respectivamente. En tercer lugar, figura el *U.S. Departament of Energy* con 12 contribuciones en WoS y 16 en Scopus. En el cuarto puesto se encuentra la *Australian Renewable Energy Agency*, y en el quinto lugar en Scopus está la *Horizon 2020 Framework Programme* con 11 documentos, mientras que en WoS la *National Science Foundation* tiene ese lugar con 10 contribuciones.



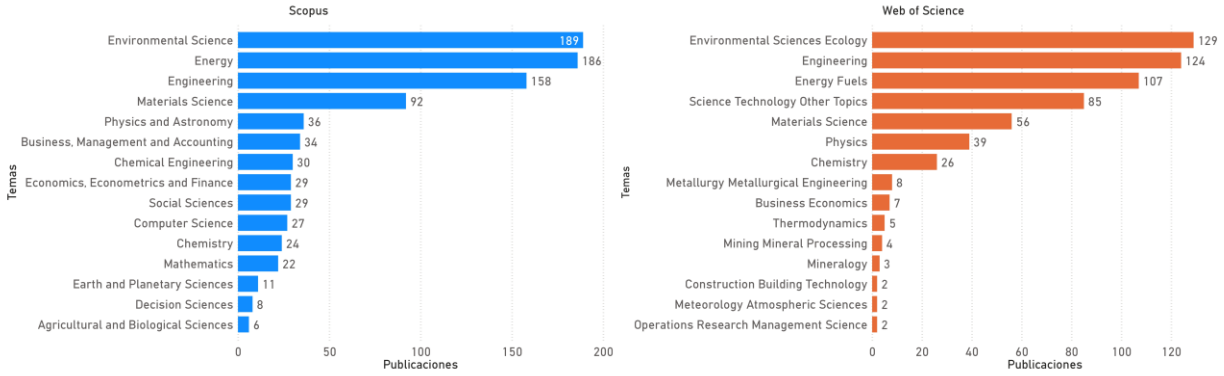
(a) (b)

Figura 6. Número de publicaciones por patrocinadores de financiación. a) Scopus; b) WoS.

2.1.7. Documentos por área temática

En el gráfico de la distribución de documentos según el área temática, correspondiente a la Figura 7, se refleja una diversa gama de áreas relacionadas a los temas de interés del estudio. De esta distribución se refleja un grupo principal con áreas temáticas de mayor participación, de las cuales las ciencias ambientales con 189 documentos en Scopus, como lo muestra la Figura 7a, y 129 en WoS como lo presenta la Figura 7b, se establece en primer lugar como el área temática sobre la cual se enmarca el mayor número de publicaciones.

En Scopus, la energía con 186 documentos asociado y la ingeniería con 158, se ubican en segundo y tercer lugar, respetivamente. Por su parte, en WoS, estas dos áreas temáticas intercambian de posición. Sin embargo, las tres áreas temáticas mencionadas con anterioridad componen el top 3 en el ranking de ambas bases de datos. Asimismo, se identifican temas sobresalientes como la ciencia de materiales, la tecnología científica, la física, astronomía, química, y los negocios, la administración y la contabilidad, sobre los cuales se enfocan gran parte de las investigaciones.



(a) (b)

Figura 7. Número de publicaciones por área temática, WoS.

2.1.8. Análisis con VOSviewer

VOSviewer es una herramienta de visualización de datos desarrollada por el Centro de Estudios de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Leiden en los Países Bajos. Está diseñada específicamente para visualizar y analizar redes y mapas de datos, especialmente en el ámbito de la investigación científica. Es muy utilizada en la comunidad académica para visualizar y analizar relaciones entre términos, autores, palabras clave o cualquier otro tipo de entidad que pueda representarse como una red. En la Figura 8 se muestra la red obtenida con la ecuación de búsqueda de Scopus.

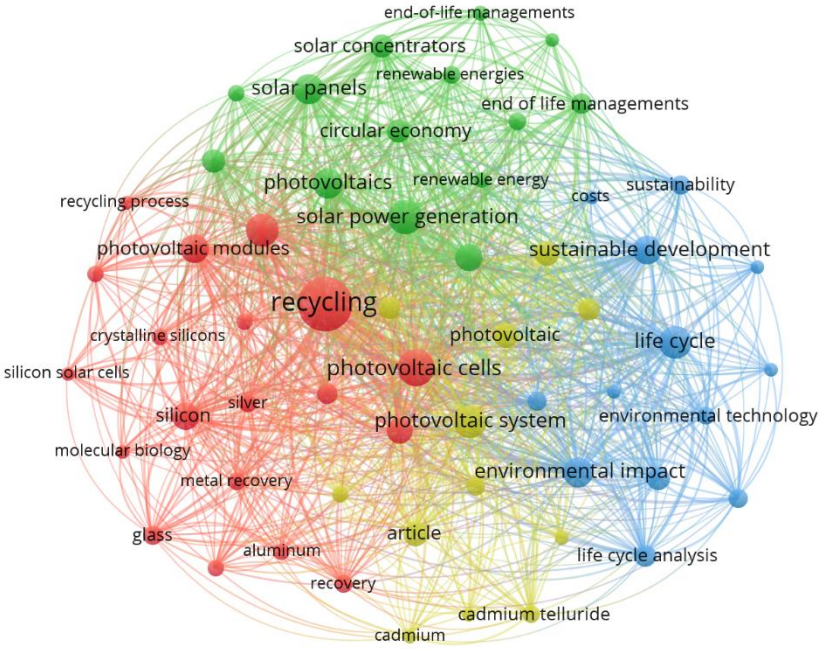


Figura 8. Redes de coocurrencia de palabras clave utilizando los datos de Scopus.

En la Figura 9 se puede observar el resultado obtenido cuando se resalta el clúster 1 de color rojo con 19 palabras clave, en el cual se destaca el término recycling con 281 ocurrencias y 57 enlaces a otros términos, lo cual demuestra la relevancia del proceso de reciclaje en las investigaciones consultadas. En el mismo clúster, es de apreciar la importancia del término "end of lives", con 106 ocurrencias y 57 enlaces. El clúster 2 de color verde está conformado por 14 ítems, en el cual se destacan términos con mayor relevancia como "solar power generation" con 112 ocurrencias y 57 enlaces, mientras que "circular economy" aparece con 56 ocurrencias y 50 enlaces. En el clúster 3 (color azul) se destaca como palabra clave principal "life cycle" con 109 ocurrencias y 109 enlaces. Finalmente, en el clúster 4 de color amarillo de resalta el término "photovoltaic system" con 107 ocurrencias y 57 enlaces.

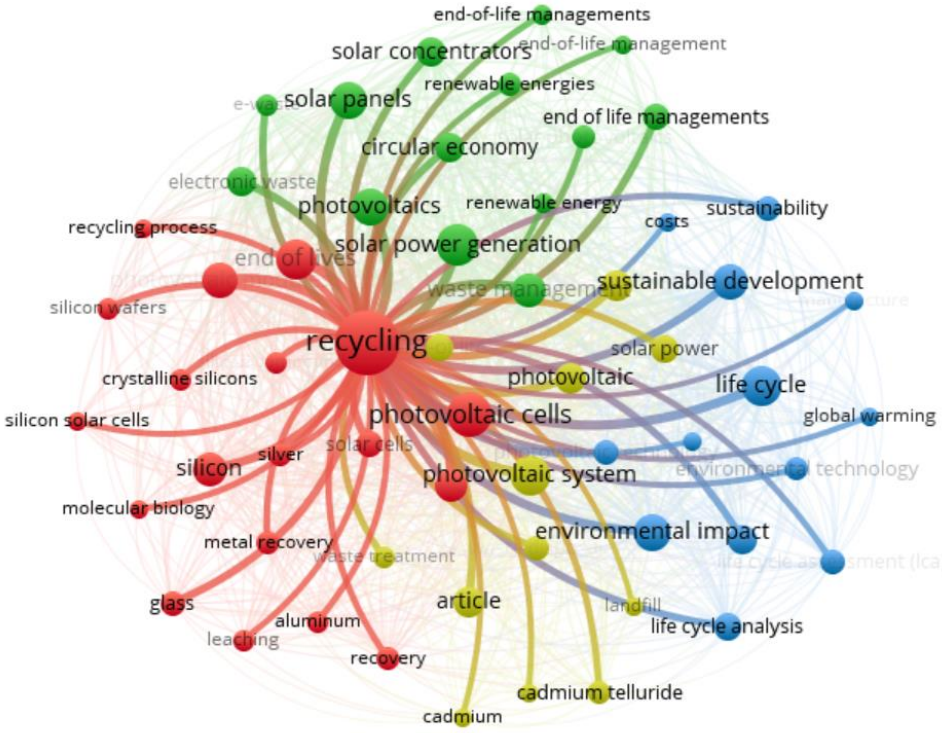


Figura 9. Enlaces para el clúster 1 del mapa de coocurrencias.

Los resultados demuestran la relevancia y la relación entre palabras claves importantes, que se pueden interpretar como el interés de la comunidad científica y académica a nivel mundial de investigar sobre procesos de reciclaje ante el evento del fin de ciclo de vida útil de los paneles solares fotovoltaicos, escenario donde cobran relevancia conceptos como el de economía circular. En estos resultados no se resalta de forma exacta el término asociado a granjas solares (solar farm), pero si a su principal componente como lo son los paneles solares o generación de energía solar.

Finalmente, como resultado del análisis bibliométrico se puede concluir que los países líderes en el número de publicaciones, instituciones educativas asociadas y patrocinadores son China, Estados Unidos y Australia, lo cual coincide con los principales mercados fotovoltaicos del 2022 según la Agencia Internacional de la Energía (Snapshot of Global PV Markets). Por otra parte, los documentos con mayor preferencia a ser publicados por los autores y editoriales, son los artículos científicos y artículos de revisión, puesto que la investigación relacionada a los parques solares ha tenido un crecimiento favorable a partir del 2020, se han enfocado en estudiar las oportunidades de mejora en relación con la eficiencia energética de los paneles, el aprovechamiento de los residuos electrónicos y los impactos ambientales que generan este tipo de instalaciones; por todo esto se identificaron las temáticas de mayor publicación: ingeniería, ciencias ambientales y energía.

3. ECONOMÍA CIRCULAR EN PROCESOS DE CIERRE DE PARQUES SOLARES

Colombia ha priorizado la economía circular y la transición energética en sus planes nacionales de desarrollo, buscando reducir el consumo de recursos, minimizar residuos y adoptar fuentes de energía renovable para combatir el cambio climático. El actual plan, "Colombia potencia de la vida 2023-2027", destaca la formación de comunidades energéticas mediante fuentes no convencionales de energía renovable, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU y el acuerdo de París.

A pesar de haber avances significativos en la integración de energías renovables, especialmente energía solar, en la matriz energética colombiana, se enfrentan desafíos relacionados con la planificación insuficiente para el cierre y abandono de proyectos solares al final de su vida útil. Aunque se estima un crecimiento sostenido del mercado de energía solar en Colombia, se carece de estrategias para aprovechar los recursos de los equipos al finalizar su vida útil.

La estrategia nacional propone un enfoque holístico para la transformación hacia sistemas productivos circulares, con potencial para generar ahorros anuales significativos y oportunidades de nuevos negocios. Los proyectos de energía solar, aunque contribuyen a la reducción de emisiones y dependencia de combustibles fósiles, requieren una evaluación ambiental integral que abarque todas las etapas del ciclo de vida de los paneles solares. Se destaca la importancia del licenciamiento ambiental basado en métodos y criterios que identifiquen, minimicen y compensen los efectos potenciales de estos proyectos sobre el entorno natural y social, asegurando el cumplimiento de la normativa vigente. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) propone una herramienta complementaria para una evaluación más amplia y cuantitativa de los aspectos ambientales asociados con los paneles solares [15].

3.1. Análisis comparativo entre la evaluación del ciclo de vida de paneles fotovoltaicos de silicio y análisis de ciclo de vida del proceso de reciclaje de módulos solares

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) son aquellos que han dejado de ser útiles y que contienen componentes que pueden afectar negativamente al medio ambiente y a la salud humana si no se gestionan de forma adecuada [16], sin embargo, Colombia no tiene una categorización propia que se adapte a su realidad y a su sector productivo.

Entre los RAEE se encuentran los paneles fotovoltaicos, los cuales son dispositivos que utilizan la energía solar para producir electricidad. Estos paneles contienen metales pesados, sustancias orgánicas persistentes y otros elementos que pueden ser tóxicos o inflamables. Por lo tanto, su reciclaje o disposición final debe realizarse con precaución y

siguiendo las normas de seguridad pertinentes, para prevenir que los trabajadores y el público se exponga a estos materiales. En Colombia, no existe un criterio claro para clasificar los residuos de paneles solares fotovoltaicos como peligrosos o no peligrosos, por lo que se requiere una mayor investigación y regulación al respecto.

En la Figura 10 se evidencian los tipos de residuos que se generan a partir de los paneles fotovoltaicos, esta información es respaldada por la ficha de seguridad y la norma GTC 24 de ICONTEC. Esta clasificación es importante para determinar el manejo adecuado de estos residuos y evitar riesgos ambientales y sanitarios [17].

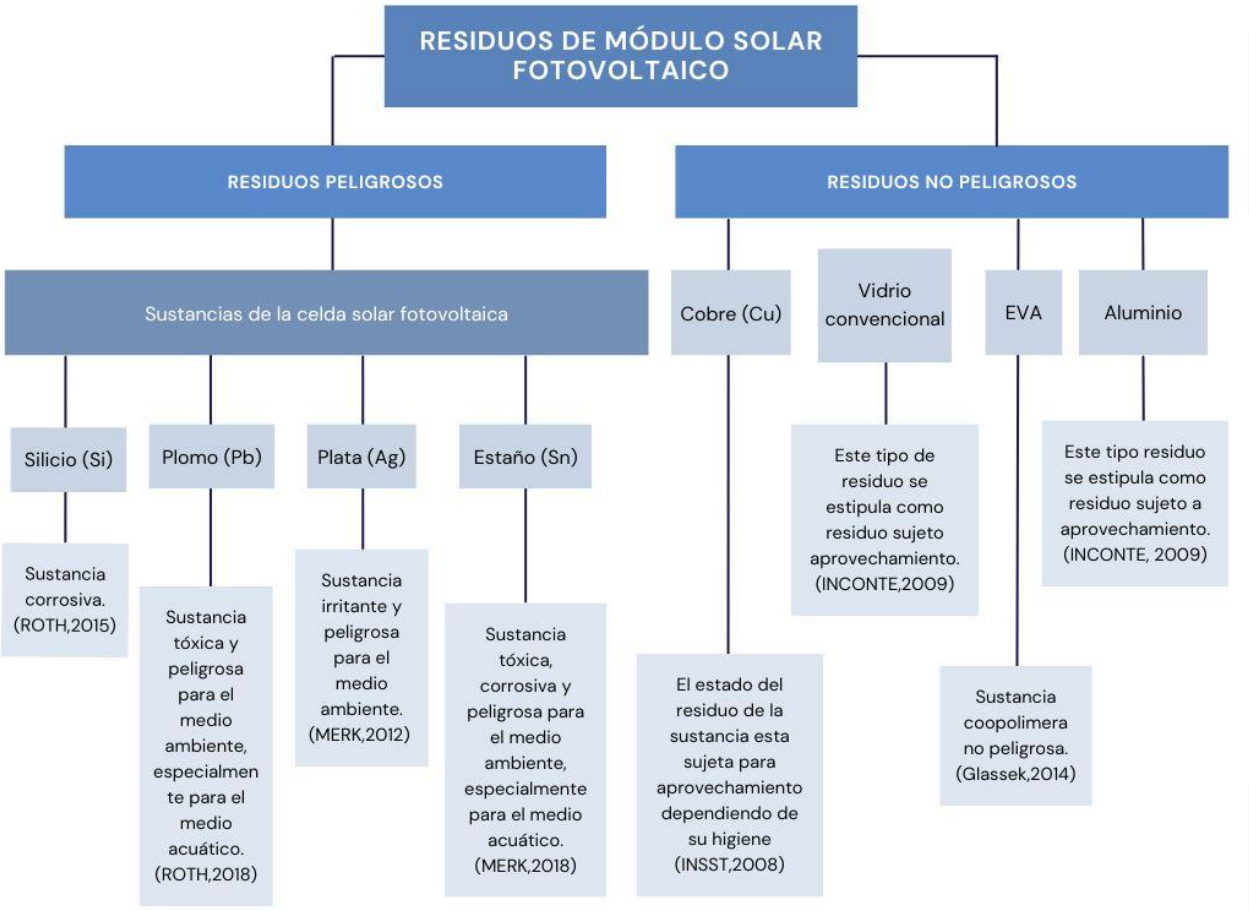


Figura 10. Residuos de módulo solar fotovoltaico [17].

Nota. En la Figura 10 se evidencian los tipos de residuos que se generan a partir de los paneles fotovoltaicos, esta información es respaldada por la ficha de seguridad y la norma GTC 24 de ICONTEC. Esta clasificación es importante para determinar el manejo adecuado de estos residuos y evitar riesgos ambientales y sanitarios [17].

Además del análisis comparativo entre la evaluación del ciclo de vida de paneles fotovoltaicos de silicio y el análisis de ciclo de vida del proceso de reciclaje de módulos solares, enfocado en el proceso de reciclaje de Deutsche Solar AG, en esta sección también se pretende aportar un análisis del impacto ambiental de las estrategias de economía circular.

Al estimar la eficiencia energética y la durabilidad de los paneles producidos, considerando las circunstancias locales y las variaciones geográficas, se puede apreciar cómo afecta el medio ambiente al final de su vida útil. Se estudian beneficios sociales y económicos que se generan mediante la adopción de estrategias de economía circular, como la generación de empleo local y el fortalecimiento de la cadena de suministro.

Asimismo, se destaca la importancia de que los proyectos fotovoltaicos en el país realicen ACV acordes a sus características específicas, empleando los resultados como insumos para la preparación de evaluaciones de impacto ambiental y estrategias de gestión, destacando la implementación de tácticas de la economía circular, que puede mejorar significativamente la sostenibilidad ambiental de los proyectos fotovoltaicos.

Este análisis integral proporcionará una visión clara de los impactos ambientales y las estrategias de sostenibilidad asociadas con los parques fotovoltaicos, lo cual contribuirá a la toma de decisiones y fomentará acciones más sostenibles en el sector de la energía solar.

Es importante resaltar que este análisis está respaldado al 100% en datos bibliográficos y en escenarios propositivos como parte del enfoque de economía circular. Además, el ACV investiga los efectos ambientales potenciales, no anticipa los efectos absolutos debido a:

- La expresión relativa de los efectos ambientales potenciales en relación con la unidad de referencia.
- Los efectos ambientales se integran en el espacio y el tiempo.
- La incertidumbre que existe al analizar los efectos ambientales.
- Algunos efectos ambientales posibles pueden ser claramente afectados en el futuro.

3.1.1. Evaluación del ciclo de vida de paneles fotovoltaicos de silicio

Para este análisis se utilizó como soporte el informe emitido de DS New Energy acerca del análisis del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos de silicio, con el objetivo de evaluar los aspectos ambientales de la producción, uso y fin de vida de estos paneles, los cuales son una fuente de energía alternativa. El informe tiene en cuenta el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero durante cada fase del ciclo de vida, así como efectos ambientales relacionados con el transporte, instalación, el mantenimiento y el reciclaje o la eliminación de los paneles. También realiza comparaciones entre

diferentes fuentes de energía y estima los costos externos ambientales que se podrían evitar con el uso de los paneles fotovoltaicos [18][19].

- **Requisitos energéticos para la producción**

El proceso de producción representa, de manera abrumadora, la etapa más exigente en términos de consumo de energía entre módulos fotovoltaicos instalados (Figura 11). En estos procesos utilizan fuentes significativas de energía para transformar la arena de sílice en silicio de alta pureza, con el propósito de la fabricación de las obleas fotovoltaicas. La construcción de estos módulos constituye otra fase intensiva en recursos, puesto que implica la incorporación de marcos de aluminio con un contenido óptimo de energía y paneles de vidrio.

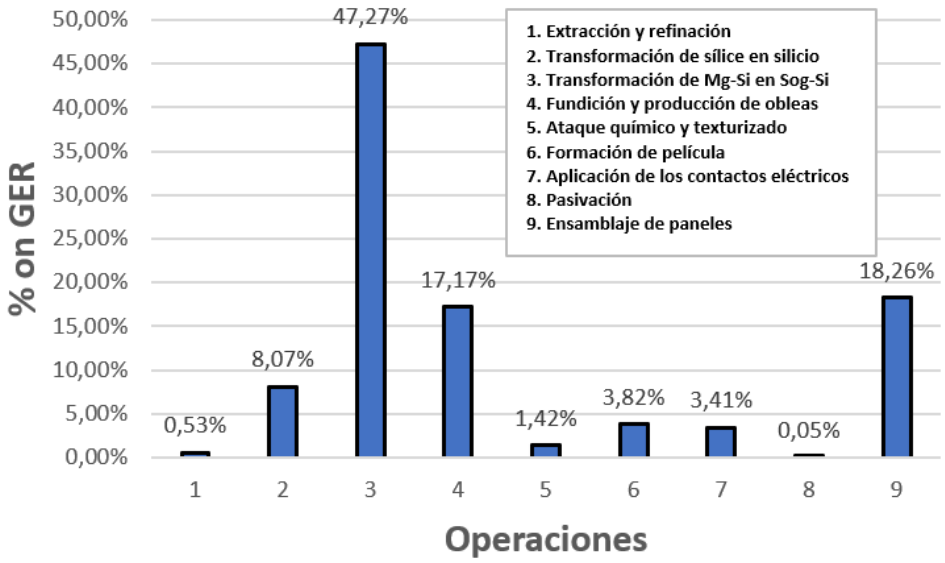


Figura 11. Requisitos de energía para fabricación de paneles fotovoltaicos vs porcentaje de energía bruta [20].

En cuanto a la evaluación del impacto ambiental durante la producción del módulo fotovoltaico de silicio, es necesario analizar tres elementos fundamentales: el marco, el módulo y elementos que equilibran el sistema, tales como el bastidor y el inversor. El efecto invernadero se produce principalmente durante la fabricación de los módulos (81%), seguido por los componentes del sistema de equilibrio (12%) y el marco (7%). En la Figura 12 se muestra los recursos utilizados durante el ciclo de producción de un módulo de silicio.

- **Emisión de dióxido de carbono de lifecyle**

Las emisiones de dióxido de carbono se producen a lo largo del ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos, abarcando la producción, transporte e instalación de materiales.

Además de los componentes técnicos, la instalación convencional implica la presencia de cables eléctricos y soportes metálicos, y en sistemas en el suelo, se añade una base de hormigón. En áreas remotas, puede ser necesario incorporar infraestructura adicional para la distribución de energía a la red local.

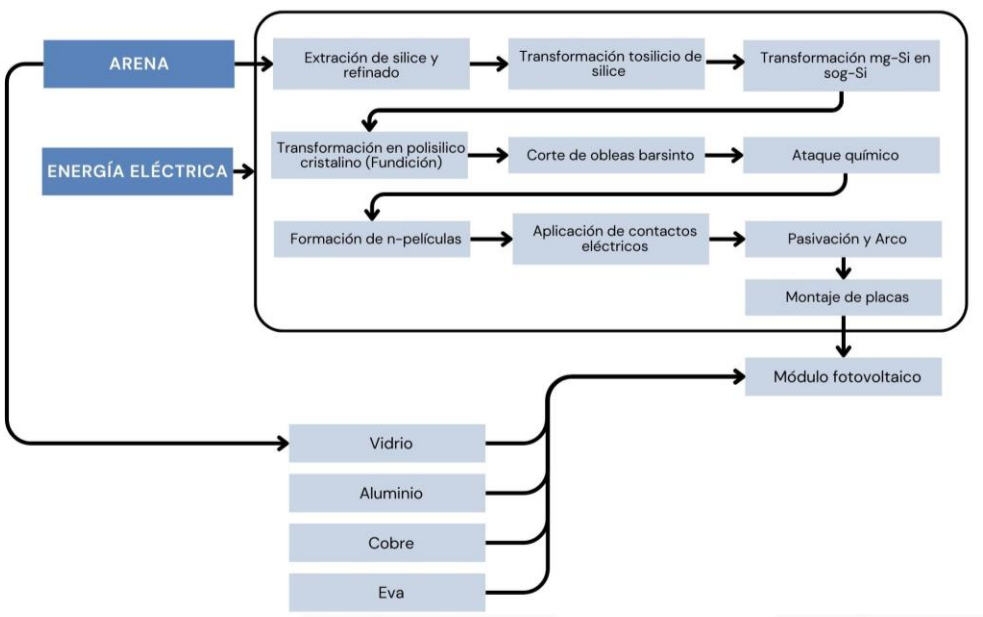


Figura 12. Producción de un módulo de silicio [19].

Junto con los materiales, es esencial considerar las emisiones de dióxido de carbono generadas por los vehículos durante el transporte de los módulos desde la fábrica hasta el lugar de instalación. La Figura 13 muestra como estos factores afectan al dióxido de carbono durante la vida útil de cinco módulos fotovoltaicos [21].

Las emisiones de dióxido de carbono se producen a lo largo del ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos, abarcando la producción, transporte e instalación de materiales. Además de los componentes técnicos, la instalación convencional implica la presencia de cables eléctricos y soportes metálicos, y en sistemas en el suelo, se añade una base de hormigón. En áreas remotas, puede ser necesario incorporar infraestructura adicional para la distribución de energía a la red local. Junto con los materiales, es esencial considerar las emisiones de dióxido de carbono generadas por los vehículos durante el transporte de los módulos desde la fábrica hasta el lugar de instalación. La Figura 13 muestra como estos factores afectan al dióxido de carbono durante la vida útil de cinco módulos fotovoltaicos [21].

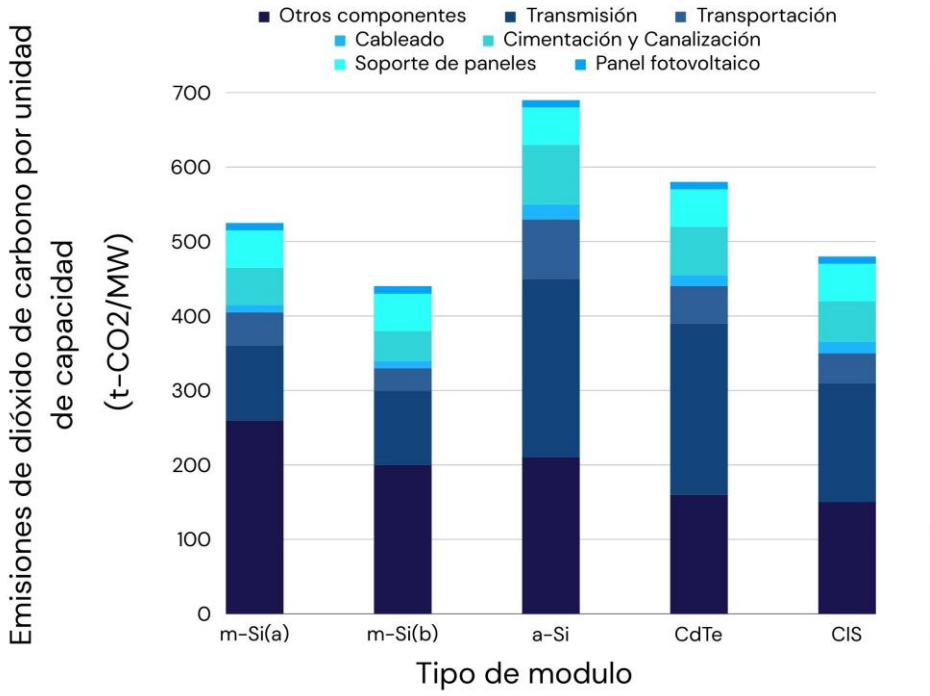


Figura 13. Emisiones de dióxido de carbono clasificadas según el tipo de módulo [22].

- **Emisiones asociadas al transporte**

La producción y transporte de los componentes de la energía fotovoltaica generan un impacto ambiental significativo, equivalente al 9% de las emisiones totales del ciclo de vida de esta tecnología [19]. Los paneles solares, los soportes metálicos y el material eléctrico (como cables, conectores y sistemas de fijación) suelen proceder de países extranjeros y se trasladan a los lugares de destino. Estos elementos se transportan por carretera hasta los almacenes y, desde ahí, hasta el lugar de la instalación.

- **Emisiones de instalación**

La instalación del sistema fotovoltaico implica el uso de vehículos, materiales y electricidad para evitar que existan gases de efecto invernadero. No obstante, estas emisiones son muy bajas en comparación con las emisiones totales del periodo de vida del sistema, que incluyen la fabricación, transporte, funcionamiento y la reutilización de los componentes. Según algunos estudios, las emisiones de la instalación representan menos del 1% de las emisiones del periodo de vida [22].

- **Emisiones de operación**

Los módulos fotovoltaicos no causan emisiones al aire ni al agua cuando se usan para producir electricidad. Sin embargo, la fabricación de los módulos fotovoltaicos tiene impactos ambientales, tales como las emisiones de solventes y alcohol, que contribuyen a la formación de ozono en la atmósfera. También afectan los recursos hídricos mediante la

obtención de materiales tales como cuarzo, carburo de silicio, vidrio y aluminio, necesarios para construcción de módulos.

- **Emisiones de disposición de residuos**

La información sobre el impacto ambiental de los paneles solares al final de su ciclo de vida es escasa y limitada. Para estimar las emisiones asociadas a su disposición y/o reciclaje, se requiere hacer suposiciones sobre los métodos y procesos empleados. Estas suposiciones pueden variar según el contexto técnico y regulatorio de cada país o región.

En España, se aplica el marco legal de la Unión Europea para tratar los residuos de paneles solares. Se ha establecido un Real Decreto 110/2015, que amplía su ámbito de aplicación y establece categorías específicas para los paneles solares. Asimismo, se dispone de los Sistemas Integrados de Gestión (SIG), que son organizaciones sin ánimo de lucro que se encargan de valorizar y reciclar los residuos, cumpliendo con metas específicas. Aunque el RD 110/2015 establece un margen mínimo de aprovechamiento del 85% para los paneles solares, existen iniciativas como la fundación PV Cycle, que demuestran que se puede alcanzar un porcentaje mucho mayor, llegando al 96% de reciclaje en 2016 [23].

La administración de los residuos de paneles solares comprende diversas etapas, desde la repotenciación hasta la disposición final, con variaciones en el porcentaje de materiales no tratados. La disposición final debe realizarse de manera que evite la contaminación y los peligros para la salud y el entorno natural. Para ello, se recomienda la separación previa de las partes del panel solar, considerando diferentes métodos como el manual, mecánico, magnético, trituración e incineración a altas temperaturas. En las Figuras 14 y 15 se muestran los procesos que se pueden realizar para el caso de panel solar y para las celdas solares.

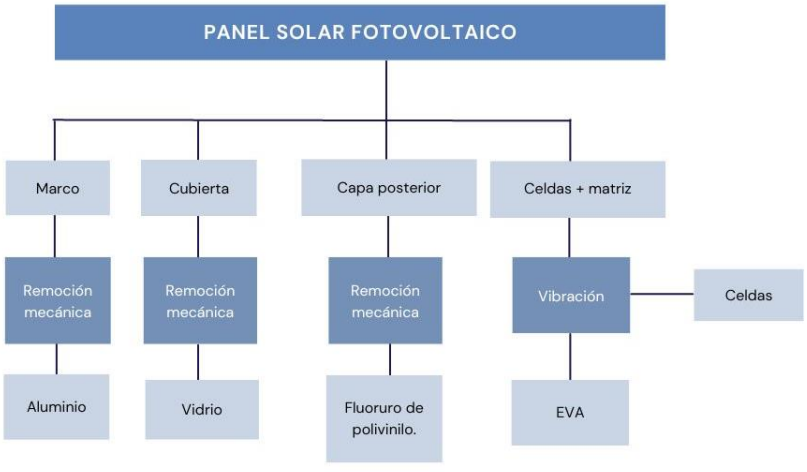


Figura 14. Proceso un panel fotovoltaico de silicio [24].

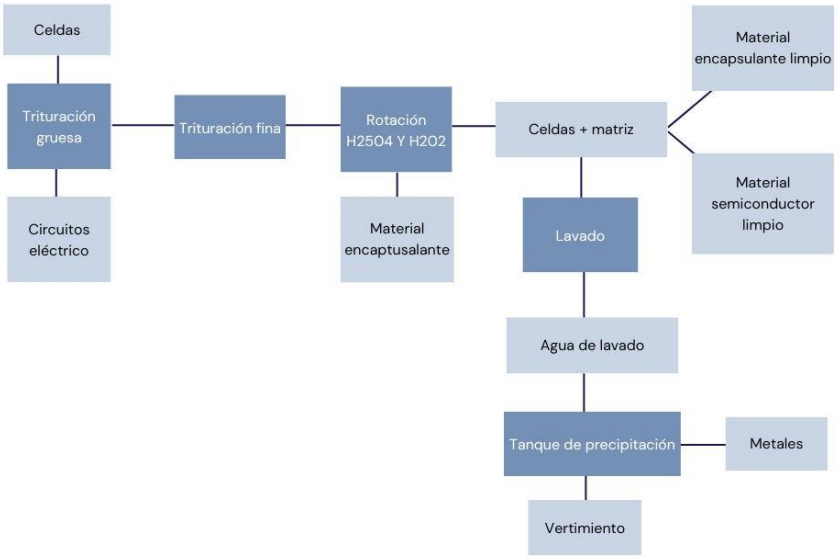


Figura 15. Proceso de una celda [24].

3.1.2. Caso de estudio proceso de reciclaje de Deutsche solar AG

Solar Material es una unidad de negocio de Deutsche Solar AG, que participa en varios ciclos de reciclaje a lo largo de la sucesión de pasos de producción, desde el silicio como materia prima hasta los módulos fotovoltaicos.

En el ACV referido se investigó un módulo estándar con 72 celdas (12,5 x 12,5 cm), Tedlar como lámina trasera y un marco de aluminio. Para la valoración de las consecuencias perjudiciales en el entorno ambiental se empleó el método CML Baseline-2000 del Instituto de Ciencias Ambientales de Leiden (CML). El análisis se realizó con el software Simapro 6.0. Los cálculos se basan en datos de Deutsche Solar y en datos de la base de datos ecoinvent 2000 [25]. El conjunto de datos para la elaboración de módulos de silicio se fundamenta en un análisis realizado desde 1995 hasta 2000; el impacto ambiental de producir la cantidad recolectada de vidrio y metales, así como de producir la cantidad de módulos recuperados, se atribuye a los impactos del propio proceso de reciclaje.

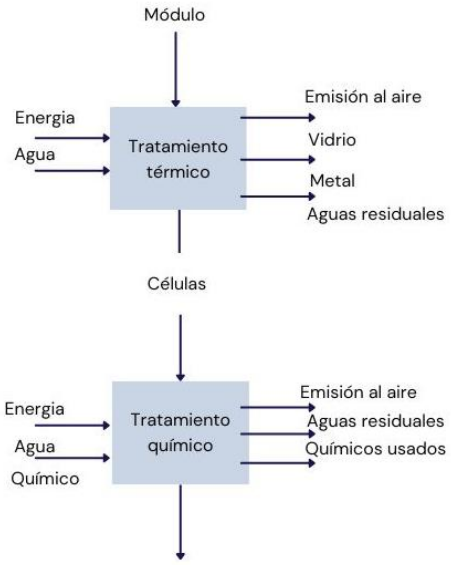


Figura 16. Entradas y salidas importantes durante el proceso de reciclaje de módulos fotovoltaicos [25].

El proceso se evalúa en función de siete categorías de impacto, por ejemplo "cambio climático". Para cada categoría se calcula un indicador específico (por ejemplo, kg CO_2 eq) como la suma ponderada de las emisiones individuales. En la Figura 17, se contrapone la carga ambiental (contribución positiva) a la descarga ambiental (contribución negativa) del proceso de reciclaje. La suma de la contribución negativa y positiva se escala al 100%, porque cada categoría es evaluada por un indicador diferente con su propia unidad.

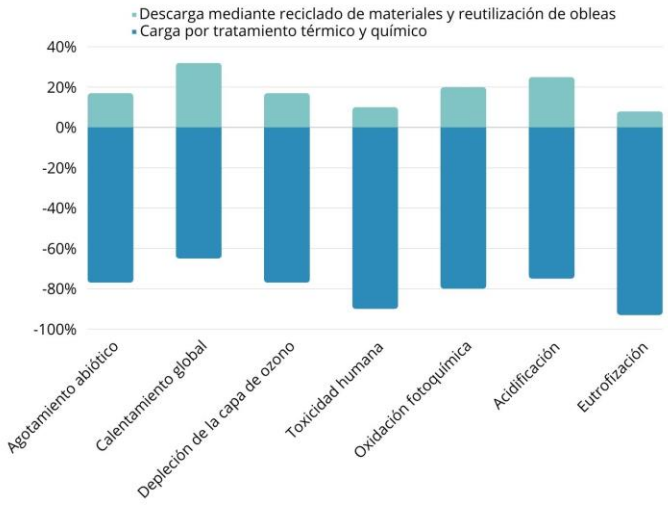


Figura 17. Descarga y carga del proceso de reciclaje de Deutsche Solar AG [25].

Debido a que se evitan la producción de nuevos módulos y se recicla el vidrio y metales, los valores de impacto absoluto son negativos para cada categoría. Esto muestra que los

procedimientos de alto nivel de reciclaje son menos contaminantes en comparación con las alternativas de eliminación con bajo impacto ambiental.

3.1.3. Impacto ambiental de modelo lineal y circular para el manejo de residuos

Con el objetivo de identificar con mayor detalle los impactos ambientales en la gestión diferencial de residuos fotovoltaicos, se sintetizó la información de fuentes bibliográficas con las cuales se cuantifica el beneficio ambiental real generado por la aplicación de modelos circulares, lineales y avanzados de economía circular, estos incluyen la dimensión temporal en la evaluación de la circularidad para considerar el aplazamiento de las emisiones (por ejemplo, al extender la vida útil), combinando el enfoque dinámico del ACV, con el indicador de índice de ocupación en uso (UOR), que enfatiza la relevancia de la eficiencia del tiempo a lo largo del proceso. suministro, uso y disposición de productos [26].

Se refieren tres escenarios, cada uno con un enfoque diferente al final de la vida útil, capaz de alcanzar diferentes niveles de recuperación:

Tabla 1. Enfoques para el análisis del ciclo de vida.

Escenario A	Escenario B	Escenario C
Modelo lineal incluye el desmontaje manual de la caja de conexiones del módulo fotovoltaico, seguido de la incineración de la primera, mientras que la segunda se envía al vertedero sin tratamientos adicionales.	Modelo de downcycling se recupera el vidrio del módulo y parte del cobre de los cables, que suele ser suficiente para cumplir con la normativa de la UE.	Modelo avanzado de economía circular, el cual consiste en: secuencia de tratamientos físicos (mecánicos y térmicos) seguidos de lixiviación acida y electrolisis [27].

Las emisiones derivadas de la remanufactura del panel (segunda fase de suministro) se muestran en la Figura 18. Los escenarios B y C se benefician de la introducción de materiales secundarios del ciclo de vida anterior. Sin embargo, la mejora del escenario B es inferior al 2%, mientras que en el escenario C se prevé una reducción de emisiones del 17% gracias al reciclaje de células solares.

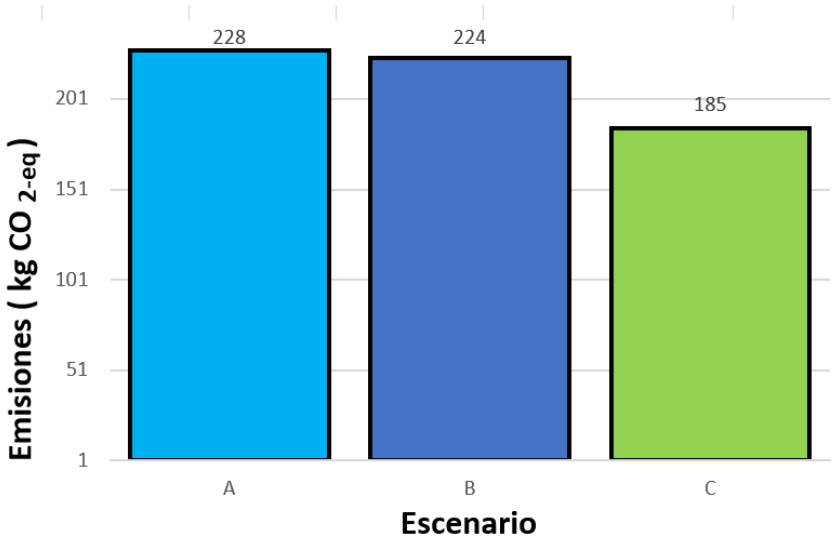


Figura 18. Emisiones derivadas de la remanufactura del panel (segunda fase de suministro) [28].

Al analizar el impacto por componente, como se muestra en la Figura 19, la producción de células solares parece ser la mayor fuente de emisiones en la fase de suministro, seguida de la producción y el transporte de vidrio. Por tanto, el silicio afecta en gran medida a la métrica de emisiones. Esto enfatiza la importancia del uso de silicio secundario en la producción de células solares y la necesidad de evitar la producción de este material.

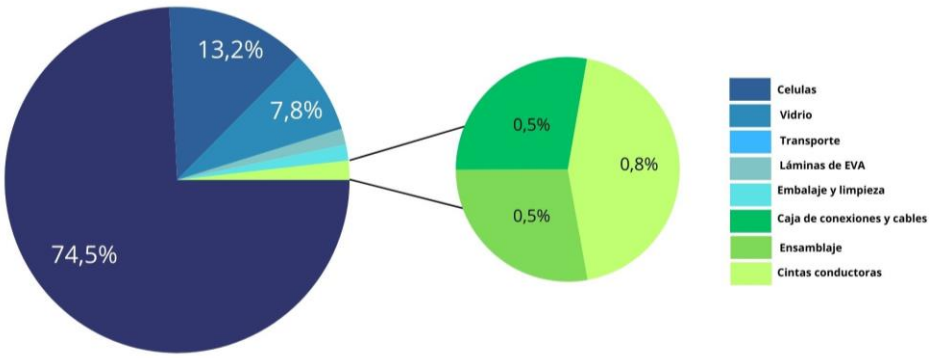


Figura 19. Impacto por componente [28].

La aplicación de estrategias circulares como el reciclaje permite reducir el impacto ambiental global, puesto que el aumento de emisiones debido a los procesos de reciclaje requeridos es insignificante en comparación con el beneficio que se deriva de un menor consumo de energía gracias al uso de materiales secundarios.

El beneficio derivado de la aplicación de estrategias circulares (es decir, reciclaje) es más visible cuando los procesos utilizan energía generada a través de fuentes renovables,

puesto que permiten que el proceso productivo tenga un impacto reducido independientemente de la cantidad de materias primas vírgenes utilizadas. Los escenarios totalmente renovables (IS) no alcanzan un objetivo de cero emisiones porque los procesos más impactantes todavía utilizan combustibles fósiles para la generación de calor (en lugar de electricidad) o tienen emisiones intrínsecas de GEI, que son inevitables debido a la naturaleza física del proceso (por ejemplo, reacciones químicas que producen CO2 como subproducto) [28].

Después de compilada y analizada la información base para comparar la evaluación del ciclo de vida de paneles fotovoltaicos de silicio y el ACV del proceso de reciclaje de módulos solares, se pueden identificar los siguientes aspectos como elementos fundamentales:

- La producción y la construcción de los módulos de silicio son las fases que más energía consumen y que más gases de efecto invernadero emiten en todo el ciclo de vida.
- Los módulos de silicio monocristalino de alta eficiencia y los de silicio monocristalino son los que menos dióxido de carbono emiten por unidad de capacidad (t-O2/MW), por lo que se sugiere fomentar su uso en los futuros proyectos solares.
- El reciclaje de los módulos solares requiere una alta capacidad técnica y se recomienda que en Colombia se creen y se implementen programas técnicos que capaciten al capital humano para realizar procesos de reciclaje de módulos solares de alto nivel.
- Es evidente la ausencia de investigación sobre las emisiones por la disposición de los residuos fotovoltaicos, por lo que se recomienda impulsar alianzas entre empresas, universidades y centros de investigación que evalúen las emisiones por la disposición.

En cuanto al impacto ambiental que puede tener un modelo lineal y otros con enfoque de economía circular, se destaca lo siguiente:

- Para lograr la recuperación de partes de los paneles solares, se resalta la importancia del uso de silicio secundario en la producción de las células solares y la necesidad de evitar la producción de este material.
- Es necesario promover el eco etiquetado en los paneles solares, para que desde su diseño se tomen las medidas necesarias para generar el menor impacto ambiental posible.
- El componente que más impacto ambiental genera son las células fotovoltaicas.

Los aspectos mencionados permiten deducir que en Colombia se necesitarán transformaciones desde la planificación de los proyectos solares, políticas que regulen el uso de paneles solares con ecoetiquetas y de bajo impacto ambiental, procesos de reciclaje de alto valor para módulos solares, e investigación relacionada al campo, todo esto requerirá de esfuerzo coordinados entre empresas privadas, estado, comunidad e instituciones universitarias.

En la Tabla 2 se presenta de manera resumida la comparación de LCA y AVC en relación con la contribución del cambio climático y factores del proceso de reciclaje de los casos estudiados.

Tabla 2. LCA vs ACV.

	Contribución al cambio climático	Proceso de reciclaje
Paneles Fotovoltaicos De Silicio.	Alta demanda de emisiones para la producción de sus componentes principales (marco, modulo y componentes de equilibrio del sistema) mayoritariamente en las etapas de transformación de materias primas y procesos de ensamblaje.	Los principales procedimientos de separación son manual, mecánica, magnética y trituración e incineración en altas temperaturas. Cuando son componentes tóxicos o de carácter peligroso se tratan por medio de lixiviación ácida y electrólisis.
	Alta demanda de recursos, predominantemente valorizables para incorporación de nuevos ciclos productivos de reutilización, reciclaje y repotenciación.	Los volúmenes de recuperación de materiales de los paneles de silicio son del 96% y los de pérdida son del 4% [9].
Proceso de reciclaje de Deutsche Solar AG.	Evaluación a lo largo de la sucesión de todas las etapas de producción en conjunto del análisis de entradas y salidas de material y el impacto que implica en el ambiente, aumentando la factibilidad del reciclaje y la economía circular desde el diseño.	Los procesos de reciclaje de alto valor generan menores impactos ambientales que los procesos de reciclaje individual de los materiales.
Estrategias Economía Circular.	Reduce el impacto ambiental global, ya que el aumento de emisiones debido a los procesos de reciclaje requeridos es insignificante en comparación con el beneficio.	Reducción de emisiones del 17% gracias al reciclaje de células solares.

3.2. Economía circular y la participación de las comunidades en los procedimientos de cierre de parques solares

A continuación, se recopilan estrategias de economía circular de los residuos fotovoltaicos con enfoque en las 3R: reducir, reutilizar y reciclar [29].

3.2.1. Estrategias de economía circular asociadas a residuos fotovoltaicos

La industria fotovoltaica ha avanzado en la eficiencia y sostenibilidad de los paneles solares mediante la investigación y desarrollo (I+D). Aunque la composición básica de los paneles ha cambiado poco, se han logrado avances en la gestión eficiente de recursos y la disminución de materiales peligrosos tales como plomo, cadmio y selenio.

Se han explorado nuevas opciones, como capas de óxido conductor transparente utilizando compuestos más abundantes, como el óxido de estaño dopado con flúor, que reemplazan al óxido de indio y estaño. La optimización del vidrio, incluyendo composición, grosor y revestimientos antirreflejantes, busca aumentar la transmisión de los cristales frontales [30]. Además, se investigan celdas más delgadas que reducen la cantidad de silicio utilizado, adoptando diseños de celdas de contacto trasero para disminuir el uso de silicio y el consumo de energético en aproximadamente un 30%.

La plata, esencial en los paneles de silicio cristalino, representa un desafío en términos de consumo. Para reducir este consumo, se propone aumentar la eficiencia de las celdas mediante tecnologías como las celdas de contacto trasero o bifaciales, que requieren menos plata por panel. En conjunto, estos avances buscan optimizar los recursos y hacer que la industria fotovoltaica sea más sostenible [30].

Reparación de paneles fotovoltaicos (reutilización)

Los proyectos fotovoltaicos requieren un seguimiento y mantenimiento adecuado para garantizar su rendimiento óptimo. Sin embargo, a veces pueden surgir defectos en los paneles fotovoltaicos que afecten a su funcionamiento. En estos casos, los clientes pueden recurrir a las garantías ofrecidas por el socio contractual o el productor, siempre que sigan existiendo. Estas garantías pueden cubrir la reparación o sustitución de los paneles defectuosos, y pueden contar con el apoyo de las compañías de seguros. Cuando se devuelve un panel defectuoso, se debe realizar una prueba de calidad para determinar si se puede reutilizar o reciclar.

Algunas de las pruebas que se realizan son: Flash test list, Prueba de electroluminiscencia, Pruebas Hot Spots o de puntos calientes, con el fin de determinar si el panel se puede reparar, cambiar algunos componentes como el marco, la caja de conexiones, los diodos, los enchufes y las tomas de corriente. También se reemplazaría las celdas solares y se cambiarían las láminas de los paneles. Si el panel se puede reutilizar, se puede vender como usado a un precio inferior al de un panel nuevo. Si el panel ha terminado de funcionar, se puede desmontar y reutilizar tras evaluación técnica. Esto puede hacer que sea más fácil vender paneles usados y servicios de reparación [31]. Esta elección nos permite reciclar y usarlos en actividades domésticas o en procesos energéticos pequeños. Los paneles que no se puedan recuperar y/o aprovechar se entregarán a proveedores o su respectiva corporación regional donde se ubican.

Desmontaje y tratamiento de los paneles fotovoltaicos (reciclaje)

Los paneles solares fotovoltaicos tienen una vida útil limitada y requieren un adecuado tratamiento de sus residuos al final de su ciclo. Este proceso implica el desmontaje y la desarticulación de los componentes, así como su reciclaje o disposición final. Según el tipo

y el tamaño de los sistemas instalados, el manejo de los residuos fotovoltaicos puede representar una oportunidad económica y ambiental para el sector.

Para las instalaciones con un gran tamaño, el desmantelamiento, embalaje, transporte y reciclaje pueden realizarse de forma eficiente y rentable, separando los diferentes materiales: paneles, cables, componentes electrónicos, metales, residuos de construcción, etc. Estos materiales pueden enviarse a recicladores especializados o a vertederos autorizados [29]. A largo plazo, se podría impulsar la creación de plantas de reciclaje específicas para los paneles fotovoltaicos, lo que permitiría aumentar la capacidad de tratamiento y la calidad de los productos recuperados. Además, se podría optimizar la recuperación de elementos valiosos [31].

3.2.2. Cierre de parques solares con procesos de economía circular

Los proyectos de parques solares por lo general se pueden subdividir en dos componentes generales:

- Parques solares fotovoltaicos conectados directamente a una red de distribución.
- Corredor para el tendido de líneas de transmisión de la energía eléctrica generada en el parque solar.

Los componentes específicos se pueden describir de la siguiente manera:

Tabla 3. Componentes específicos de proyectos de parques solares.

Parque Solar	Corredor de Línea de Conexión Eléctrica
Paneles fotovoltaicos Estructuras de soporte Caja de agrupación Cableado (corriente continua y corriente alterna) Centro de transformación	Torres metálicas Fundaciones Crucetas Aisladores Conductores Cables de seguridad Corredor de conexión eléctrica

El estudio ambiental que se debe presentar a la autoridad competente para el proyecto, obra o actividad, debe incluir el "Plan de desmantelamiento y abandono", según lo dispuesto en el Artículo 2.2.2.3.9.2 del Decreto 1076-2015, en los ítems 4.1. Políticas e iniciativas nacionales, se explica detalladamente el proceso a seguir.

La autoridad ambiental debe inspeccionar el proyecto en un término de treinta (30) días y emitir una declaración de inicio de la fase mediante un acto administrativo. Este acto reconocerá las obligaciones satisfechas, establecerá el plan de desmantelamiento y abandono que garantice el cumplimiento de las obligaciones faltantes y las acciones de

restauración final. Al terminar esta fase, la autoridad ambiental competente debe, mediante un acto administrativo, dar por finalizada la Licencia Ambiental [32].

3.3. Propuesta de diagrama proceso de cierres de parques solares con enfoque de economía circular

A continuación, se presenta un esquema propuesto para el planteamiento de un proceso de cierre de parques solares con enfoque de economía circular, teniendo en cuenta las normativas ambientales y aprovechamientos de residuos en Colombia.

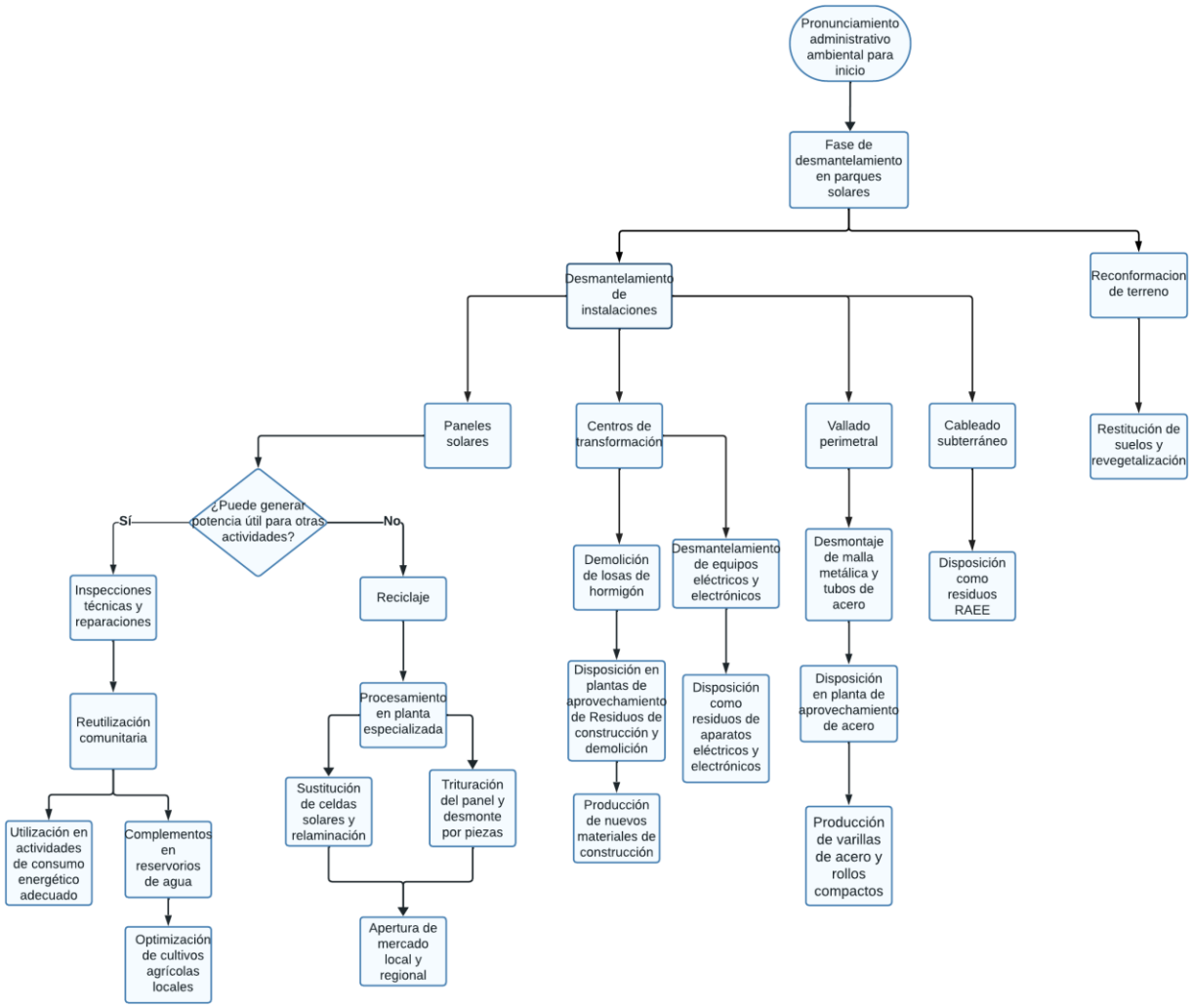


Figura 20. Propuesta de diagrama proceso de cierres de parques solares con enfoque de economía circular. Elaboración propia

4. POLÍTICAS E INICIATIVAS NACIONALES E INTERNACIONALES

Un cierre adecuado de parques solares implica la restauración del entorno natural y la gestión responsable de los residuos generados durante todo el proceso. Con el vertiginoso crecimiento de la industria de la energía solar, resulta fundamental establecer políticas a nivel nacional e internacional que regulen no solo la instalación y funcionamiento de estos parques, sino también los procedimientos asociados a su clausura y desmantelamiento.

Algunas de las políticas a nivel nacional e internacional que se deben tener en cuenta son:

- Licencias y permisos
- Normativas ambientales
- Rehabilitación de terrenos
- Acuerdos climáticos internacionales
- Gestión transfronteriza de residuos
- Directrices de organizaciones internacionales como lo es la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA).

Es importante tener en cuenta estas políticas para garantizar que los parques solares se construyan y operen de manera responsable y sostenible.

4.1. Políticas e iniciativas nacionales

En Colombia, es imperativo considerar la normativa técnica nacional que regula todos los proyectos dentro del sector energético. El Ministerio de Minas y Energía, como entidad vinculada al gobierno nacional, tiene la responsabilidad de supervisar, regular y orientar el uso de los recursos naturales en el país. La energía solar se clasifica como una Fuente no Convencional de Energía Renovable (FNCER) y está sujeta a la regulación de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). El propósito de esta normativa es asegurar el desarrollo sostenible de los proyectos energéticos, de acuerdo con los criterios establecidos por expertos competentes para el territorio nacional.

Por otro lado, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible tiene una política pública ambiental que sirve como guía para la planificación, conservación, prevención y gestión de los recursos naturales (Figura 21). Esta política surge de intereses, decisiones, acciones, acuerdos e instrumentos político-económicos y sociales desarrollados por el Gobierno Nacional. Su objetivo es prevenir o abordar las necesidades y problemáticas ambientales a nivel nacional, territorial y sectorial, con el fin de lograr la sostenibilidad ambiental [33].

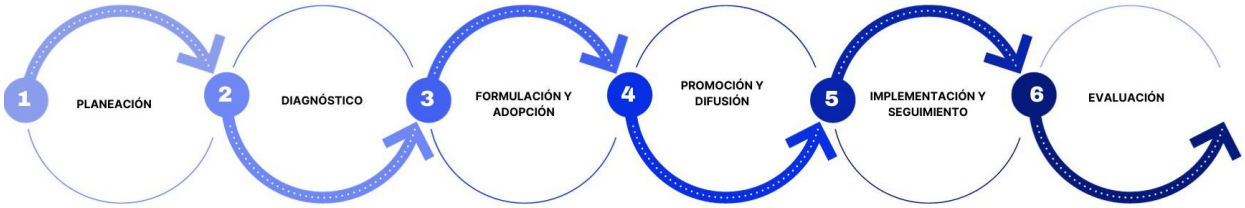


Figura 21. Fases de Políticas Públicas Ambientales [33].

Dada la naturaleza democrática del país, estas políticas se basan en un enfoque participativo e inclusivo durante las fases de formulación, implementación y cierre o abandono de los proyectos. En la Tabla 4 se presenta un marco normativo de la legislación colombiana aplicable al proceso de cierre de parques solares y los principales artículos a considerar en los procesos de cierre.

Tabla 4. Normatividad nacional aplicable al proceso de cierre de parques solares.

Norma	Descripción	Artículos Aplicables al Cierre de Parques Solares
Constitución Política de Colombia-1991	Deberes del estado en relación con el ambiente [34]	*Artículos 79 y 80*: Resaltan la importancia de la protección del ambiente y la naturaleza, así como la responsabilidad compartida entre el Estado y la sociedad para asegurar su preservación y un desarrollo sostenible. Por ley se debe garantizar la participación de las comunidades en todas las decisiones que le puedan afectar [34].
Ley 99 de 1993	Licenciamiento ambiental [35]	*Artículo 49 – Título VIII* (Modificado por el decreto 266 de 2000): Establece la obligatoriedad de la licencia ambiental para cualquier actividad o proyecto que pueda generar deterioro grave al medio ambiente. *Artículo 57 – Título VIII* (Modificado por el artículo 178 de la Ley 1753 de 2015): se establecen los elementos que debe contener un estudio de impacto ambiental [35].
Ley 1715 de 2014	Regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional [36].	*Artículo 19, numeral 5*: Define la responsabilidad del Gobierno Nacional a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) para establecer los estándares ambientales que los proyectos de energía solar deben cumplir. *Artículo 43:* Establece la armonización de requisitos ambientales para las fuentes no convencionales de energía (FNCE). El Gobierno, con el MADS, ANLA y otras entidades, establecerá métodos para evaluación ambiental y energética en proyectos. Diferenciará tipos de instalaciones y sus criterios generales. *Artículo 44:* En este artículo se establece que los límites de emisiones o vertidos para instalaciones de FNCE no pueden ser más estrictos que los de fuentes de energía convencionales menos exigentes [36].

Norma	Descripción	Artículos Aplicables al Cierre de Parques Solares
Ley 1672 de 2013	Establece los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) [37].	*Artículo 6:* Se establecen las obligaciones del gobierno nacional, del productor de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE), del comercializador, del usuario o consumidor y de los gestores [37].
Decreto 1076 de 2015	Expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Organiza y simplifica las disposiciones legales relacionadas con el medio ambiente y el desarrollo sostenible [32].	*Artículo 2.2.2.3.9.2:* se establecen lineamientos que deben cumplir las organizaciones para la fase de desmantelamiento y abandono de un proyecto. Es necesario entregar un estudio a la autoridad ambiental competente que incorpore impactos ambientales, plan de desmantelamiento, planos, obligaciones y costos. *Artículo 2.2.7A.2.1:* Se establece que las personas jurídicas o naturales que se dediquen a la fabricación o importación de (AEE), tendrán la calidad de productor, y por ende deben promover que los RAEE se incorporen en los ciclos productivos y económicos del país. *Artículo 2.2.7A.2.3:* El artículo establece obligaciones para usuarios de AEE: prevenir generación, separar adecuadamente, entregar a lugares designados, no desensamblar, seguir instrucciones y concientizar sobre gestión ambiental de RAEE. *Artículo 19:* Por el cual se prohíbe la disposición de RAEE en los rellenos sanitarios. La regulación es competencia del MADS [38].
Ley 2327 de 2023	Establece la definición de pasivo ambiental, se fijan lineamientos para su gestión y se dictan otras disposiciones [39].	*Artículo 2:* Establece la definición de pasivo ambiental. *Artículo 8:* Estipula que las autoridades ambientales, al identificar áreas con sospechas de pasivos ambientales, deben realizar estudios de riesgos preliminares.

Norma	Descripción	Artículos Aplicables al Cierre de Parques Solares
Ley 1252 de 2008	Normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones [40].	*Artículo 3:* Se establece que es un residuo peligroso.
Resolución 1257 de 2021	Modifica la Resolución 0472 de 2017 sobre la gestión integral de Residuos de Construcción y Demolición – RCD y se adoptan otras disposiciones [41].	Se establecen directrices para el aprovechamiento y disposición final de RCD, responsabilidades de los involucrados y metas de aprovechamiento según la categoría municipal. Esta norma es aplicable al proceso de demolición de las instalaciones construidas al interior de los parques solares.
Resolución 361 de 2011	Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Baterías Usadas Plomo Acido [42].	Precisa las obligaciones de los distribuidores y comercializadores de baterías de plomo ácido.
NTC 2883 de 2006	Requisitos para la calificación del diseño y la aprobación del tipo de módulos fotovoltaicos, que pueden ser de Silicio Monocristalino, policristalino o amorfo, para aplicación terrestre [43].	Define aspectos como materiales, instalación eléctrica, seguridad y pruebas necesarias para garantizar su eficiencia y durabilidad [44].
NTC 5464 de 2010	Requisitos para la calificación del diseño y la homologación de módulos fotovoltaicos de lámina delgada para uso terrestre [45].	Normativa aplicable para paneles o módulos solares de película delgada (Thin Film).
CONPES 3874 de 2016	Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos [46].	Establece la gestión integral de residuos sólidos como política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario, para contribuir al fomento de la economía circular, desarrollo sostenible, adaptación y mitigación al cambio climático.
CONPES 4075 de 2022	Política nacional de transición energética	Líneas estratégicas: investigación aplicada y formación de capital humano y transición laboral para trabajadores de la industria de la minería [47].
Resolución 851 de 2022	Gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y se dictan otras disposiciones	Artículo 12. De los sistemas de recolección y gestión de RAEE de uso industrial o profesional, Artículo 17. De la información a presentar para la aprobación del sistema.

Luego de sistematizar y analizar la normativa vigente se puede destacar que, en Colombia, si bien se han dado pasos importantes en la dirección de la sostenibilidad, existen áreas clave en las normativas actuales que requieren modificación y actualización para impulsar eficazmente la transición hacia un modelo más circular. En este sentido, se plantean diversas sugerencias y propuestas dirigidas a fortalecer la legislación en torno a la economía circular, buscando promover la reutilización, el reciclaje y la participación de las comunidades en procesos como el cierre de parques solares, con el objetivo de impulsar prácticas más sostenibles y beneficiosas para el país.

- En relación con la *Ley 1715 de 2014* es importante destacar que el Gobierno Nacional y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible no especifican cuáles serán los parámetros ambientales que deben ser cumplidos en los proyectos de integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, por ende, esta premisa puede ser aprovechada para aplicar normativas generales a estos proyectos con carácter diferencial que están en auge en tiempos de economía circular y transición energética.
- Respecto al *Decreto 1076 de 2015* es importante destacar que no se diferencia la metodología en relación con el tamaño de las instalaciones, se ignoran los efectos acumulativos y pasivos ambientales, que puedan generar estos proyectos. Hasta el momento no se ha establecido resolución para reducir los límites máximos permitidos en los vertederos de aguas residuales no domesticas para este sector.

En el decreto se omite la participación comunitaria dentro del proceso de cierre del proyecto licenciado, tampoco se incluye un instrumento de adaptación o de medición de los impactos ambientales acumulativos, sinérgicos o aquellos generados que se encuentren por fuera de los instrumentos ambientales que utilizó la empresa durante la construcción y operación del proyecto. La gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos para la etapa de cierre de parque solares es fundamental, puesto que se generan grandes cantidades de estos residuos.

En el contexto temporal y económico de Colombia, los proyectos de energía solar fotovoltaica son administrados por empresas que pueden calificar bajo ambas figuras: productor y generador de RAEE. Es responsabilidad del productor la incorporación de los residuos en los ciclos económicos y productivos del país, sin embargo, no se definen medidas de alto aprovechamiento para cada tipo de RAEE.

Estos deberes son aplicables de manera práctica a generadores de pequeñas cantidades de RAEE, por el contrario, en la etapa de cierre y desmantelamiento de parques solares la complejidad en el manejo de grandes volúmenes de estos residuos hace que se requieran nuevos deberes por parte de las empresas operadoras para garantizar una adecuada disposición de estos residuos.

- En la *Ley 2327 de 2023* se establece la definición de pasivo ambiental, pero esta deja por fuera riesgos o impactos sociales y culturales que puedan surgir durante los procesos de cierre. La identificación de pasivos ambientales podría ser complementada por la recolección de datos cualitativos y cuantitativos en las comunidades del área de influencia de los proyectos, de esta forma se potencializaría la participación comunitaria y la identificación de impactos que no están siendo mitigados en las medidas de manejo de los proyectos, además se amplía el espectro de información al recolectarse datos que por conflictos de interés entre las CAR y los privados no estén siendo reportados.
- Respecto a las *Resoluciones 1257 de 2021 y 362 de* 2011, se omite la gestión ambiental que deben realizar los grandes generadores de estos residuos, este vacío legal facilita que al interior de las empresas se acumulen estos residuos, además no se están contemplando los diferentes tipos de baterías que se utilizan en algunas aplicaciones solares FV off-grid. En el caso de estudio del corredor vida, los proyectos no utilizan baterías, pero existen muchos otros proyectos que las implementan.
- Con relación a las normas *NTC 2883 de 2006 y NTC 5464 de* 2010, se deberían actualizar estas normativas e incluir como requisito que estos productos incluyan etiquetado ambiental, de esta manera se incluiría desde el diseño el aprovechamiento de este.
- Respecto al *CONPES 3874 de 2016*, establece las siguientes acciones prioritarias para promover una economía circular en el país: (i) impulsar el aprovechamiento de los residuos generados en las diferentes regiones, mediante el desarrollo de sistemas integrados y eficientes; (ii) establecer normas y criterios para el manejo adecuado de los residuos en sectores clave como la construcción, la industria, el transporte, la alimentación y el embalaje. También instaura los principios de gestión diferencial en el manejo de residuos, análisis del ciclo de vida del producto, responsabilidad extendida del productor, así como la necesidad de proporcionar incentivos a los productores para incorporar las consideraciones ambientales en el diseño de sus productos (ecodiseño), sin embargo, no diferencia como sector clave de generación de residuos el de las energías renovables.
- El *CONPES 4075 de 2022* planifica el tema de transición energética, y dentro de su apartado de diagnóstico, identificó los siguientes aspectos de relevancia [47]: la legislación vigente establece criterios técnicos y legales para el manejo y la prevención de los cierres mineros, pero hay vacíos legales en temas de temporalidad y de garantías específicas en esta fase. Esto puede originar pasivos ambientales mineros (PAM), que son áreas afectadas por la actividad minera que requieren intervención. De acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), el país no tiene un inventario actualizado de los lugares con PAM, que sería la base principal para crear un marco regulatorio con enfoque preventivo y correctivo, fuentes de financiación estables y espacios de participación privada y ciudadana adecuados para afrontar los procesos de restauración y recuperación. Es importante resaltar que para el sector de las energías

renovables hasta el momento no existen documentos legales para el cierre de estos proyectos y por ende las implicaciones mencionadas en el caso del sector minero se pueden replicar para las energías renovables.

También establece como línea de acción la investigación aplicada y formación de capital humano para el despliegue de la transición energética, en este sentido el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) entre 2023 y 2028 diseñará programas de formación con enfoque para el trabajo y desarrollo humano, adicionalmente el Ministerio del Trabajo, con el respaldo del Ministerio de Minas y Energía y el Servicio Nacional de Aprendizaje, desarrollarán e implementarán en 2023 programas piloto de transición laboral para los trabajadores de la industria minera y petrolera que puedan ser afectados por el cambio de matriz energética. Estos programas buscarán reubicar a los trabajadores en los sectores de las energías renovables o el hidrógeno, aprovechando y actualizando sus competencias y facilitando una transición justa.

- La *Resolución 851 de 2022* establece las categorías de aparatos electrónicos como de consumo masivo, industrial y de uso propio. Si bien estas categorías requieren de una especificación detallada, agrupan los aparatos eléctricos y electrónicos en tres grandes grupos: I. Aparatos electrodomésticos, II. Aparatos de electrónica y equipos de telecomunicaciones y III. Maquinaria y equipo eléctrico.

En relación con *El artículo 17* establece que "El productor de AEE obligado a implementar un sistema de recolección y gestión de RAEE sujeto a aprobación por parte de la ANLA, deberá presentar información a través de la Ventanilla Integral de Trámites Ambientales en Línea (VITAL) y de conformidad con lo estipulado en el Artículo 2.2.7A.4.4. del Decreto 1076 de 2015". En cambio, el *Artículo 12* establece lo siguiente[48]: "De los sistemas de recolección y gestión de RAEE de uso industrial o profesional. Los productores de los AEE de uso industrial o profesional indicados con la letra "I" de la lista del Anexo 1 de la presente resolución deben implementar un sistema de recolección y gestión de RAEE, el cual no estará sujeto a evaluación, aprobación y seguimiento por parte de la ANLA, sin perjuicio de que las obligaciones a su cargo que incumpla puedan ser objeto de la imposición de medidas preventivas o sancionatorias a que haya lugar, de conformidad con lo dispuesto en la Ley 1333 de 2009".

Esta imposición ofrece una liberalidad en la gestión de los residuos al sector industrial que está implementando de forma masiva aparatos eléctricos y electrónicos dentro de la categoría mencionada, resalta la necesidad de definir el termino de productor, debido a que la ausencia de este concepto puede generar confusiones en la aplicación de la resolución y evaluar la eficiencia y necesidad de recopilar datos de flujo de residuos aún en el sector industrial, además no se observa una categoría que incluya los paneles solares, por ende la gestión de estos elementos no queda completamente clara.

Respecto al marco de políticas de planificación, el país cuenta con la política para la gestión sostenible del suelo, Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, Estrategia Nacional de Economía Circular, Planes de Ordenamiento Territorial y la Política nacional para la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) en la cual se establecen como líneas de acción[49]: Diseño e implementación del Registro Nacional de Productores y Comercializadores de AEE permanentes o esporádicos como una de las principales herramientas de seguimiento y control de la gestión integral de RAEE, Realización de estudios y proyectos piloto con el sector informal (recolector y recuperador) de RAEE, para evaluar la pertinencia o las oportunidades de involucramiento en la cadena de gestión de los RAEE, Transferencia tecnológica y desarrollo de infraestructura ambientalmente segura para el aprovechamiento de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) .

En relación con la política para la gestión sostenible del suelo no se especifican las directrices y guías metodológicas sobre restauración, recuperación y rehabilitación de suelos que deban aplicar los proyectos durante y al final su ciclo de vida, por ende, las obras de rehabilitación de suelos que inicialmente contempló la empresa privada dentro de su licencia ambiental son de libre selección, de esta manera no se puede asegurar que el suelo sea compensado en la medida que fue afectado.

El Plan nacional de desarrollo "Colombia potencia mundial de la vida" establece ejes que se relacionan con los proyectos de parques solares para los cuales vale la pena resaltar: el agua y las personas como centro del ordenamiento territorial, gestión de residuos y transición energética segura, confiable y eficiente. El primer eje direccionador busca modificar la *ley 388 de 1997 artículo 10* relacionada con el ordenamiento del territorio [50], desarrollar y potencializar la economía circular como enfoque direccionador para gestionar los residuos, esto supone la necesidad de realizar cambio en los ciclos de vida de productos y aumentar las aplicaciones directas de aprovechamiento, como es el caso de los paneles solares. La RAEE y la Estrategia Nacional de Economía Circular deben analizarse mediante mesas técnicas integradas por autoridades ambientales, ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, empresas de diferentes sectores productivos, sector educativo, entre otros actores; y construir los instrumentos políticos que permitan realizar a escala y por sectores la implementación de estas estrategias.

Un aspecto común de la normativa vigente hasta ahora es la falta de herramientas políticas de intervención directa en estos asuntos. Además, no hay datos sistematizados sobre flujos de residuos que no se incluyen en el servicio público de limpieza. La información sobre el aprovechamiento es limitada debido a la informalidad del mercado y la falta de mecanismos de recopilación de datos por parte de las autoridades responsables.

En conclusión, la ausencia de políticas, código y resoluciones aplicadas específicamente al sector de las energías renovables, hace que se omitan aspectos como: identificación de impactos ambientales por sector diferencial, falta de rigurosidad en los planes de cierre y abandono, pasivos ambientales sin identificar, grandes volúmenes de residuos de aparatos electrónicos, ausencia de participación comunitaria en los procesos de cierre y todo en el marco de la transición energética y economía circular de Colombia.

Considerando el panorama anterior y las diferentes propuestas abordadas, en la Figura 22 se propone un resumen de las principales recomendaciones para actualizar la normativa legal aplicable al cierre de parques solares en Colombia.

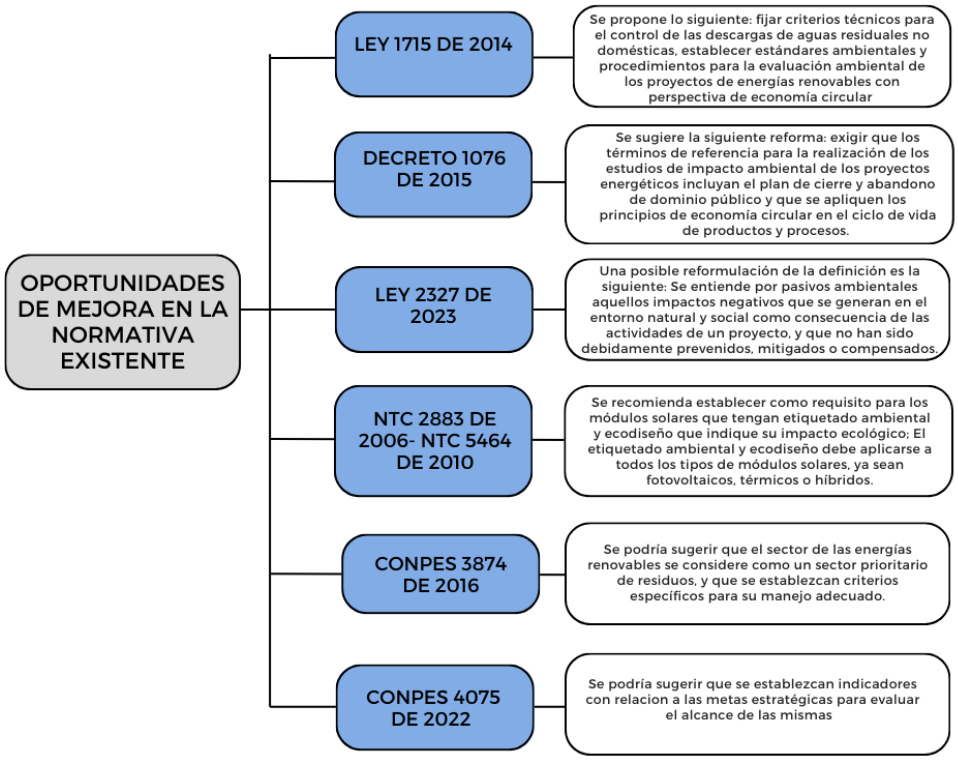


Figura 22. Cuadro sinóptico de recomendaciones en normativa.

4.2. Políticas e iniciativas internacionales

La economía circular, centrada en minimizar el desperdicio y optimizar el uso de recursos, ha emergido como un enfoque fundamental para abordar los desafíos ambientales y promover la sostenibilidad a nivel mundial. Algunas de las normas ISO enfocadas hacia el desarrollo y estandarización de procesos enfocados en la economía son las ISO 14040, Análisis de ciclo de vida, la cual plantea la regulación de la metodología de evaluación ambiental de análisis de ciclo de vida de un producto, analizando y cuantificando los

aspectos ambientales e impactos potenciales de un producto, bien o servicio a lo largo de su ciclo de vida.

A su vez también existe otros estándares ISO direccionados a esta rama, como lo es la serie ISO 59000, que se trata de una guía normativa que busca estandarizar la implementación de los principios de economía circular, desarrollando marcos, requisitos, guías y herramientas de apoyo para la implementación de actividades en organizaciones y modelos de negocio, maximizando la contribución al desarrollo sostenible.

Esta serie de normas ISO se encuentra en fase de desarrollo, en el cual ya están disponibles y en fase de votación los primeros borradores, que se muestran a continuación.

- *ISO59004:* Economía Circular "Terminología, principios y orientación para la implementación". Establece principios de la economía circular y las pautas para la implementación de actividades por parte de todas las organizaciones involucradas, a su vez da a conocer conocimientos profundos de los ciclos técnicos y biológicos, a lo largo de la cadena de valor, logística inversa, extensión de la vida útil del producto y gestión de los recursos. Se dirige a organizaciones del ámbito privado o público, que operen de manera individual o en colaboración, sin importar su categoría o tamaño, y que se encuentren en diversas jurisdicciones o posiciones dentro de una cadena de valor o red de valor específica.
- ISO59010: Economía Circular "Directrices sobre la transición de modelos de negocio y redes de valor". Consiste en el planteamiento de esquemas en la gestión de organizaciones para transformar los modelos de negocio lineal y cadenas de valor en estrategias circulares, aumentando los beneficios sociales, ambientales y económicos. Es aplicable a toda organización involucrada en la oferta de productos o servicios, sin importar su dimensión, sector geográfico o área de especialización.
- ISO59020: Economía Circular "Medición y evaluación de la circularidad". Marco para monitorear y analizar la eficacia de las acciones circulares empleadas por organizaciones públicas y privadas, de forma que las organizaciones tengan la recopilación de la información necesaria para implementar prácticas económicas circulares que minimicen el uso de recursos y/o permitan un flujo circular de recursos contribuyendo al desarrollo sostenible.

Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL, en el informe Economía Circular en América Latina y el Caribe se menciona que a nivel mundial existe una creciente cantidad de políticas, planes y programas que buscan impulsar la transición hacia una economía circular. Sin embargo, solo el 8,6% de la economía mundial es circular, según el informe The Circularity Gap Report 2020 [51].

Según el estudio comparativo que incluía países de la Unión Europea, además de otros 24 países alrededor del mundo, se encontró que solo 17 de estos países contaban con políticas que presentan planes detallados y específicos para abordar la transición hacia una economía circular, en los cuales, solo 7 de ellos, contaban con una legislación vinculante en materia de economía circular. Con el objetivo de efectuar el análisis de las políticas internacionales para la gestión del cierre de parques fotovoltaicos, se decidió analizar de estos 7 países, aquellos que tienen proyectos en dicho sector de generación energética, específicamente proyectos de parques solares fotovoltaicos, dando a conocer de esta forma la dinámica entre las políticas y leyes sobre economía circular de estos países y la gestión de los residuos durante la etapa de cierre de estos proyectos, el cual se representa en la Tabla 5.

Tabla 5. Marco normativo internacional.

País	Norma		Descripción
China	Ley de promoción de la economía.	GB/T 38.785-2020	Requisitos técnicos generales de reciclado de módulos fotovoltaicos de capa fina para uso de construcción.
		GB/T 39753-2021	Requisitos técnicos generales de reciclado de módulos fotovoltaicos.
Francia	Ley N° 2020-105 del 10 de febrero de 2020.		Ley francesa contra los residuos.
	Decreto N° 2014-928		Requisitos técnicos generales de reciclado de módulos fotovoltaicos.
Alemania	Ley alemana de envases- verpackg		Crear una agencia central para registrarse e informar sobre los envases que llegarán al mercado alemán.
Japón	Ley básica para el establecimiento de una sociedad circular.		Promueve la circularidad en las acciones de los gobiernos, las empresas y la ciudadanía, enfocando el aprovechamiento efectivo de los materiales reciclables.
	Ley N° 137 de 1970		Ley de Tratamiento y Limpieza de Residuos.
Estados Unidos	Ley RCRA		Reciclaje de paneles solares.
Chile	Ley núm. 20920- 2016 Hoja de Ruta para un Chile Circular al 2040-2020		Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje.
República Dominicana	Ley general de gestión integral y coprocesamiento de residuos sólidos núm. 225-20 (2020) Decreto 253-23		Fomenta la reducción, reutilización, reciclaje, aprovechamiento y valorización de residuos. Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos en el Marco de la

		Responsabilidad Extendida del Productor
Brasil	Ley núm. 12305-2010 PL 3.784/2023	Política Nacional de Gestión de Residuos Proyecto de ley sobre reciclaje de paneles solare

- Caso de estudio de China

Ley de promoción de la economía

La economía circular fue adoptada como estrategia de desarrollo en China desde el año 2002, lo que convierte a este país en uno de los primeros en implementar políticas relacionadas con este enfoque, posteriormente en el año 2008 el estado promulgó una de las primeras legislaciones sobre economía circular en el mundo, *Ley de Promoción de la Economía*, con el objetivo de mejorar las tasas de utilización de los recursos de forma ambientalmente sostenible, enfocándose en la reducción, la reutilización y el reciclaje, principalmente, en un contexto industrial. A grandes rasgos esta ley obliga a las empresas a reducir el consumo de recursos y la producción de residuos, con el fin de aumentar y desarrollar las sinergias entre distintos actores de la industria, ofreciendo además preferencias fiscales a las actividades industriales que promuevan el desarrollo de una economía circular en forma de garantizar el correcto cumplimiento de estas medidas, además de crear fondos especialmente para el desarrollo de la economía circular, incentivando la investigación, la ciencia y tecnología relacionadas con el tema.

Otra estrategia implementada por la ley es el desarrollo de la simbiosis industrial, la cual establece la optimización de las composiciones industriales locales, con el fin de maximizar la cooperación mutua para la recuperación de recursos, explorando sinergias a varios niveles, esto mediante la elaboración de planes generales sobre la distribución geográfica de los diferentes sectores de la economía en las regiones que compone el estado, reajustando razonablemente la estructura industrial, del tal forma que las empresas cooperen en áreas tales como la utilización integral de los recursos a fin de realizar la utilización eficiente y el reciclaje de los recursos.

GBLT 38.785-2020. Requisitos técnicos generales de reciclado de módulos fotovoltaicos de capa fina para uso de construcción [52].

Esta norma establece pautas completas para garantizar un manejo ambientalmente responsable de los módulos fotovoltaicos de capa fina, desde la recolección inicial hasta el tratamiento y la eliminación de residuos, en la misma se ve aplicado el concepto de simbiosis industrial establecido en *Ley de promoción de la economía.* Vale la pena resaltar que la norma es administrada por el TC255 "Comité técnico nacional de normalización

del vidrio para la construcción", implementada por el TC255SC1 "Subdivisión de vidrio aislado solar fotovoltaico del comité técnico nacional de normalización de vidrio para la construcción"; lo cual denota un sector industrial desarrollado alrededor de los residuos que se generan en los parques solares.

GB/T 39753-2021. Requisitos técnicos generales de reciclado de módulos fotovoltaicos

Esta norma establece los requisitos generales para la recolección, transporte, almacenamiento, desmantelamiento, eliminación, reciclaje y aprovechamiento de módulos fotovoltaicos para su reciclaje y reutilización [53]. Aplica al reciclaje y la reutilización de módulos fotovoltaicos, incluyendo los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino, los módulos fotovoltaicos de seleniuro de cobre, indio y galio, los módulos fotovoltaicos de película delgada de silicio y los módulos fotovoltaicos de telurio de cadmio.

Instaura las condiciones técnicas y la metodología para la gestión de los materiales: semiconductores y metálicos, los cuales deben cumplir con los requisitos nacionales de calidad de productos metálicos pertinentes y ordena dar prioridad a la reutilización de piezas y componentes de módulos fotovoltaicos de desecho de conformidad con las normas pertinentes antes de su eliminación.

- Caso de estudio de Francia

La empresa "Soren", antiguamente denominada PV Cycle, es la que garantiza el tratamiento de los paneles solares fotovoltaicos al final de su vida útil, independientemente del estado de los paneles, de su marca o de su antigüedad. Esta eco-organización sin fines de lucro recolecta, procesa y luego recicla los materiales para reutilizarlos hasta en un 94%. La empresa SOREN está acompañada por tres actores en los procesos de reciclaje de paneles solares: Galloo , ENVIE 2E Aquitaine y ENVIE 2E Midi-Pyrénées [54].

Ley N° 2020-105: Ley francesa contra los residuos

El Gobierno francés promulgó la ley denominada Ley francesa contra los residuos, la cual comprende 130 artículos que modifican y complementan los marcos legales preexistentes, principalmente, en el Código Ambiental del país [55].

Esta ley tiene varios aspectos importantes que contribuyen a la protección del medio ambiente y la economía circular. Por un lado, se prohíbe la destrucción o el desecho de los productos no vendidos, y se obliga a darles un uso adecuado mediante la reutilización, el reciclaje o la donación, además se crean índices de reparabilidad y durabilidad de los productos, para incentivar el consumo responsable y el alargamiento de la vida útil de los bienes. Finalmente, se establece la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) para

22 sectores industriales, lo que implica que los fabricantes y productores deben diseñar productos más sostenibles y hacerse cargo de la gestión de los residuos que generan al final de su ciclo de vida.

"Los operadores de gestión de residuos sólo pueden gestionar residuos de aparatos eléctricos y electrónicos si tienen contratos celebrados para la gestión de estos residuos con eco-organizaciones aprobadas o con sistemas individuales establecidos por las personas" [55]. Dado que es una ley reciente y que muchos de sus artículos apuntan a cambios a medio y largo plazo, aún está por ver el alcance total de la aplicación de la Ley Anti-Desperdicio. No obstante, el ambicioso alcance de esta legislación la convierte en una ley de economía circular que merece la pena considerar en detalle [56].

Decreto N° 2014-928. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos y a los aparatos eléctricos y electrónicos usados

Esta norma transpone al derecho francés la legislación europea sobre gestión de residuos, que se fundamenta principalmente en la Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE, la Directiva 2011/65/CE sobre requisitos de diseño ecológico para productos relacionados con la energía, la Directiva 2002/95/CE conocida como RoHS que restringe el uso de ciertas sustancias peligrosas en equipos eléctricos y electrónicos, y la directiva 2002/96/CE conocida como RAEE "Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos" (o D3E) que regula los residuos de equipos eléctricos y electrónicos [54].

De manera particular establece que: "Se sancionará con la multa prevista para las infracciones de quinta clase, a un productor o a un agente de un productor establecido en otro Estado miembro por":[57]

- Comercializar aparatos eléctricos y electrónicos sin haber contribuido a la recogida selectiva de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos domésticos en las condiciones previstas en el artículo R. 543-181.
- No retirar o hacer retirar, tratar o hacer tratar residuos de aparatos domésticos eléctricos y electrónicos de conformidad con el artículo R. 543-188.
- No realizar o hacer realizar el tratamiento de los componentes mencionados en el artículo R. 543-200.
- No prestar garantía, por no haber pagado por adelantado su contribución a una eco-organización autorizada de conformidad con el artículo R. 543-193.
- No retirar ni hacer retirar, tratar o hacer tratar residuos de aparatos eléctricos y electrónicos profesionales de conformidad con el artículo R. 543-195.

- Caso de estudio de Alemania

La ley alemana de envases VerpackG

Esta ley, vigente desde el 1 de enero de 2019, establece las condiciones para el envasado de los productos en Alemania, promoviendo la reutilización y el reciclaje de los envases. De acuerdo con esta norma, todos los envases que se entregan al consumidor final ya sean de uso comerciales, de transporte, reutilizables, de bebidas desechables o de sustancias peligrosas, deben inscribirse en el Registro Central de Envases (Zentrale Stelle Verpackungsregister, ZSVR) para su seguimiento y control [58].

La Ley Alemana de Envases comparte la responsabilidad social y medioambiental de los envases en toda la cadena de suministro, orientándose a promover los envases ecológicos, mediante la implementación de tasas de participación a través de un sistema central de registro de envases, consiste en un "sistema dual" en los cuales participan los fabricantes y los distribuidores, donde estos actores deben seguir unos índices mínimos de recuperación e informar sobre los materiales y la masa de sus envases, asegurando que esta información sea de dominio público. También, se especifican las multas por incumplimiento, que pueden alcanzar valores bastante significativos.

Ley alemana de aparatos eléctricos y electrónicos ElektroG

Esta normativa establece las obligaciones de los fabricantes y distribuidores de aparatos eléctricos y electrónicos que se venden en el mercado alemán, con el fin de evitar la generación de residuos y fomentar prácticas como el reciclado y la reutilización. La normativa también regula los sistemas de recogida y tratamiento de estos aparatos, así como los requisitos de etiquetado de los productos e información al consumidor [59].

La legislación define de manera amplia la categoría de aparatos eléctricos y electrónicos, abarcando todos aquellos dispositivos que operan haciendo uso de corriente eléctrica. Esta inclusión no se limita únicamente a los productos finales, sino que se extiende a los componentes empleados en la generación, transporte y medición de electricidad [59]. De este modo, la normativa adopta un enfoque integral al considerar tanto los dispositivos en sí mismos como los elementos esenciales para su funcionamiento.

Ley alemana de baterías BattG

Es la ley que regula el manejo ecológico de las baterías y acumuladores en Alemania. Según esta ley, los fabricantes y vendedores de estos aparatos tienen la obligación de asegurar la correcta recolección, reciclaje y eliminación de las baterías cuando ya no estén en funcionamiento [60]. Con este método se pretende reducir los efectos ambientales negativos que se producen al desechar las baterías de forma incorrecta y fomentar el uso responsable de las mismas durante su vida útil.

Según la BattG, los productores tienen que cumplir con ciertos requisitos de registrar sus productos ante la fundación Stiftung Ear y etiquetarlos correctamente, lo que permite la trazabilidad y gestión eficaz en el mercado [60]. Asimismo, la ley fija metas específicas de reciclaje y recuperación, fomentando el aprovechamiento de materiales y la disminución de residuos.

- Caso de estudio de Japón

Ley básica para el establecimiento de una sociedad circular.

El país asiático sentó las bases de la economía circular en el año 2000 con la Ley Básica para el Establecimiento de una Sociedad Circular, la cual promueve la circularidad en las prácticas de los gobiernos, las empresas y la ciudadanía, destacando el desarrollo del reciclaje, a través del diseño, el etiquetado, la clasificación y el uso efectivo de los materiales reciclables.

Esta ley establece el concepto de "recursos circulantes" para impulsar la economía circular, fomentando la reutilización óptima y reduciendo el consumo de materias primas. Así, se establece una jerarquía de uso de los recursos, donde solo se deben recuperar los que no se pueden reutilizar y solo se deben desechar los que no se pueden recuperar. Además, se enfatiza la responsabilidad directa de las empresas para implementar estos principios en todo el ciclo de vida de sus productos y en la gestión de todos sus recursos en general.

La misma fuente expone que este país demuestra un compromiso coherente y a largo plazo con la economía circular, pues esta política se revisa cada cinco años y se amplía gradualmente en varias leyes complementarias más específicas, esto permite un análisis más profundo de su implementación [56].

Ley N° 137 de 1970. Ley de Tratamiento y Limpieza de Residuos

La protección del medio ambiente y la salud pública es el objetivo de esta ley, que regula la gestión de los desechos desde su origen hasta su destino final. La ley establece los principios y las normas para prevenir, reducir, separar, almacenar, recoger, transportar, reciclar y eliminar los desechos de forma adecuada, así como para limpiar el medio ambiente de los desechos existentes; entre los cuales vale la pena destacar:

Artículo 3:

> "Los empresarios deberán eliminar adecuadamente, bajo su propia responsabilidad, los residuos generados en relación con sus actividades comerciales".

- Caso de estudio de Estados unidos

La Ley de Conservación y Recuperación de Recursos es la única norma federal que regula la manipulación de residuos peligrosos. También se sigue la normativa federal de la RCRA. Los gobiernos estatales y locales pueden tener su propio conjunto de reglas para gestionar los residuos FV, como programas específicos de reciclaje y prohibiciones de eliminación de vertederos.

- Caso de estudio de Chile

Ley núm. 20920- 2016

El *Artículo 10* reconoce que para definir las categorías y subcategorías de residuos deberá considerarse la efectividad del instrumento para la gestión del residuo, su volumen, peligrosidad, potencial de valorización o el carácter de domiciliario o no domiciliario del residuo, también designa en el *artículo 12 y 13* la posibilidad de establecer en decretos supremos metas de recolección y valorización las cuales podrán designarse en base a consideraciones demográficas, geográficas y de conectividad y las obligaciones asociadas con el fin de conseguir el cumplimiento de las metas.

Hoja de ruta para un chile circular al 2040
Esta política de planificación tiene los siguientes principios dentro de su enfoque de innovación circular: empresas cero residuos, promoción de modelos circulares, investigación y desarrollo para la economía circular, colaboración estratégica para soluciones de economía circular de alto impacto, escalamiento de soluciones circulares de alto potencial, sistemas de información para la modelación del impacto ambiental local de bienes y servicios, normas técnicas para la economía circular y compras públicas circulares.

- Caso de estudio de República dominicana

Ley general de gestión integral y coprocesamiento de residuos sólidos núm. 225-20 (2020)

Esta ley tiene como finalidad prevenir la producción de residuos sólidos y regular su manejo integral, incentivando la reducción, reutilización, reciclaje, aprovechamiento y valorización de estos. Para ello, se basa en 16 principios que incluyen: la responsabilidad compartida, la disminución de la generación, la participación ciudadana, la sostenibilidad financiera, la promoción de mercados verdes, la jerarquía de la gestión de los residuos, entre otros.

Además, se crea una tasa especial para la gestión de residuos que se aplica a toda persona jurídica, entidad e institución pública, con el objetivo de generar un fondo para reducir los impactos negativos de la actual disposición de residuos y establecer un sistema

integral de gestión de estos. Esta tasa se ajusta a los ingresos correspondientes al ejercicio fiscal.

Decreto 253-23

Establece las obligaciones de los diferentes actores que participan en el manejo adecuado de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), de acuerdo con la Ley General de Gestión Integral y Coprocesamiento de Residuos Sólidos (núm. 225-20). La Responsabilidad Extendida (REP) consiste en que los productores, importadores y comercializadores se hagan cargo de los AEE durante todo su ciclo de vida, incluyendo las etapas posteriores a la producción y al consumo, lo que implica asumir los costos de reutilización, recolección, transporte, recuperación, valorización, aprovechamiento, tratamiento y disposición final de los RAEE.

Es responsabilidad del ministerio de medio ambiente y recursos naturales: evaluar y aprobar los planes de manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos presentados por los productores, bien sea de manera individual o colectiva en sistemas de gestión [61].

- Caso de estudio de Brasil

Ley núm. 12305-2010

La Política Nacional de Gestión de Residuos en Brasil es una ley que busca garantizar una gestión adecuada de los residuos sólidos, considerando su impacto ambiental, social y económico. La ley establece los principios, objetivos, instrumentos y lineamientos que orientan la gestión integrada de los residuos sólidos, desde su generación hasta su disposición final. Entre los principios que rigen la ley se encuentran el desarrollo sostenible; la ecoeficiencia, minimizando el uso de recursos naturales y la generación de residuos; el reconocimiento de los residuos sólidos reciclables como un recurso valioso para la sociedad y la economía; la responsabilidad compartida por el ciclo de vida del producto, involucrando a todos los actores de la cadena productiva y de consumo; y el eco-etiquetado y consumo sostenible, promoviendo la información y la educación ambiental.

PL 3.784/2023

Este proyecto de ley pretende obligar a los fabricantes, importadores, distribuidores y comerciantes de paneles solares fotovoltaicos a estructurar e implementar sistemas de logística inversa. La propuesta pretende incluir un ítem sobre paneles solares en la Ley 12.305, de 2010, que establece la Política Nacional de Residuos Sólidos [62].

La necesidad de regular la logística inversa de los paneles solares fotovoltaicos surge de la falta de claridad en la normativa vigente. El Decreto No. 10.240, de 2020, que establece los criterios para la gestión de los residuos eléctricos y electrónicos, no incluye a estos paneles en su definición. Sin embargo, la Ley nº 12.305, de 2010, que instituye la Política Nacional de Residuos Sólidos, sí los contempla como sujetos a esta obligación. Esta situación genera inseguridad jurídica y dificulta el cumplimiento de la ley.

4.3. Aspectos relevantes para posibles aplicaciones

Después de revisar las normativas colombianas e internacionales en los países mencionados anteriormente relacionadas el cierre de parques solares, destacan aspectos para su posible aplicación:

- Fondo para el manejo de residuos.
- Empresas de alto nivel de reciclaje enfocadas en aprovechar los residuos de módulos fotovoltaicos con simbiosis de otros residuos.
- Celebración de contratos para la gestión de residuos de parques solares.
- Caracterización de los residuos que se generan en los parques solares.
- Definir los impactos ambientales de los parques de forma diferencial por sus áreas de influencia directa e indirecta.
- Políticas de control directo que establezcan multas y metodologías puntuales para la disposición de residuos de aparatos electrónicos.
- Costos por tazas de generación de residuos, esto permitiría obligar a las empresas a disminuir las cantidades.

Es importante resaltar que no se encontraron experiencias de cierre de parques fotovoltaicos y en las legislaciones se identificó la ausencia de directrices puntuales que orienten a las empresas en la metodología para desarrollar su etapa de cierre, sin embargo, Japón a través de la prefectura de Fukuoka ha desarrollado un "Sistema inteligente de recogida de residuos de paneles solares" para el reciclaje de paneles solares, que se ha convertido en un modelo a nivel nacional.

Colombia atraviesa en la actualidad una etapa de auge en el sector de la energía fotovoltaica y puede desarrollar los instrumentos políticos para planificar de manera técnica, ambiental, social y económica del cierre de proyectos de energía fotovoltaica.

5. PROCEDIMIENTOS Y EXPERIENCIAS EN PROCESOS DE CIERRE

5.1. Información primaria de las comunidades del corredor vida César-Magdalena

En el marco del proyecto de investigación sobre el impacto social y ambiental de las actividades empresariales en las zonas rurales de Colombia, se realizaron encuentros con las comunidades locales que han sufrido las consecuencias de la presencia de empresas extractivas, agroindustriales y de infraestructura en sus territorios. El objetivo de estas actividades fue recoger los testimonios y las propuestas de los habitantes de los corregimientos y pueblos afectados, así como generar espacios de diálogo y reflexión sobre las alternativas de desarrollo sostenible. Estas experiencias fueron fundamentales para el análisis y la sistematización de los resultados del estudio, y para la elaboración de recomendaciones dirigidas a los actores involucrados en la problemática.

Se realizó un estudio en tres zonas diferentes, La Loma (Cesar), Ciénaga y Fundación, ambos municipios del departamento del Magdalena. Durante este proceso los encuestados de distintos géneros y distintas edades contaron sus experiencias relacionadas con la economía circular asociada con los procesos de operación y futuro cierre de parques solares del corredor vida César-Magdalena. Se evaluaron sus conocimientos y habilidades sobre el reciclaje y la reutilización de residuos. El propósito del estudio fue analizar las prácticas ambientales incorporadas en la vida cotidiana de los participantes. Los resultados revelaron una conciencia generalizada sobre la relevancia del reciclaje y la reutilización; sin embargo, también se evidenciaron obstáculos y limitaciones que dificultan su implementación efectiva.

Para llevar a cabo esta investigación, se solicitó a los encuestados firmar un consentimiento informado, garantizando el respeto por los derechos y la dignidad de los participantes, así como la confidencialidad y el anonimato de sus datos personales (Ver Anexo 1).

Este grupo de participantes de La Loma (Cesar), Ciénaga y Fundación respondieron una encuesta estructurada con 5 preguntas, 4 mixtas y una cerrada, cada una de ellas enfocadas a los siguientes objetivos:

1. Identificar habilidades técnicas en la comunidad
2. Tener conocimientos básicos sobre economía circular
3. Reconocer infraestructura que podría ser complementada por paneles solares
4. Identificar si en la comunidad conocen de la existencia de programas educativos sobre energías renovables
5. Realizar prácticas de reciclaje y reutilización de residuos

La forma de aplicación de esta encuesta fue de manera presencial, entregándoles a los 62 participantes el documento (ver Anexo 2).

La Loma (Cesar):

- 16 personas de género femenino, líderes comunitarias de la Red de Mujeres del municipio del Paso.
- 4 personas de género masculino, líderes comunitarios.
- 1 persona de otro género, líder activista social de los derechos humanos LGTBIQ+, presidente de la fundación diversa de vida y consejera de paz municipal de la población LGTBIQ+.

Fundación (Magdalena):

- 11 personas de género femenino
- 10 personas de género masculino

Se destaca que la mayoría de estas personas desempeñaron su labor en el Parque fotovoltaico Nabusimake.

Ciénaga (Magdalena):

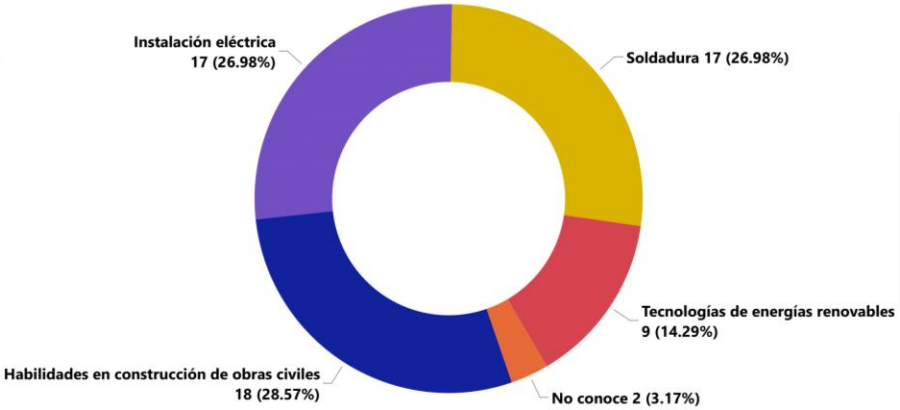
- 11 de género femenino
- 9 de género masculino

Los encuestados son agricultores y personas vinculadas al parque solar Caimán Cienaguero, especialmente del sector de La Helena.

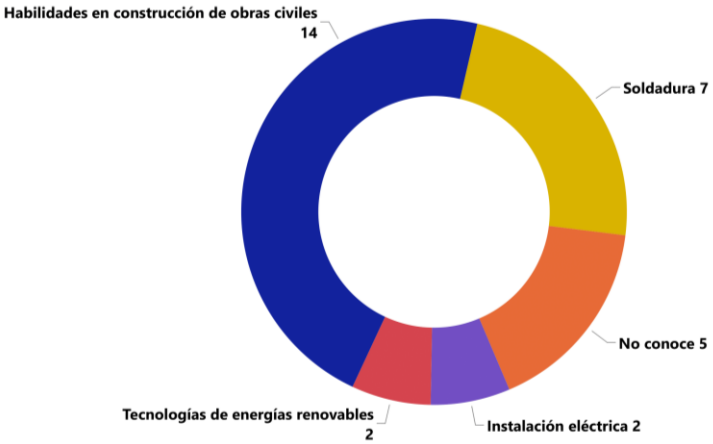
A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la realización de la encuesta mencionada en el corregimiento de la Loma (Cesar) y los municipios de Fundación y Ciénaga ambos del departamento del Magdalena.

La Figura 23 ilustra la diversidad de talentos que existen en las comunidades de los tres territorios, donde las personas han desarrollado competencias en áreas técnicas y tecnológicas, ya sea de forma autodidacta o mediante programas educativos.

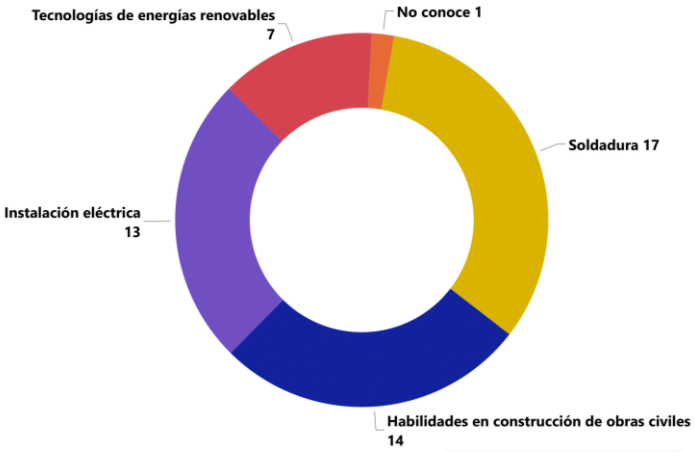
En los territorios de la Loma y Ciénaga, se destacan las habilidades en construcción de obras civiles, seguidas por soldadura, instalación eléctrica y tecnología de energías renovables. En Fundación, la habilidad técnica más sobresaliente es la Soldadura, seguida por construcción de obras civiles, instalación eléctrica y tecnología de energías renovables.



(a)



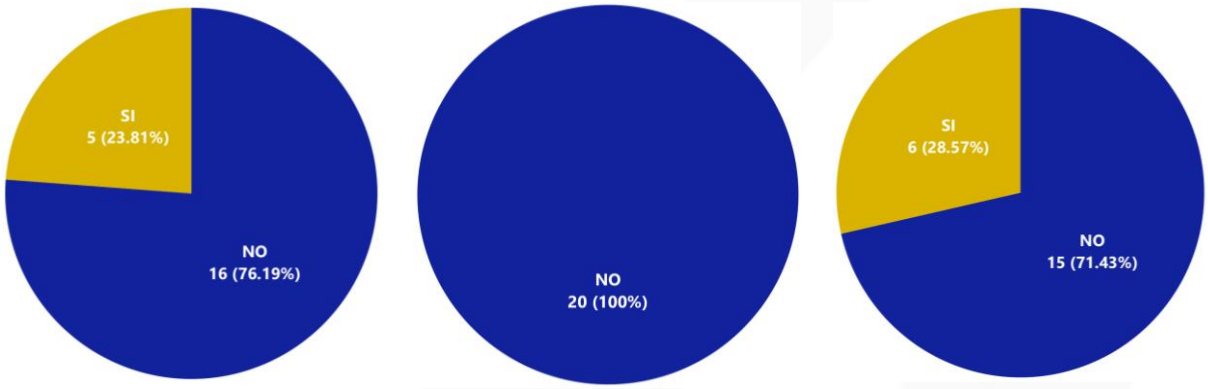
(b)



(c)

Figura 23. Habilidades comunitarias. a) La Loma; b) Ciénaga; c) Fundación.

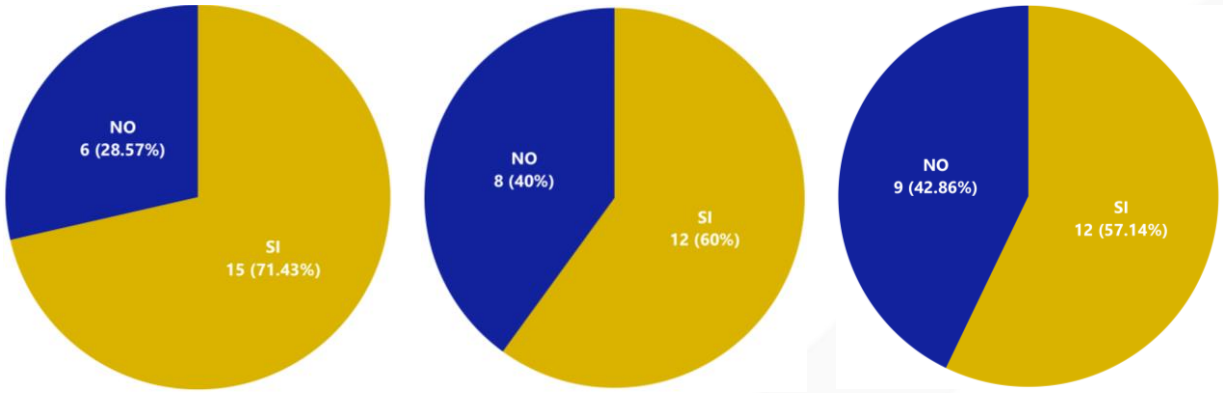
Los resultados tabulados en la Figura 24, muestra más del 70% en respuestas negativas indicando que la mayoría de las personas encuestadas no están familiarizadas con el término de "Economía circular". Esto sugiere una falta de conocimiento o conciencia sobre este enfoque económico específico en la comunidad encuestada. Las razones detrás de este resultado podrían incluir la falta de divulgación de información sobre la economía circular en la región o la necesidad de aumentar los esfuerzos de educación y concientización sobre prácticas económicas sostenibles. Este hallazgo puede ser valioso para diseñar estrategias de comunicación y educación que promuevan la comprensión y adopción de la economía circular en este grupo particular.



(a) (b) (c)

Figura 24. Economía circular. a) La Loma; b) Ciénaga; c) Fundación.

En la Figura 25, se evidencia que en Ciénaga y Fundación más del 55% de los encuestados si conocen edificaciones, estructuras o lugares clave en su municipio, mientras que La Loma solo el 28.57%. En los tres territorios coincidieron de la importancia de lugares como: parcelas, parques, cementerios, puntos de acoplo, agroindustria ancestral, potrillos, plaza, pozos agua, espacios públicos, plata de captación de agua, pequeños ganaderos, calles, veredas, fincas, iluminaria, alumbrado público, escuelas; que puedan ser mejorados mediante la reutilización de paneles solares, cuando estos equipos no sean de utilidad para el parque solar pero que aún se puedan implementar en aplicaciones de menor demanda.

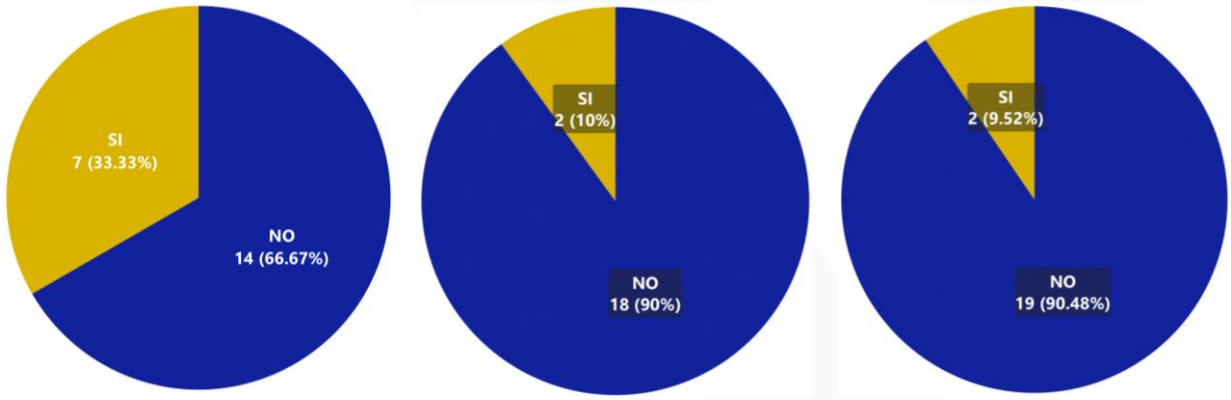


(a) (b) (c)

Figura 25. Sitios clave. a) La Loma; b) Ciénaga; c) Fundación.

Los resultados tabulados de la Figura 26 muestran que actualmente en los tres territorios más del 50% de los encuestados no tienen conocimiento de que existen programas educativos o de formación en energías renovables en su comunidad. Esta situación revela una brecha importante en la difusión y el acceso a este tipo de iniciativas, que podrían contribuir al desarrollo sostenible de la región.

Sin embargo, los participantes de la Loma y Fundación opinaron que, en los municipios de La Jagua, Bosconia y el corregimiento Potrerillo, cuentan con programas educativos de corta duración en energías renovables, como el portafolio verde; y los participantes de Ciénaga expresaron que, en instituciones educativas y en el servicio pastoral social, se implementan estrategias para enseñar sobre las energías renovables.

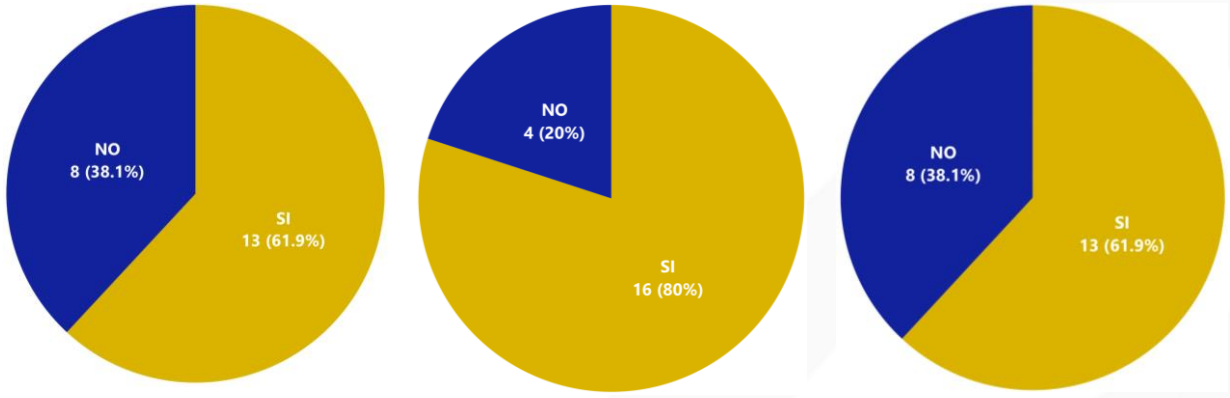


(a) (b) (c)

Figura 26. Programas educativos. a) La Loma; b) Ciénaga; c) Fundación.

La Figura 27, revela que más del 60% de los participantes lleva a cabo diversas prácticas en su vida diaria, destacando acciones como: reciclar o reutilizar plástico, emplear abono reutilizable, dar nueva utilidad a objetos como triples, botellas PET, vidrios, desechables,

cartón y revistas. Además, se observa que estos encuestados adoptan la separación de residuos según su tipo y utilizan pacas digestoras para los residuos orgánicos.



(a) (b) (c)

Figura 27. Reciclaje. a) La Loma; b) Ciénaga; c) Fundación.

En resumen, los 62 encuestados de los tres territorios respondieron de forma favorable, evidenciando conocimientos base de reciclaje y reutilización, esto ha ayudado a la comunidad a desarrollar procesos de aprovechamiento y reutilización de residuos; en este caso productos a partir de llantas desechadas, desde sillas, macetas, colgaderas para jardinería, entre otras. Aunque reconocieron una participación en prácticas sostenibles en la vida cotidiana, la falta de conocimiento sobre conceptos clave como la economía circular y programas educativos en energías renovables destaca la necesidad de impulsar la conciencia ambiental y la educación en la comunidad. La identificación de perfiles laborales demandados y el potencial de reutilización de paneles solares en infraestructuras municipales ofrecen oportunidades para fomentar el desarrollo sostenible en el sector. Estos hallazgos muestran la importancia de implementar iniciativas educativas y estrategias de sensibilización para fortalecer la conexión entre la comunidad y la sostenibilidad ambiental en el contexto del cierre de parques solares.

5.1.1. Oportunidades identificadas por las comunidades en La Loma (Cesar), Ciénaga y Fundación del departamento del Magdalena.

La mayoría de los encuestados logró identificar oportunidades para la reutilización de los paneles fotovoltaicos, por ejemplo:

- Generación de energía:
  - ✓ Viviendas
  - ✓ Establecimientos comerciales
  - ✓ Espacios públicos (parques, calles, plazas)
  - ✓ Instituciones educativas

  - ✓ Centro de atención de salud de baja complejidad
  - ✓ Fincas y veredas
- Sistemas de riego
- Sistemas de bombeo de agua (subterránea, superficial)
- Captación de aguas lluvias mediante paneles solares
- Instalación de estaciones de monitoreo de calidad de aire (energizadas por paneles solares).
- Sistema de transporte (motocarro)
- Capacitaciones para la comunidad en energías renovables y mantenimiento técnico.

Los encuestados del corregimiento de La Loma (Cesar), de los municipios Ciénaga y Fundación (Magdalena), han coincidido que hay poca contratación de mano de obra local para los proyectos, por esto se requiere mayor actividad participativa para las comunidades en los proyectos energéticos, según las licitaciones el 70% de la mano de obra no calificada debe ser de la población local, lo cual, según la percepción comunitaria, no se está cumpliendo, existiendo grandes carencias para el acceso de oportunidades a la población vulnerable. Así pues, se requiere capacitar a la población en nuevos oficios, puesto que los medios y vocaciones tradicionales fueron acabados o mayormente deteriorados.

Al escuchar estas observaciones por parte de los encuestados, se puede establecer un entorno en el que las comunidades no solo se beneficien económicamente, sino que también contribuyan de manera activa y sostenible en el cierre de parques solares con un enfoque en la economía circular.

5.2. Prospectiva de cierre y manejo de residuos por parte de Enel Green Power Colombia S.A.S.

La empresa Enel Green Power Colombia S.A.S. encargada del proyecto "Parque Solar el Paso" participó de este proyecto de investigación. Para ello, se entrevistó a algunos trabajadores del parque mediante una reunión virtual, con el consentimiento de estos y garantizando la confidencialidad y el uso académico de la información. Los resultados de este estudio se utilizaron para elaborar recomendaciones y un informe de oportunidades tecnológicas para el cierre de los parques solares en el Corredor Vida Cesar-Magdalena, con el fin de promover su aprovechamiento comunitario en el territorio.

Según el estudio, la empresa contrató principalmente mano de obra no calificada de la población del área de influencia directa del proyecto, y priorizó la mano de obra calificada según la disponibilidad de estos perfiles en la zona. Además, la empresa implementó estrategias para la creación de valor compartido, mediante talleres de innovación y

reuniones con la comunidad, en las que se identificaron las necesidades locales y se propusieron posibles soluciones que la empresa podría desarrollar.

En cuanto al manejo de residuos, la empresa destinó algunos paneles solares a un segundo uso, puesto que no cumplían los criterios de eficiencia requeridos para la operación. De esta forma, se entregaron omegas, paneles solares y sistema complementario para proveer energía a viviendas y escuelas de Cuatro Vientos, San Ángel, La Estación y Mata de Queso; las cuales cuentan con paneles solares que fueron instalados y son operados por el personal del proyecto o por aliados capacitados. Además, se ofrecen capacitaciones en temas sociales como huertas comunitarias, huertas domésticas y otros. Algunos paneles también se usan como techo, lo que contribuye a la economía circular del proyecto.

En cambio, con el enfoque de economía lineal, los paneles que no funcionan se entregan a gestores de residuos autorizados como residuos peligrosos. Las únicas empresas que se conocen para la disposición final están en Medellín y Barranquilla, pero esta práctica no se hace con frecuencia. De hecho, hasta el momento de la entrevista no se había realizado disposición final de ningún panel solar.

El parque solar se construyó desde 2018 hasta mediados de 2020, y luego empezó a operar. Sin embargo, el proyecto no ha alcanzado la estabilidad, lo que impide la operación comercial al 100%. Por eso, se hizo una ampliación del parque en lo que se llama el paso de extensión. La vida útil del parque es de 30 años, y según los reglamentos de la compañía, se podría repotenciar el parque cambiando toda la infraestructura de paneles y demás componentes.

5.3. Lecciones aprendidas en procesos de cierre en proyectos de parques solares

La transición hacia un modelo energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente depende en gran medida del desarrollo de la energía solar. Sin embargo, esta fuente de energía no está exenta de desafíos y riesgos, especialmente cuando se trata de cerrar o desmantelar las instalaciones solares que han dejado de ser viables o rentables. Para evitar consecuencias negativas para el entorno natural, el bienestar social y el cumplimiento legal, es necesario establecer criterios y protocolos claros y eficaces que garanticen un cierre responsable y adecuado de las plantas solares.

Es importante señalar que hasta el momento de la investigación no se han registrado cierres de parques solares al final de su vida útil, lo que indica un área de interés y relevancia para futuras investigaciones. No obstante, en la Tabla 6 se presentan casos de instalaciones solares con problemas o dificultades en diferentes países junto con posibles soluciones propuestas o aplicadas. Esto puede ser útil para los responsables de la toma de decisiones en el desarrollo de políticas y regulaciones para el cierre, desmantelamiento y abandono de las plantas solares.

Tabla 6. Experiencias en procesos de cierre de parques solares por diferentes motivos.

País	Proyecto/Empresa	Capacidad técnica	Año operación/cierre	Observaciones
España	Planta Fotovoltaica Núñez De Balboa / Empresa: Grupo Iberdrola	1.430.000 paneles fotovoltaicos 500 MWp	Abril de 2020/ aun en funcionamiento	El Tribunal Superior de Justicia de Extremadura dictaminó que Iberdrola debe desmantelar la planta fotovoltaica Núñez de Balboa, la más grande de Europa, ubicada en la provincia de Badajoz, y devolver las 500 hectáreas de terreno a su propietario original, Natura Manager S.L. La sentencia se basa en un recurso presentado por Natura Manager contra la Administración General del Estado, impugnando la Declaración de Utilidad Pública del proyecto en octubre de 2018. El tribunal ordena la restitución de la propiedad sin indemnización por daños y perjuicios. La planta, operativa desde abril de 2020, tiene una capacidad instalada de 500 megavatios y fue financiada con apoyo del Banco Europeo de Inversiones y el Instituto de Crédito Oficial [63].
	Instalación fotovoltaica "Santo Toribio" / Empresa Renantis España 1 Sl.	88,635 MW	No entró en funcionamiento	La Resolución de 20 de julio de 2023 desestimó la solicitud de autorización administrativa de Falck Renewables Power 1, SL (ahora Renentis España 1 SLU) para la instalación de la planta solar fotovoltaica de 88,635 MW "Santo Toribio" en Chiva y Godelleta, Valencia. La Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental emitió una declaración de impacto ambiental desfavorable, indicando que el proyecto podría tener impactos significativos en la cuenca hidrográfica de La Albufera. El proyecto generó oposición en Chiva, con el Ayuntamiento, asociaciones y la población expresando preocupaciones ambientales [64].
Chile	Granja Solar / Empresa María Elena Solar	332 mil paneles solares 195 MW	Octubre de 2020/ aún en funcionamiento	La empresa de energía renovable María Elena Solar S.A., propietaria del parque fotovoltaico "Granja Solar" en la Región de Tarapacá, Chile, fue declarada en quiebra el 4 de abril de 2023. En este caso se resalta la alerta establecida por la empresa respecto al valor que reciben por la energía inyectada a la red, el cual es marginalmente cero en las zonas alejadas de los puntos de consumo, lo que terminó afectando sus estados financieros. La empresa alerta que esta situación puede suceder con otras 25 empresas generadoras de energía solar FV [65].
Colombia	Parque Pubenza/	50MW	No entró en funcionamiento	La empresa francesa decidió renunciar a la construcción del proyecto solar Pubenza (50 megavatios) en el municipio de Girardot, debido a retrasos

	Empresa EDF Renewables			significativos en los permisos y licencias ambientales por parte de la corporación regional, incumpliendo plazos establecidos La compañía destaca que esta situación afecta la competitividad del país y también menciona que esta decisión se debe a cambios regulatorios y fiscales, incluyendo la reforma tributaria que afectó la rentabilidad y los beneficios de la Ley 1715 para promover las energías renovables. A pesar de la anulación del marco regulatorio de la subasta por el Consejo de Estado, XM ejecutó las garantías de puesta en operación de Pubenza [66].
Estados Unidos	Battle Mountain Solar Farm/ Empresas: Arevia Power y Solar Partners VII LLC	850MW	No entró en funcionamiento	Esta planta estaba proyectada para ser construida en el sur de Nevada, en el valle de Moapa, y en el 2021 era considerada la planta solar más grande en Estados Unidos. Las empresas decidieron retirar la solicitud ante la oposición de la comunidad, las cuales estaban compuestas por residentes, ambientalistas y otros, debido a las afectaciones en actividades como caminatas, acampadas, el uso de vehículos todo terreno, turismo y la equitación [67].

En conclusión, de acuerdo con los proyectos mencionados en la Tabla 6, se identifican dos desafíos significativos: la resistencia de la comunidad local y la falta de claridad en la normativa y los beneficios fiscales. La comunidad local expresa preocupaciones ambientales y sociales que deben abordarse mediante un diálogo abierto y transparente, especialmente en áreas donde se observa falta de aceptación de los proyectos. La normativa y los incentivos fiscales son cruciales para asegurar la viabilidad económica y financiera del proyecto, así como para atraer inversiones y fomentar la creación de empleo. Por lo tanto, se sugiere revisar y actualizar el marco regulatorio y tributario, además de establecer mecanismos de participación y consulta con la comunidad local, con el fin de lograr un desarrollo sostenible e inclusivo.

5.4. Propuesta de estrategias de responsabilidad empresarial en procesos de cierres de parques solares.

Para supervisar el cierre efectivo de proyectos y operaciones, la comunicación desempeña un papel fundamental, puesto que permite informar, coordinar y resolver los aspectos pendientes de forma oportuna y eficiente. Esto implica establecer canales adecuados, definir roles y responsabilidades, y mantener un flujo constante de información entre las comunidades afectadas. Por eso se sugieren un conjunto de estrategias que permitan gestionar el cierre de proyectos y operaciones de plantas solares, las cuales se resumen en la Figura 28.

Figura 28. Propuesta de estrategias de responsabilidad empresarial. Elaboración propia.

5.4.1. Elaboración y socialización del plan de cierre y abandono

El proyecto debe contemplar una nueva identificación del área de influencia directa e indirecta del proyecto por componentes biótico, abiótico y socioeconómico al momento de proponer el inicio de la fase de cierre, además debe solicitar a la autoridad ambiental competente el pronunciamiento de pasivos ambientales que haya lugar por el desarrollo de la vida útil del proyecto e integrar una evaluación de impactos ambientales acumulativos y sinérgicos que se hayan podido generar.

Con relación a esta estrategia se recomienda incluir a la comunidad en la elaboración del plan de desmantelamiento y abandono, se hará una campaña de comunicación que incluirá reuniones en las veredas del área de influencia socioeconómica, distribución de material impreso y actividades de perifoneo. La campaña debe contar con la participación de líderes comunales y municipales, asociaciones sin ánimo de lucro, comunidades campesinas, indígenas, negras, afrodescendientes, raizales y palenqueras presentes en el área de influencia directa e indirecta del proyecto. Durante estas reuniones se debe divulgar de manera clara y con leguaje sencillo la información suficiente para evitar la generación de falsas expectativas relacionadas con el cierre y con el uso final del suelo, también se deben exponer las actividades de desmantelamiento y la posible participación de la comunidad en el desarrollo de las mismas a través de la contratación de mano de obra y vinculación de contratistas del área, además del aprovechamiento comunitario de residuos aprovechables que se generen por las obras de esta fase.

Considerando lo anterior, se debe consolidar la información y lo establecido en el artículo *2.2.2.3.9.2. Decreto 1076 de 2015*, para refinar el estudio que se presente ante la autoridad ambiental competente, con el fin de solicitar pronunciamiento del proyecto y acto administrativo que autorice el inicio de la fase de cierre propuesta.

Para garantizar el uso adecuado de las instalaciones construidas que benefician a la comunidad, es necesario establecer un acuerdo con los representantes locales para cumplir con los requisitos legales necesarios para la entrega oficial y la suspensión de las actividades de desmonte.

5.4.2. Mecanismos de recuperación ambiental de suelos

Se sugiere establecer mecanismos de garantías legales para la restitución de tierras en condiciones óptimas, de acuerdo con el uso vocacional que tenía el suelo antes del proyecto del parque solar, en el caso de que no se renueven el proyecto para un nuevo licenciamiento, mediante la obligación por parte de las empresas, al implementar acciones más rigurosas durante la etapa de operación de cierre y abandono, enfocadas en la restauración de suelos, como por ejemplo el programa que se llevó a cabo en el parque

solar Nueva Xcala, México [68], el cual se realizó durante la etapa de operación, con la finalidad de llevar a cabo planes de conservación de suelo y agua para la captación de lluvia y recarga del manto acuífero de Apan; mediante la construcción de zanjas y trincheras que incorporen actividades como la siembra de cultivos bajos, para el cubrimiento y protección del suelto contra la erosión. Dichas medidas de obligación pueden ser apoyadas por parte del estado mediante incentivos económicos, como la reducción de impuestos o subvenciones para acceder a fondos para el apoyo de estos planes de manejo o alianzas entre el estado y las empresas para llevar a cabo las medidas.

5.4.3. Identificación de zonas de proyectos energéticos en el POT

Se propone establecer en los planes de ordenamiento territorial, planes de desarrollo municipal y planes básicos de ordenamiento, la identificación de las zonas con potencial de uso para proyectos energéticos, con la finalidad de mejorar la toma de decisiones en los territorios, en el ámbitos ambiental, social y económico, debido a que actualmente en estos planes de ordenanza no se cuenta con la categorización de este tipo de vocación o usos al suelo y mucho menos se plantea el tipo de vocación una vez culminado el cierre y abandono de estos proyectos, por lo que la gestión de estas zonas quedan inconclusas o no especificadas, de tal forma surge la necesidad de actualizar y estipular dicha medida en la *ley 1454 de 2011*, en la cual se dictan normas orgánicas sobre ordenamiento territorial.

5.4.4. Socializaciones comunitarias de las medidas de manejo ambiental implementadas por la empresa

Dentro de la ejecución de los proyectos se realizan con periodicidad socializaciones de las medidas de manejo ambiental, los programas y subprogramas para los medios abiótico, biótico y socioeconómico, se recomienda informar a las comunidades el cumplimiento de las obligaciones finales en la etapa de cierre y abandono. Se propone la realización de una campaña de comunicación profesional y respetuosa que abarque las veredas del área de influencia socioeconómica. La campaña debe contemplar reuniones con los habitantes de la zona, distribución de material impreso con información relevante y actividades para difundir el mensaje. Además, es necesario contar con la participación de líderes comunales y municipales, asociaciones sin ánimo de lucro, comunidades campesinas, indígenas, negras, afrodescendientes, raizales y palenqueras que se encuentran en el área de influencia directa e indirecta del proyecto. Los participantes de las reuniones deben firmar un documento que certifique su asistencia y se tomarán imágenes o videos como evidencia.

5.4.5. Diseñar Proyectos Ciudadanos de Educación Ambiental (PROCEDA)

El programa PROCEDA consiste en el planteamiento de iniciativas enfocadas a la formación y educación ciudadana con el propósito de promover la transformación de contextos territoriales mediante procesos de formulación y formación de proyectos en el ámbito de recuperación integral del ambiente. Bajo este principio, se busca implementar el programa PROCEDA con la comunidad del área de influencia directa, enfocado hacia iniciativas en el aprovechamiento comunitario y empresarial de los residuos generados en la fase de cierre con fines de promover iniciativas de desarrollo productivo sostenibles en las comunidades. En este sentido, se sugiere realizar cursos en alianza con instituciones educativas enfocadas al aprovechamiento de residuos reciclables que se generen en la etapa de cierre y abandono, se debe propender la formación de microempresas en la comunidad y el apoyo económico y técnico por parte de la administración municipal y departamental.

5.4.6. Planes de sostenimiento sociocultural y diversificación económica

En el proceso del desarrollo de proyectos energéticos, el acaparamiento de tierras, mayoritariamente agrícolas, durante 25 o 30 años, da como resultado que muchas de las labores tradicionales que se realizaban en las comunidades aledañas al proyecto, se disminuyan o eliminen por completo en el territorio, debido a las diferentes dinámicas producidas por estas obras, bien sean ambientales, sociales y económicas que afectan en el desarrollo de dichas labores, que no solamente representa actividades de economía de subsistencia, si no también actividades que componen la identidad cultural de las comunidades y soberanía en el territorio. Por lo que se plantea como estrategias la realización de programas de sostenimiento que garanticen la prevalencia de estas labores y actividades, mediante apoyos económicos a los desarrollos productivos de esta índole, espacios de transmisión de conocimientos tradicionales, acciones de mitigación que puedan afectar las actividades, como a su vez la formulación de indicadores que evalúen el estado de las dinámicas socioculturales posteriores al cierre de los proyectos, mediante censos antes y después del proyecto. Los actores identificados para el desarrollo de esta estrategia corresponden principalmente a la comunidad en general.

6. MEJORES PRÁCTICAS Y RECOMENDACIONES EN PROCESOS DE CIERRE

6.1. Antecedentes de cierre de diversas industrias

El cierre de parques solares representa un aspecto crucial en el ciclo de vida de estas instalaciones, demandando una cuidadosa planificación que abarque diversos ámbitos. En este contexto, la experiencia de otras industrias que han enfrentado procesos similares emerge como una valiosa fuente de aprendizaje. La complejidad inherente a este procedimiento requiere una visión integral, contemplando aspectos legales, regulatorios, ambientales, financieros y sociales.

Como se mencionó en el apartado 5.2., no hay experiencias previas de cierre de parques solares, por lo que se recurre a los casos de otras industrias para extraer buenas prácticas y lecciones aprendidas para llevar a cabo el desmantelamiento y cierre de parques solares. Este enfoque permite identificar las mejores prácticas que asegurarán una transición ordenada y sostenible al concluir la vida útil de estas instalaciones. Además, la adopción de tecnologías innovadoras y soluciones eficientes provenientes de otros sectores enriquecerá el proceso de cierre, promoviendo la eficacia y la eficiencia en todas las fases involucradas. Este estudio se sumerge en la exploración de estas prácticas recomendadas, respaldando la planificación y ejecución exitosa del cierre de parques solares [69].

A continuación, se representan casos de cierre y abandonos, como planes y mecanismos pensados para el desarrollo de esta fase, de algunos proyectos de sectores que tienen una dinámica similar o igual al de un parque solar en cuanto a la influencia socioeconómica y ambiental en las comunidades aledañas por el acaparamiento prolongado y significativo de recursos. Los casos recopilados representan tanto ejemplos positivos como negativos de la influencia y consecuencias de los proyectos en las comunidades tras su cierre, permitiendo en análisis general para la obtención de lecciones aprendidas que pueden ser consideradas en el planteamiento del cierre y abandono de los parques solares.

6.1.1. Caso de cierre de las minas de carbón en Calenturitas y La Jagua del grupo Prodeco en Colombia

Las causas del cierre de las minas de Prodeco, en el departamento del Cesar se debieron principalmente a factores económicos y la afectación estructural del mercado internacional del carbón, el cual con la caída del precio afectó la viabilidad de la operación minera, a lo que se sumaron las decisiones judiciales que impidieron el desarrollo de planes mineros y el no otorgamiento de permisos ambientales.

El proceso de cierre y abandono de las minas fue repentino por lo que la empresa no cumplió con las normas internacionales de conducta empresarial responsable [74],

ocasionando impactos sociales, económicos y ambientales sobre las comunidades aledañas. A continuación, se detallan algunos de los impactos más significativos tras este cierre [75].

- Se generó gran dependencia del departamento al sector minero: 2000 trabajadores directos y 2500 indirectos.
- Muchos de los extrabajadores después del cierre estuvieron en situación de desempleo al carecer de competencias de otras actividades.
- Los trabajadores presentaron enfermedades crónicas osteomusculares y respiratorias producidas por los agentes contaminantes del carbón, más del 70 % de los trabajadores están enfermos.
- Daños en el medioambiente, que entidades como la ANLA, ANM y MADS no contemplaron de forma específica al momento de otorgar la concesión, generando problemas en los territorios.
- Generación de montañas artificiales de escombros: desechos de materiales químicamente activos, que pueden liberar concentraciones de sulfuros y altas cantidades de mercurio, los cuales no fueron intervenidos ni tratados después del cierre.
- Alteración del ciclo hidrogeológico con la perturbación de capas freáticas por huecos mineros que desvían el agua subterránea y la contaminan.
- Falsas remediaciones ambientales después del cierre, como la creación de huecos mineros que pasan como “humedales” y estrategia de rehabilitación de algunas zonas.
- Afectación de zonas agrícolas aledañas por la contaminación del carboncillo y captación desmedida de fuentes de agua, lo cual afectó la economía de muchas familias de campesinos.

Las principales consecuencias de este proceso de cierre repentino se pueden enmarcar en las siguientes:

- Fenómeno de recesión económica en las comunidades, ocasionado por el desempleo masivo de extrabajadores, que en la mayoría de los casos no contaban con nuevas fuentes de generación de ingresos, además de sumarle personas que se les imposibilita trabajar por las enfermedades ocasionadas debido a la sobreexposición a partículas de carboncillo.
- Afectación de bienes de subsistencia como la contaminación del recurso hídrico, la erosión y esterilidad de suelos; producto de la actividad minera que se realizó durante muchos años.
- Transformación cultural y formas de vida por la llegada de personas externas con diferentes culturas y por lo general con mayor poder adquisitivo, lo que produjo el

cambio de las dinámicas de la comunidad, como también el surgimiento de actividades como la prostitución y drogadicción.

- Con la llegada de personas con mayor poder adquisitivo se produjo el fenómeno de gentrificación, donde los productos, bienes y servicios en la zona elevaron sus costos dificultando su acceso a la comunidad local.
- Alteración permanente de la geomorfología del ecosistema, pasando de amplias llanuras o sabanas, a una topografía con numerosas canteras y excavaciones promitentes como a su vez montañas artificiales, afectando los patrones naturales de los vientos, el régimen hídrico y en general el funcionamiento del ecosistema.
- Abandono de maquinaria, chatarra y demás equipos de la actividad minera, produciendo el riesgo de contaminar los suelos, el agua y afectar la salud de la población.

En este punto es importante destacar que el alcance del convenio suscrito entre la Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME y la Universidad del Magdalena**,** muestra los "*Resultados de la evaluación de los riesgos y estrategias ante los cierres de la cadena del carbón*". Esta evaluación de riesgos asociada al cierre de la cadena de carbón destaca desafíos, oportunidades y complejidades en aspectos económicos, políticos, culturales, sociales, educativos, ambientales y tecnológicos. Cada riesgo se presenta con parámetros numéricos y evaluaciones por colores, permitiendo identificar prioridades y variabilidades de respuestas. La diversificación económica, la preservación cultural, la participación comunitaria, la inversión educativa y la gestión ambiental son clave. La conexión entre los riesgos subraya la necesidad de preparar a los actores involucrados para una transición equitativa y sostenible ante el cierre de cadenas de carbón. (Ver Anexo Matrix de riesgos de relacionados con los procesos de cierre de la minería de carbón).

Nota: Documento completo Mapa de riesgos relacionados con los procesos de cierre de la minería de carbón

6.1.2. Caso del cierre del parque eólico Windpeshi en la Guajira Colombia

El proyecto de la construcción del parque eólico Windpeshi en la Guajira, concesionado a la empresa Enel Colombia, suspendió actividades por retrasos significativos en la construcción del proyecto, debido a desacuerdos entre la comunidad local. Las principales causas del cierre se pueden enumerar de la siguiente forma [76]:

- Deficiencias dentro de las consultas previas a las comunidades.
- Publicación de estudios de impacto ambiental con lenguaje técnico, los cuales no fueron explicados a la comunidad, dificultando el entendimiento y la opinión de las personas locales.

- No existió participación de la comunidad para la elaboración del manual de interrelacionamiento cultural, documento que debe ser considerado como la hoja de ruta entre comunidad y empresa.

Los principales impactos y consecuencias del cierre se pueden enumerar así [77]:

- Creación de tensiones entre las empresas, el gobierno y las comunidades locales por los conflictos generados.
- Se exponen las deficiencias por parte de las empresas y entidades territoriales al momento de llevar a cabo y aprobar los procesos y mecanismos empleados en las consultas previas con comunidades.
- La llegada de proyectos eólicos ha hecho visibles problemas de índole monetaria, con pobladores que no se benefician y que reclaman un mayor apoyo estatal.
- Aumento de las tensiones entre las comunidades y las empresas, dificultado el desarrollo de futuras negociaciones entre los actores en la región en términos de desarrollo energético.

6.1.3. Caso de cierre de la mina de carbón As Pontes en Coruña España

Causas del cierre:

- Fin de operaciones extractivas en el año 2007 por culminación del proyecto.

Aspectos relevantes e impactos del cierre [78]:

- Restauración de las escombreras y áreas de explotación que se generaron por la minería de lignito con el propósito de recuperar el uso anterior de la tierra hasta la recuperación de la zona para otros usos.
- Restauración de 24 km^2, divididos en dos áreas de construcción de aproximadamente 330 m de profundidad y una escombrera exterior.
- Creación de un nuevo suelo a partir de materia estéril, suelo vegetal, calizas y cenizas, así como procesos de fertilización tanto orgánica como química. Una vez se obtuvo un suelo apto, se procedió a sembrar de inmediato una combinación de plantas herbáceas de rápido desarrollo, mientras que con el paso del tiempo la zona fue poblada por especies espontáneas de hierbas.
- Después de establecer la primera capa de vegetación, se llevó a cabo la siembra de especies de arbustos que ayudaran a mejorar la estabilidad del suelo. Luego, a principios de los años noventa, una vez que los arbustos se consolidaron adecuadamente, se procedió a la introducción de árboles en el área.
- En la actualidad, se ha estado realizando un registro de las diferentes especies de plantas y animales que se encuentran en las áreas recuperadas, lo cual ha revelado

que la zona de escombrera exterior de As Pontes es el lugar con mayor diversidad biológica en Galicia.
- Se planea construir un lago con un perímetro de alrededor de 15 km, una longitud de 4,7 km y una superficie de aproximadamente 840 ha, con una profundidad media de 200 m. Además, se llevará a cabo la restauración de los terrenos que se encuentran por encima del área inundada, abarcando alrededor de 350 ha.

Consecuencias:

- Restauración de suelos con una diversidad de usos futuros: industriales, agrícolas, ganaderos, recreativos; integrando la zona al entorno visual, social y económico.
- Fuente de empleo durante varios años después del cierre de la mina, en la etapa de restauración como también en la etapa de monitoreo posterior a su restauración.

6.1.4. Caso del cierre de actividad ferroviaria para el lavado, cargue y transporte de carbón en Villagatón-Brañuelas, España

Causas del cierre:

- Fin de operaciones.

Impactos del cierre [79]:

- Dependencia de la actividad para los 4000 habitantes de la comunidad.
- En el año 2017 se comenzó la restauración y reconversión de inmuebles y edificios ferroviarios para la conversión en un museo que resalta el patrimonio ferroviario.
- Rehabilitación de siete vagones de mercancía, en seis viviendas de alojamiento turístico y un espacio de servicios [80].
- Reutilización de espacios donde se realizaban el lavado y cargue de carbón para alojamientos turísticos.

Consecuencias:

- Reconversión laboral del sector minero al turismo.
- Aprovechamiento y reutilización de infraestructuras después del cierre.

6.1.5. Caso del plan de repotenciación del parque eólico Malpica en Bergantiños, Coruña, España

Causas:

- Cambio de aerogeneradores al tener una vida útil de 20 años.

Impactos del cierre:

- Cambio de 69 molinos por 11 aerogeneradores nuevos.
- Gestión de residuos "palas" a empresas como "Re-Wind Network" que reutiliza la infraestructura para la construcción de parques infantiles, puentes, estaciones de bus, estaciones de bicicletas [81].

Consecuencias:

- Promoción de mecanismos con enfoque de economía circular al aprovechar materiales existentes para crear nuevas infraestructuras, fomentando así un ciclo sostenible en la cadena de suministro y construcción.

6.1.6. Caso del cierre de la mina de carbón de la ciudad de Taiyuán - China

Causas del cierre:

- Fin de operaciones

Impactos del cierre:

- Se realizó la transformación de la antigua zona minera de carbón de la ciudad de Taiyuan, en un jardín botánico, culminado su construcción en el año 2021, creando espacios multifuncionales con áreas recreativas, áreas de museos de bonsáis y centros de investigación. El parque está conformado por 3 cúpulas que albergan invernaderos, como también espacios al aire libre, montículos, cubiertos de praderas, cobertura de árboles y sistemas de lagos artificiales [70].

Consecuencias:

- Mejora del entorno local: la creación de un jardín botánico puede mejorar la calidad de vida de la comunidad local al proporcionar espacios de integración social como formativas.
- Generación de empleo: la planificación, construcción y operación del jardín botánico generan nuevos empleos en la región, beneficiando a la economía local.
- Educación ambiental: el jardín botánico puede servir como ejemplo de casos de éxito de restauración ambiental tras la actividad de proyectos extractivistas.
- Turismo sostenible: la transformación puede atraer turistas, generando ingresos adicionales a través del turismo sostenible.
- Restauración de ecosistemas: la construcción de jardines botánicos permite la restauración y conservación de la biodiversidad afectada por la actividad minera que se llevaba anteriormente.

6.1.7. Caso del programa de conservación de suelos en el parque solar Nueva Xcala, México

En este proyecto aún no se ha dado la fase de cierre, pero desde la fase de operación se han implementado medidas interesantes que pueden contribuir significativamente a la gestión responsable y sostenible de proyectos mineros, mediante la implementación de mecanismo de conservación y mitigación del suelo.

Aspectos e impactos de operación proyectados para el cierre:

- En el año 2020 en el parque solar Nueva Xcala, se llevó a cabo el programa de conservación de suelo y recurso hídrico para la captación de lluvia y recarga del manto acuífero ubicado en el municipio Apan.
- Este programa contempla acciones de construcción y mantenimiento de infraestructuras estratégicas que permiten la conservación de estos recursos, como los son las zanjas bordo a cuervas de nivel, zanjas trincheras, 85 pozas de captación y 2 mil canaletas a orillas de los paneles solares, todo esto distribuido en casi 6 ha, donde se realizan recorridos de observación y supervisión de la funcionalidad de las obras, como a su vez el proceso de la identificación de entradas de agua con el fin de realizar adecuaciones periódicamente para evitar su erosión [71].

Consecuencias:

- Conservación de suelos evitando la erosión y perdida de nutrientes y la conservación cuerpos hídricos, mejorando la capacidad de infiltración de agua que pueden recargar pozos y ríos cercanos, mejorando la disponibilidad del recurso en el territorio y a su vez todo este proceso facilita las fases de recuperación y rehabilitación de suelos para nuevos usos.
- Conservación de bienes de subsistencia para las comunidades aledañas.
- Generación de empleo desde la etapa de operación y posterior cierre.

6.2. Patrones negativos y mejores prácticas asociadas al cierre de proyectos

Al revisar los casos de cierre detallados en la sección anterior, se pueden consolidar las practicas regulares que tienen las empresas y los problemas que se pueden desarrollar con la comunidad, también se identifican patrones sociales que se generan por la acción directa o indirecta del cierre de industrias dentro del territorio; así como la identificación de elementos que constituyen la base legal de la planificación del proceso de cierre como lo son el marco normativo y el plan de cierre y abandono. Todos estos aspectos fueron resumidos en el diagrama de Ishikawa que se muestra en la Figura 29.

Figura 29. Diagrama de Ishikawa sobre problemas asociados al cierre insostenible de proyectos. Elaboración propia

Para dar respuesta a la necesidad de planificar y ejecutar un cierre de parques solares se plantea desarrollar las estrategias de responsabilidad empresarial mencionadas en el numeral 5.3 en combinación con tecnologías y estrategias emergentes.

6.3. Elaboración y socialización del plan de cierre y abandono

Se recomienda que los proyectos para iniciar su etapa de cierre elaboren o actualicen los planes de cierre y desmantelamiento con enfoque comunitario de manera que se involucre y beneficie a la comunidad local. Estos planes buscan no solo abordar los aspectos técnicos y ambientales del cierre, sino también considerar las necesidades y preocupaciones de la población afectada. Se presenta a continuación algunos ejes direccionales para desarrollar planes de cierre con enfoque comunitario:

1) Participación Comunitaria: el objetivo será involucrar activamente a la comunidad del área de influencia directa e indirecta de los proyectos en el proceso de planificación del cierre, desarrollando diagnósticos sociales y ambientales para recopilar opiniones, inquietudes y sugerencias de la comunidad.
2) Transparencia y Comunicación: se refiere a entregar información clara y accesible sobre el proceso de cierre, los plazos y las medidas adoptadas; para lo cual será necesario establecer canales de comunicación efectivos con el fin de mantener a la comunidad informada durante todo el proceso.

Se sugieren desarrollar los siguientes programas para la formulación del plan de cierre y evaluar la efectividad de estos a través de indicadores. Es importante resaltar que, para usar los indicadores, se requerirá que el proyecto durante su operación organice su línea base de información ambiental:

1) Evaluación de Impacto Social: hace referencia a la identificación del impacto social para comprender cómo el cierre afectará a la comunidad en términos de empleo, servicios públicos, vivienda y calidad de vida. Para la adecuada evaluación del impacto social será necesario apoyarse inicialmente en la caracterización socioeconómica aprobada en la licencia ambiental y posteriormente actualizar la caracterización con la vigencia del cierre del proyecto.
   Indicadores: porcentaje de pérdida o ganancia de costumbres sociales, presencia y ausencia de desplazamientos poblacionales y cambios en la producción económica de las actividades ancestrales/ vocacionales del territorio.
2) Empleo Alternativo: será necesario diseñar programas de reconversión laboral para los trabajadores afectados por el cierre y explorar oportunidades de empleo en sectores alternativos que puedan surgir en la región.
   Indicadores: número de microempresas creadas relacionadas con el manejo de residuos, porcentaje de contratación de mano de obra local para actividades de cierre y porcentaje de trabajadores reubicados en nuevas empresas.
3) Transición Económica Local: se deberán identificar sectores económicos locales con potencial para apoyar el desarrollo del territorio después del cierre, también será necesario fomentar la diversificación económica y el apoyo a emprendimientos locales.
   Indicadores: número de sectores productivos en el territorio con potencial económico.
4) Rehabilitación Ambiental: para la realización de este programa será necesario identificar los pasivos ambientales generados durante el proyecto y los impactos sinérgicos en el área de influencia directa del proyecto. Posteriormente se diseñarán los planes detallados para la rehabilitación ambiental de la zona afectada.
   Indicadores: pasivos ambientales vs compensaciones ambientales, porcentaje de áreas intervenidas directamente por el proyecto vs porcentaje de áreas recuperadas ambientalmente, número de individuos arbóreos talados vs número de individuos sembrados, entre otros relacionados a los programas de manejo ambiental de los proyectos.

Estos elementos se centran en la idea de que el cierre de instalaciones debe ser visto como una oportunidad para contribuir al desarrollo sostenible y mejorar la calidad de vida en la comunidad afectada (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Actores claves y retos asociados a la formulación de plan de cierre con enfoque comunitario.

Actores clave	Retos
Actores Privados: autoridades ambientales, empresa titulante, empresas contratistas que integren toda la cadena productiva Actores Comunitarios: población del área de influencia directa e indirecta, grupos étnicos y asociaciones sin ánimo de lucro.	• Percepciones negativas de la comunidad respecto a la empresa. • Información comunitaria entendible y transparente. • Omisión de responsabilidades por parte de las CARS para la identificación de pasivos ambientales. • Intereses comunes entre empresa y autoridades ambientales. • Baja participación comunitaria. • Baja capacidad técnica en la comunidad para el desarrollo de actividades del cierre. • Territorios dependientes económicamente de sectores productivos.

6.4. Mecanismos de recuperación ambiental de suelos

La implementación de parques solares ha surgido como una alternativa sostenible para la generación de energía limpia y renovable. Sin embargo, su instalación en áreas predominantemente de uso agrícola o áreas forestales han generado preocupaciones en relación con la degradación de los suelos. Esta preocupación se centra en varios factores, como la compactación del suelo durante la construcción y mantenimiento de las instalaciones solares, el sombreado que afecta la fotosíntesis y el desarrollo de las nuevas plantas, una vez removido la cobertura vegetal, las cuales actúan como una capa de cubrimiento y protección de suelos y sin ella aumenta la degradación de los mismos, a su vez la interacción entre los paneles solares y la superficie del suelo puede generar cambios en la temperatura y la humedad del suelo, afectando la microbiota y los procesos biogeoquímicos fundamentales para la salud del suelo.

Al analizar los impactos mencionados por una prolongación de 25 a 30 años, que representa la vida útil de un proyecto de parque solar, es preocupante pensar en las condiciones finales del suelo una vez culminado y cerrado el proyecto. Con la finalidad de identificar el grado de vulnerabilidad de erosión que presentan los suelos de los

parques solares, se utilizó la capa "Erosión y Degradación de los Suelos en Colombia" proporcionado por el geovisor del Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC" elaborado con la colaboración la Subdirección de Agrología.

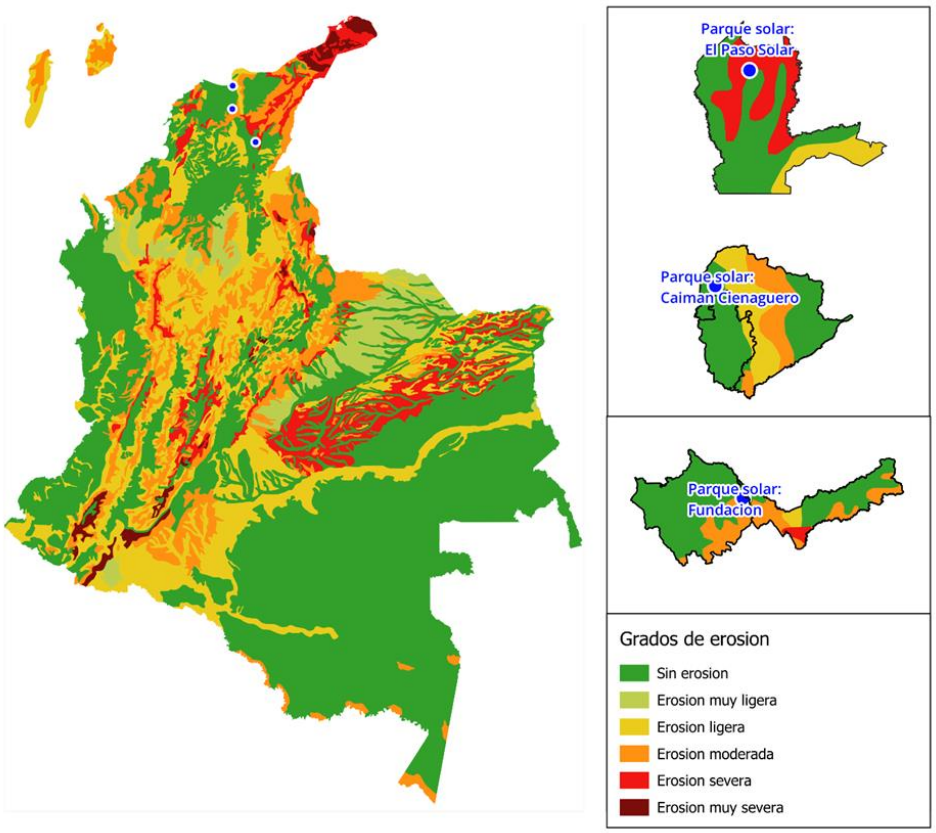


Figura 30. Mapa de degradación de suelos en Colombia del geoportal IGAC y su caracterización en los municipios de estudio. Elaboración propia.

La Figura 30 muestra la vulnerabilidad de los parques ante la degradación de suelos en diferentes municipios. El parque de El Paso es el más afectado, con suelos erosionados severamente por el viento y el ganado. Los parques de Fundación y Ciénaga tienen suelos sin erosión, pero están cerca de zonas con degradación moderada y ligera. Es importante gestionar adecuadamente estos suelos para evitar que se amplíe el área de erosión.

En este sentido, resulta imprescindible la necesidad de encontrar un equilibrio entre el avance de estos proyectos considerando todas sus fases y la preservación de los suelos, favoreciendo la recuperación de estos suelos a sus anteriores usos productivos, brindando la mayor facilidad a la transición económica de las comunidades sin generar la dependencia y la incertidumbre que puede dejar el proyecto energético.

Para llevar a cabo este equilibrio entre la implementación de parques solares y la conservación de suelos se propone la ejecución de actividades que ayuden a remediar,

contrarrestar y restaurar las condiciones del suelo, mediante Soluciones Basadas en la Naturaleza, (SbN), entendiéndose como "soluciones a desafíos a los que se enfrenta la sociedad que están inspiradas y respaldadas por la naturaleza; que son rentables y que proporcionan a la vez beneficios ambientales, sociales y económicos y ayudan a aumentar la resiliencia" [72]. Se recomienda la implementación de procesos de Siembra y Cosecha de Agua (SyCA), en los cuales se adecua el suelo para recolectar e infiltrar el agua de lluvia (aunque también en estas aplicaciones se gestiona aguas provenientes de escorrentía superficial, hipodérmica y subterránea) para recargar pozos, ríos y/o acuíferos [73].

La adecuación del suelo consiste en la modelación de tierras para formar infraestructuras similares a zanjas, jagüeyes, trincheras y demás sistemas, siguiendo la topografía y curvas de nivel del terreno, permitiendo conducir y ralentizar el flujo de agua y de esta forma retener temporal o permanentemente el agua de lluvia y de escorrentía, infiltrándose en los suelos. A su vez, estas estructuras permiten disminuir la erosión, al actuar como barreras naturales, capturando y ralentizando el flujo del agua, minimizando la velocidad de escorrentía, reduciendo así el riesgo de erosión hídrica, además se contribuye a la formación de microambientes más propicios para la vegetación. La presencia de vegetación en estas áreas promueve la estabilización del suelo al enraizar y estructurar el terreno, creando una capa protectora que disminuye la susceptibilidad a la erosión eólica y hídrica.

Figura 31. Infraestructuras de retención de agua (zanjas de infiltración, media lunas de retención y jagüeyes) [74].

Figura 32. Caso de éxito, Parque solar Nueva Xcala – México. Programa de conservación de suelo y agua [71].

Una forma de aprovechar el espacio y el recurso hídrico en los parques solares es sembrar plantas nativas que se adapten a las condiciones del lugar, como la sombra y la humedad que ofrecen los paneles solares. Estas plantas deben ser de bajo crecimiento, para no interferir con el funcionamiento de los paneles, y pueden ser también cultivos que generen beneficios para el sector agrícola. Algunos ejemplos de cultivos que se podrían sembrar son el tomate, el ají, el frijol, el pimentón y la ahuyama, entre otros que se producen en estas regiones según los planes de desarrollo de cada municipio (PDM).

Tabla 8. Cultivos bajos en las áreas de influencia de los proyectos solares.

Tipos de cultivos bajos desarrollados en los municipios de influencia según su PMD	
Fundación	Tomate, ají, yuca
Pivijay	fríjol, ajonjolí patilla, melón
Ciénaga	mora, fresa, lulo, frijol, cilantro, topito, pimentón chino,
Zona bananera	Tomate
Paso	Arroz riego, ahuyama, patilla

Figura 33. Planta solar agro voltaica en Totana (Murcia) – España [74].

Otra forma de recuperar los cuerpos hídricos en el parque solar es mediante la utilización de su propia infraestructura, en este caso las dimensiones de los paneles solares representan una gran oportunidad para la captación de agua lluvia, esta modificación consiste en añadir canaletas a los paneles, que posteriormente conducirán el agua a través de tuberías y finalmente se almacenará el líquido en reservorios de agua o pozos subterráneos, los cuales podrán ser destinados para el abastecimiento de cultivos adyacentes o uso doméstico para comunidades aledañas. En las Figuras 34 y 35 se presenta modelo diseñado por AQUAVOLTAICA para la estrategia mencionada.

Figura 34. Instalación de canaletas para la recolección de agua lluvia AQUAVOLTAICA [75].

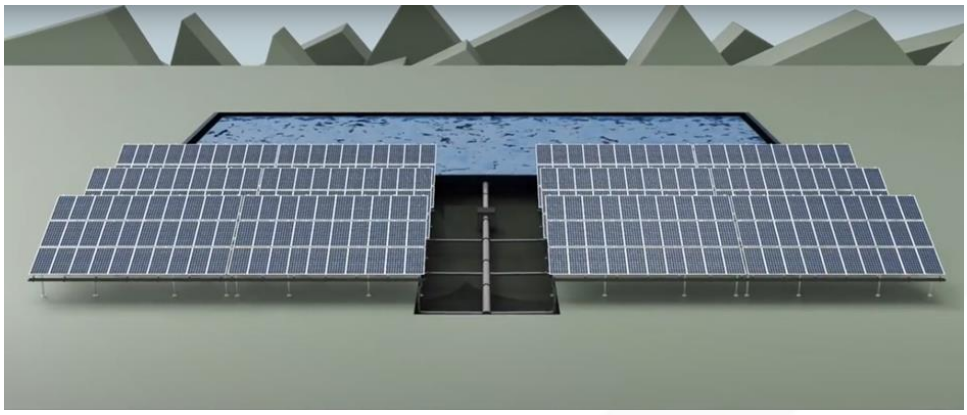


Figura 35. Recarga y reconducción de agua lluvia a reservorios de agua AQUAVOLTAICA [75].

6.5. Mecanismos gubernamentales propuestos

A medida que las empresas de energía solar expanden sus operaciones, surge la necesidad crítica de garantizar prácticas sostenibles y responsables durante la etapa de cierre y abandono de las instalaciones. En este contexto, se plantea la propuesta de mecanismos gubernamentales que impongan obligaciones más rigurosas a estas empresas, centrándose específicamente en la restauración de suelos para mitigar posibles impactos ambientales tras el cierre de operaciones.

El planteamiento busca establecer regulaciones que vinculen a las empresas de energía solar con responsabilidades más claras y estrictas desde la fase de operación, promoviendo un proceso, cierre y abandono de instalaciones más sostenible y resiliente en el territorio. Estas obligaciones podrían incluir medidas específicas para la restauración de suelos afectados o que estén en riesgo de correr alguna afectación por el parque, promoviendo así el desarrollo sostenible, la conservación de suelos, la biodiversidad y la calidad de las personas que dependen del ecosistema local.

Para respaldar y fortalecer estas obligaciones, se propone que el gobierno implemente incentivo financieros, como la reducción de impuestos para las empresas que cumplan con los estándares ambientales establecidos y medidas de mitigación y restauración. Además, se deben proponer subvenciones destinadas específicamente a respaldar estos planes y programas durante las fases de operación y también durante su posterior cierre y abandono. Estos incentivos económicos no solo reconocerán los esfuerzos de las empresas en términos de sostenibilidad, sino que también fomentarían la adopción voluntaria de prácticas ambientales responsables.

Asimismo, se sugiere la posibilidad de establecer alianzas estratégicas entre el gobierno, empresas, asociaciones y organizaciones comunitarias, como también instituciones educativas y grupos de investigación para implementar de manera efectiva las medidas de restauración del suelo. Estas alianzas podrían involucrar la colaboración en la

identificación de mejores prácticas, el acceso a fondos para proyectos específicos (COLCIENCIAS, FINAGRO y demás) promoviendo la participación conjunta en iniciativas de investigación y desarrollo.

En última instancia, este planteamiento busca no solo garantizar la transición hacia una matriz energética más limpia, sino también asegurar que dicha transición se lleve a cabo de manera ambientalmente responsable, contribuyendo así al desarrollo sostenible a largo plazo.

Tabla 9. Actores clave, fondos de inversión e indicadores.

Actores clave	Fondos de inversión	Indicadores recomendados
• Juntas de Acción Comunal. • Corporaciones autónomas regionales. • Organizaciones comunitarias • Gremios o asociación de campesinos de distintos sectores productivos. • Empresa concesionada para los proyectos energéticos. • Instituciones educativas y de investigación. • ONG Ambientales.	• Financiamiento en el desarrollo de zonas PDET y ZOMAC. • Respaldo financiero mediante Programas de Responsabilidad Social Empresarial (RSE). • FINAGRO: Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario. • COLCIENCIAS: Co-financiación de Proyectos de Innovación y Desarrollo Empresarial.	• Áreas intervenidas para su conservación. • Parámetros de suelo, humedad, capacidad de retención entre otras. • Áreas de cultivo. • Cantidad de agua retenida en pozos y reservorios.

6.5.1. Identificación de zonas de proyectos energéticos en el POT

Dependiendo del número de habitantes del respectivo municipio al momento de formular el POT o de su respectiva revisión general, la Ley 1454 de 2011 ha previsto que los POT se denominen así [76]: se denomina Plan de Ordenamiento Territorial (POT) a aquellos aplicables a distritos y municipios con una población superior a cien mil (100.000) habitantes. Se designa como Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) a los correspondientes a distritos y municipios cuya población oscile entre treinta mil (30.000) y cien mil (100.000) habitantes. El término Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) se utiliza para distritos y municipios con una población inferior a treinta mil (30.000) habitantes.

En Colombia, los proyectos relacionados con la energía solar fotovoltaica constituyen un subsector en desarrollo dentro del ámbito de la explotación de fuentes de energía alternativa. De una forma prospectiva, se sugiere establecer pautas que incorporen la dimensión de energías alternativas en los planes de ordenamiento territorial a nivel municipal y departamental. Esto implica una identificación específica de zonas basada en

el potencial energético de biomasa residual, radiación solar, viento y potencial hidro energético. Además, se destaca la necesidad de definir el uso posterior de las áreas liberadas en los procesos de clausura de dichas instalaciones.

Para analizar proyectos de parques solares en relación con la planificación territorial, se sugiere considerar los siguientes aspectos en la formulación del POT:

1) Temporalidad: dado que los proyectos de energía solar suelen tener una vida útil de 25 a 30 años, se hace necesario planificar los POT con vigencia de largo plazo, superando la vigencia típica de los POT, que es de 12 años.
2) Potencial energético del municipio y/o departamento: es esencial aprovechar estratégicamente la capacidad energética del territorio, designando áreas específicas para proyectos de energía renovable sin obstaculizar el desarrollo económico en otras industrias ni los usos destinados al suelo en el POT .
3) Influencia espacial e impactos sinérgicos: se debe considerar la evaluación ambiental estratégica, que abarque el conjunto de proyectos y sus interacciones, para comprender los efectos acumulativos, bien sean positivos o negativos. Esto implica evaluar no solo cada proyecto de manera aislada, sino también su impacto combinado en el entorno.
4) Participación comunitaria: para la formulación de los POT se recomienda incluir la participación de las comunidades en áreas de influencia directa, para el caso de proyectos de carácter significativo en los ámbitos económico, social y ambiental en el territorio. Se debe procurar la aplicación de la Ley Estatutaria 1757 de 2015, que incluye la posibilidad de usar mecanismos como los cabildos abiertos o las consultas populares y la Ley 388 de 1997 (Ley de Desarrollo Territorial), que dispone de espacios y tiempos específicos para la participación y concertación público-privada. Con la participación comunitaria se esperaría impulsar procesos de revitalización de barrios, desarrollo de oportunidades productivas y económicas con enfoque de simbiosis industrial de residuos y economía circular.
5) Información complementaria: la formulación de los POT debe incluir las políticas de ordenamiento social de la propiedad rural formuladas por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural con las cuales se gestiona el acceso a las tierras como factor productivo, se logra la seguridad jurídica y se promueve el uso en cumplimiento de la función social de la propiedad [77].

6.6. Diagnóstico de planificación territorial

Ciénaga: Parque solar "Caimán Cienaguero"

Mediante la revisión de información se identificó que el municipio de Ciénaga formuló su Plan de Ordenamiento Territorial, adoptado mediante Acuerdo Municipal N° 022 de

noviembre 13 de 2001 y en el 2010 emprendió la revisión excepcional de las normas urbanísticas del POT, sin embargo, no se tiene información oficial acerca de si fue actualizado u elaborado un nuevo POT [77].

Fundación: Parque solar "Nabusimake"

En el municipio de Fundación se adoptó el plan básico de ordenamiento territorial PBOT para los años 2000-2009 [78]. Se puede mencionar que en el Plan de Desarrollo Municipal 2020 – 2023 "Fundación sigue avanzando" se estipuló que se impulsaría la adopción de un nuevo PBOT, sin embargo, no se tiene información oficial acerca de si fue actualizado u elaborado [79].

Paso: Parque solar "El paso"

Se elaboró el Plan Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de El Paso 2000 – 2009 "Entre Todos Podemos Gestionar un Desarrollo Ordenado" [80] y posteriormente se realizó proceso de revisión, ajuste y/o modificación del esquema de ordenamiento territorial del municipio [81], para luego continuar con el proceso de actualización [82], hasta el momento no se tiene información oficial de la última actualización realizada.

Tabla 10. Actores clave, inversión asociada y retos probables.

Actores clave	Inversión asociada	Retos
Actores Públicos: Alcaldía de Ciénaga, Alcaldía de Fundación, Alcaldía del paso, Gobernación del Magdalena, Gobernación del Cesar, Agencia nacional de tierras, Corpamag, Corpocesar, consejos territoriales y municipales. Actores Privados: Gremios económicos, inversionistas, promotores y propietarios. Actores Comunitarios: Población en general, grupos étnicos, resguardos y otros.	Los alcaldes de los municipios y distritos son los encargados de formular los POT y por ende designar la inversión económica para la realización de estos.	• Capacidad técnica e institucional del municipio para formular los POT. • Capacidad financiera del municipio para formular los POT. • Participación de los actores públicos, privados y comunitarios. • Ausencia de planes complementarios para la formulación del POT. • Información inexistente de pasivos ambientales e impactos sinérgicos de proyectos estratégicos en el territorio. • Conflicto de usos de suelo designados y la inclusión de suelos para el aprovechamiento de las energías renovables.

6.7. Socializaciones comunitarias de las medidas de manejo ambiental implementadas por la empresa

Las medidas de manejo ambiental que se aplican al cierre de los parques solares son muy importantes para cuidar el medio ambiente y los recursos naturales de la región del corredor vida César-Magdalena. Por eso, las empresas que operan estos parques solares deben informar y consultar a la comunidad sobre el proceso de cierre y los beneficios que traerá para el desarrollo sostenible. Las corporaciones autónomas regionales (CAR) son las entidades que vigilan y apoyan este proceso, y pueden establecer convenios con las empresas para que los proyectos que se realicen en el área de influencia tengan un impacto ambiental positivo y controlado. Para lograr una buena comunicación con la comunidad, las CAR y las empresas deben usar un lenguaje claro, sencillo, inclusivo y adaptado a la cultura local, tanto en forma oral como escrita, y tener en cuenta las necesidades de las personas con discapacidad auditiva y visual. Así se garantiza la transparencia y la participación de todos los actores involucrados en el cierre de los parques solares.

A continuación, en la Tabla 11 se proponen diversas estrategias de socialización para informar y sensibilizar a las comunidades aledañas sobre los beneficios y los impactos de los parques solares, así como para promover su participación e integración en los proyectos, esto con iniciativa de los principales actores involucrados en la gestión de tres parques solares ubicados en el departamento del Cesar y Magdalena (Parque Solar el Paso, Parque Solar Caimán Cienaguero y Parque Nabusimake), puesto que son las responsables de la instalación, operación y mantenimiento de los paneles solares, junto con las autoridades regionales ambientales.

Tabla 11. Actores principales y escenarios propuestos de socialización.

Actores principales	Comunidad afectada	Escenarios de socialización
Empresas: -Enel Green Power Colombia S.A.S -Green Yellow energía de Colombia S.A.S -Latamsolar fotovoltaica fundación S.A.S. **Autoridades ambientales:** -Corpamag -Corpocesar	-Lideres comunales -Lideres municipales -Comunidades campesinas -Red de mujeres del municipio El Paso -Asociaciones sin ánimo de lucro -Comunidades indígenas -Comunidades territorios colectivos	-Rendición de cuenta -Boletines informativos semestrales -Reuniones públicas -Consejos comunitarios -Asambleas -Plataformas digitales -Medios de comunicación masivos -Centro de información y atención -Exposiciones de proyectos

En conclusión, la socialización comunitaria es un aspecto clave de las medidas de gestión ambiental implementadas por las empresas para cerrar parques solares al final de su vida útil. Al involucrar a la comunidad local en el proceso, las empresas pueden garantizar que sus esfuerzos estén alineados con las necesidades y expectativas de las personas que viven en el área, y también pueden generar confianza y buena voluntad hacia la empresa.

6.8. PROCEDA

Los parques solares son una oportunidad para el desarrollo ambiental y social de las regiones donde se ubican. Estos proyectos generan energía limpia y contribuyen a la mitigación del cambio climático, pero también implican retos y responsabilidades para su adecuada gestión. Por eso, es importante que las entidades públicas y privadas que participan en su implementación y operación articulen acciones con las comunidades locales para promover su participación y empoderamiento en la gestión ambiental. Una de las formas de lograrlo es a través de programas educativos y de aprovechamiento comunitario que se enfoquen en los procesos de cierre de parques solares al final de su vida útil.

Estos programas pueden diseñarse e implementarse con el apoyo de las Corporaciones Autónomas Regionales de los parques solares del corredor vida César-Magdalena y con la alianza de instituciones educativas públicas, entidades privadas, comunidades afectadas (Ver Tabla 12).

Tabla 12. Actores clave y fuentes de inversión para programas Proceda.

Actores claves	Fuentes de inversión
-Corpocesar -Corpamag -Sena -Instituciones educativas -Instituciones de educación - superior -Corporaciones educativas -CNR -Prodeco -Drummond LTD -Enel Green Power -Pastoral social -Portafolio verde -Lideres comunales -Lideres sociales -Red de mujeres del municipio El Paso -Asociaciones sin ánimo de lucro -Comunidades campesinas	-El Fondo Colombia Sostenible (FCS): El país dispone de la colaboración entre diversas naciones, la cual brinda asistencia a proyectos que contribuyan a la estrategia de desarrollo sostenible [83]. -Programas de financiamiento de la Administración de Pequeñas Empresas (SBA): apoyan a las empresas pequeñas que realizan investigaciones científicas vinculadas a objetivos investigación y desarrollo y que cuentan con alto potencial de mercado si logran resultados exitosos [84]. -Compromiso Empresarial para el Reciclaje (CEMPRE): organización que se encarga del proyecto "Pacto por el plástico" en Colombia, con el objetivo de impulsar la economía circular mediante inversiones [85]. -BANCOLDEX: entidad financiera que destina recursos ámbito de la bioeconomía proyectos de generación de energía a partir de biomasa y de residuos sólidos y líquidos [86].

	-Negocios Verdes de Corpamag: este programa busca ayudar a mejorar la oferta y demanda de productos y servicios verdes en todo el país, nacional e internacional [87]. -Fondo Emprender del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA): brinda apoyo financiero y técnico para que se puedan desarrollar proyectos de forma exitosa y sostenible, bien sea que se trate de reutilizar o reciclar materiales, entre otras opciones innovadoras.

Algunas propuestas que se podrían desarrollar son:

- ✓ Talleres, cursos, capacitaciones o actividades que sensibilicen a la población sobre la importancia de la energía renovable y los beneficios de los parques solares para el desarrollo sostenible.
- ✓ Talleres, cursos, capacitaciones o actividades que enseñen a la población cómo aprovechar los residuos generados por los paneles solares al final de su vida útil, mediante el reciclaje y la reutilización.
- ✓ Espacios de diálogo y concertación entre la comunidad y las entidades involucradas en los parques solares, para fomentar la corresponsabilidad en la gestión ambiental y el uso sostenible de los recursos naturales.
- ✓ Capacitaciones para el fortalecimiento de capacidades productivas y emprendedoras de la comunidad, basadas en el reciclaje y la reutilización de residuos de paneles solares al final de su vida útil.

Figura 3637. Emprendimiento comunitario, Casa del Adulto Mayor, La Loma (Cesar).

Estas propuestas pueden contribuir a generar valor social y ambiental a partir de los parques solares, y a fortalecer el vínculo entre la comunidad y el territorio.

6.9. Planes de sostenimiento sociocultural y diversificación económica

La pérdida de las tradiciones y dinámicas sociales que se llevaban a cabo en las comunidades antes de la construcción de los parques solares pueden verse afectadas por factores como el acaparamiento de tierras, mayoritariamente agrícolas, durante un tiempo significativamente prolongado, 25 o 30 años; afectaciones ambientales en torno al desarrollo del sector (islas de calor a causa de la reflexión de la luz que genera los parques por ejemplo); la llegada de oleadas de personas externas a la comunidad con diferentes culturas y con mayor poder adquisitivo, que puede influir tanto positiva como negativamente en la dinámica social de la comunidad, entre otros aspectos. Por estas razones es fundamental proponer estrategias que contribuyan a proteger estas tradiciones, vocaciones, culturas, formas de vida y la soberanía en el territorio de la población original antes de la llegada de los parques solares. Para ello se propone la conformación de una serie de estrategias atendiendo a los distintos aspectos anteriormente mencionados.

Protección y promoción del sector agrícola: Al disminuir el uso de tierras de vocación agrícola para dar paso a la conformación del sector energético solar, es esencial implementar programas y políticas que puedan apoyar las prácticas agrícolas como lo son la implementación de fondos destinados a la modernización y eficiencia en la producción de este sector, a su vez, destinar recursos para la conformación o fortalecimiento de asociaciones o cooperativas entre pequeños agricultores, que contribuyan a adquirir mejores condiciones, tanto en la calidad y precio de maquinarias, semillas, abonos y todo tipo de insumos, tener mayor accesibilidad de proveerse en asistencia técnica y profesional, que mejoren el desarrollo de sus actividades, como también, tener mayor competitividad y capacidad de establecer la producción a precios convenientes en el mercado interno e internacional, de tal forma que se incentive el desarrollo del sector agrícola en los territorios evitando la dependencia de grandes proyectos energéticos y así contar con una mayor matriz económica.

Infraestructuras que contrarresten el aumento de temperatura producidas por las islas de calor: se dio a conocer por parte de las comunidades aledañas al parque, el aumento de la temperatura de los centros poblados producidos por el complejo solar, esto se ve respaldado con la opinión de algunos investigadores respecto al tema, según investigadores como Pavao-Zuckerman, de la Universidad de Maryland menciona que "los paneles fotovoltaicos absorben y reflejan ciertos tipos de radiación que impide que el suelo debajo se refrigere como lo haría bajo un cielo nocturno regular" [88].

En este contexto se produce el fenómeno de isla de calor, que es el aumento de la temperatura en áreas urbanas en comparación con sus áreas circundantes, en este caso el aumento de temperaturas en las poblaciones aledañas al parque solar bien sea por la reflexión de la radiación solar o la deforestación de grandes áreas para su operación o la combinación de ambas. Independientemente de las causas, esto puede afectar la forma en que las personas utilizan el espacio público. Por ejemplo, las altas temperaturas pueden disuadir a las personas de participar en actividades al aire libre, afectando la cohesión social y el disfrute del entorno urbano, como se expresó en el estudio de caso de las comunidades, en el cual los habitantes mencionaban que preferían quedarse en sus hogares antes de salir a las calles en temporadas que anteriormente solían salir habitualmente.

Ante este panorama es fundamental establecer algunos planes o proyectos que ayuden a contrarrestar este fenómeno, para así asegurar la cohesión social y el disfrute del entorno urbano en estas poblaciones, por lo que se propone fomentar la creación y mejora de áreas verdes y sociales dentro de las zonas urbanas, parques, plazas y corredores peatonales de alta concurrencia, mediante estructuras que proporcionen sombra, esto puede incluir la plantación de árboles, la construcción de pérgolas o la instalación de toldos que permitan que estos espacios proporcionen lugares frescos y agradables para la interacción social.

Creación de casas de cultura: es fundamental para asegurar la preservación cultural de las comunidades, la creación de espacios que funcionen como centros dinámicos que permitan el enriquecimiento social, cultural y educativo de las poblaciones mediante la expresión artística, el aprendizaje continuo y la participación comunitaria. La conformación de estos espacios, se vuelve aún más crucial en el contexto de comunidades que experimentan oleadas significativas de personas externas por la generación de grandes proyectos, como lo son los parques solares, puesto que este fenómeno puede influir significativamente en la dinámica cultural y social del pueblo, estos espacios desempeñan un papel esencial al contribuir a la preservación cultural, ofreciendo un refugio para las tradiciones y valores arraigados en la identidad local, a su vez estos espacios buscan facilitar la comprensión mutua y el diálogo intercultural, proporcionan un espacio inclusivo donde las diferentes culturas pueden converger y enriquecerse mutuamente.

Tabla 13. Actores clave y fuentes de inversión para apoyo cultural.

Actores claves	Fuentes de financiamiento
• Juntas de Acción Comunal. • Corporaciones autónomas regionales. • Organizaciones comunitarias.	Ministerio de Cultura y Deporte. INAEM: lanza tradicionalmente programas de apoyo a la danza, música, teatro lírico y circo.

• Gremios o asociación de campesinos de distintos sectores productivos. • Empresa concesionada para los proyectos energéticos. • Comunidad en general, niños, adultos y adultos mayores. • Grupos artísticos. • ONG Ambientales.	Fundaciones privadas que presentan apoyos a la conformación artística, como la fundación BBVA, Art of Change, Carasso, Santander y Loewe, entre otras.

6.10. Transición sostenible: tecnologías emergentes para la operación y cierre de parques solares.

Las nuevas tecnologías relacionadas con el cierre de parques solares están jugando un papel importante en fomentar la circularidad y la sostenibilidad en este proceso. La innovación en este campo se ha centrado en encontrar soluciones que permitan el desmantelamiento y reciclaje eficiente de los materiales utilizados en los parques solares, así como en la gestión sostenible de los residuos generados durante este proceso. Por eso, el cierre de parques solares es un desafío ambiental y económico que requiere de tecnologías emergentes que faciliten su gestión. Algunas de estas tecnologías son:

- Blockchain para Rastreabilidad: la tecnología blockchain puede utilizarse para registrar una cadena de suministro de materiales reciclados y reutilizados, garantizando la trazabilidad y sostenibilidad del proceso [89].
- Reutilización de Infraestructura: tecnologías que permiten la reutilización de componentes, como inversores y estructuras de soporte, en nuevos proyectos solares o en otras aplicaciones, prolongando la utilidad de estos elementos.
- Parques solares flotantes: los parques solares se usan para generar energía limpia en procesos de desalinización, lo que ayuda a reducir la huella de carbono en la generación de energía [88].

En resumen, las tecnologías emergentes relacionadas con el cierre de parques solares están impulsando la transición hacia un modelo más sostenible y circular en la industria solar, al promover la reutilización, reciclaje y gestión sostenible de los materiales utilizados en estos sistemas. Estas innovaciones no solo tienen el potencial de reducir el impacto ambiental de la energía solar, sino también de fomentar la creación de cadenas de valor más sostenibles y resilientes en el sector energético.

BIBLIOGRAFÍA

[1] K. Anusuya, K. Vijayakumar, y S. Manikandan, «From efficiency to eternity: A holistic review of photovoltaic panel degradation and End-of-Life management», *Solar Energy*, vol. 265, p. 112135, nov. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.112135.

[2] Md. S. Chowdhury *et al.*, «An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling», *Energy Strategy Reviews*, vol. 27, p. 100431, ene. 2020, doi: 10.1016/j.esr.2019.100431.

[3] G. A. Heath *et al.*, «Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy», *Nat Energy*, vol. 5, n.º 7, pp. 502-510, jul. 2020, doi: 10.1038/s41560-020-0645-2.

[4] D. Sica, O. Malandrino, S. Supino, M. Testa, y M. C. Lucchetti, «Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2934-2945, feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.039.

[5] H.-L. Daniela-Abigail *et al.*, «Does recycling solar panels make this renewable resource sustainable? Evidence supported by environmental, economic, and social dimensions», *Sustain Cities Soc*, vol. 77, p. 103539, feb. 2022, doi: 10.1016/j.scs.2021.103539.

[6] Great Plains Institute, «Repowering and Decommissioning: What Happens in Communities When Solar and Wind Projects End?»

[7] D. Mathur, R. Gregory, y M. Imran, «Transitioning towards a circular economy solar energy system in Northern Australia: insights from a multi-level perspective», *Australian Planner*, vol. 58, n.º 3-4, pp. 115-122, oct. 2022, doi: 10.1080/07293682.2023.2200956.

[8] DNP, «Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026». Accedido: 25 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.dnp.gov.co/plan-nacional-desarrollo/pnd-2022-2026

[9] DNP, «Principales metas del PND 2023-2026». Accedido: 25 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-02-23-METAS.pdf

[10] H. F. Yu, Md. Hasanuzzaman, N. A. Rahim, N. Amin, y N. Nor Adzman, «Global Challenges and Prospects of Photovoltaic Materials Disposal and Recycling: A Comprehensive Review», *Sustainability*, vol. 14, n.º 14, p. 8567, jul. 2022, doi: 10.3390/su14148567.

[11] N. M. De Sousa, C. B. Oliveira, y D. Cunha, «Photovoltaic electronic waste in Brazil: Circular economy challenges, potential and obstacles», *Social Sciences & Humanities Open*, vol. 7, n.º 1, p. 100456, 2023, doi: 10.1016/j.ssaho.2023.100456.

[12] A. Ali, S. A. Malik, M. Shafiullah, M. Z. Malik, y M. H. Zahir, «Policies and regulations for solar photovoltaic end-of-life waste management: Insights from China and the USA», *Chemosphere*, vol. 340, p. 139840, nov. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139840.

[13] Y. Xu, J. Li, Q. Tan, A. L. Peters, y C. Yang, «Global status of recycling waste solar panels: A review», *Waste Management*, vol. 75, pp. 450-458, may 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.01.036.

[14] Md. S. Chowdhury *et al.*, «An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling», *Energy Strategy Reviews*, vol. 27, p. 100431, ene. 2020, doi: 10.1016/j.esr.2019.100431.

[15] C. E. EMR, «Mercado de Energía Solar en Colombia, 2024 - 2032», Sheridan. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-energia-solar-en-colombia

[16] D. Escobar, A. López, Á. Camacho, y E. Camelo, «Política nacional para la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)», 2017.

[17] S. Rodriguez, «Plan de manejo para disposición final de paneles solares de Energía Integral Andina S.A..», Bogotá , nov. 2018. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/3246/Rodriguez_Blanco_Santiago_Eduardo_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[18] V.M. Fthenakis, E.A. Alsema, y Wild-Scholten, «LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PHOTOVOLTAICS: PERCEPTIONS, NEEDS, AND CHALLENGES», Orlando, 2005. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://web.archive.org/web/20090521070643/http:/www.nrel.gov:80/pv/thin_film/docs/fthenakis_alsema_dewild_ieee_pvsc_2005.pdf

[19] V. Fthenakis y E. Alsema, «Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004–early 2005 Status», ene. 2006. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: http://www.clca.columbia.edu/papers/Photovoltaic_Energy_Payback_Times.pdf

[20] A. Stoppato, «Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation», *Energy*, vol. 33, n.º 2, pp. 224-232, feb. 2008, doi: 10.1016/j.energy.2007.11.012.

[21] V. M. Fthenakis, H. C. Kim, y E. Alsema, «Emissions from Photovoltaic Life Cycles», *Environ Sci Technol*, vol. 42, n.º 6, pp. 2168-2174, mar. 2008, doi: 10.1021/es071763q.

[22] M. Ito, K. Kato, K. Komoto, T. Kichimi, y K. Kurokawa, «A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules», *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 16, n.º 1, pp. 17-30, ene. 2008, doi: 10.1002/pip.770.

[23] Estaban Rosa, I. Lengua, y S. Estellés, «Sostenibilidad en la gestión de residuos de paneles solares en España», Valencia, nov. 2022. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/193460/EstebanEstebanLengua%20-%20Sostenibilidad%20en%20la%20gestion%20de%20residuos%20de%20paneles%20solares%20en%20Espana.pdf?sequence=1

[24] M. M. Sierra Céspedes, C. L. Vásquez Stanescu, y R. Ramírez Pisco, «Disposición final e impacto ambiental de las celdas fotovoltaicas», *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, pp. 74-90, 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.36089.60004/1.

[25] N. Jungbluth, «Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss ecoinvent database», *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 13, n.º 5, pp. 429-446, ago. 2005, doi: 10.1002/pip.614.

[26] G. Moraga, S. Huysveld, S. De Meester, y J. Dewulf, «Development of circularity indicators based on the in-use occupation of materials», *J Clean Prod*, vol. 279, p. 123889, ene. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123889.

[27] C. E. L. Latunussa, F. Ardente, G. A. Blengini, y L. Mancini, «Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 156, pp. 101-111, nov. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.03.020.

[28] A. Salvi, V. Arosio, L. Monzio Compagnoni, I. Cubiña, G. Scaccabarozzi, y G. Dotelli, «Considering the environmental impact of circular strategies: A dynamic combination of material efficiency and LCA», *J Clean Prod*, vol. 387, p. 135850, feb. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.135850.

[29] C. Padilla y A. Felipe, «Estrategias de aprovechamiento de residuos sólidos producidos por las celdas fotovoltaicas en el aprovechamiento de la energía solar en proyectos de producción más limpia en Colombia», oct. 2021. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8736

[30] S. Calnan, «Applications of Oxide Coatings in Photovoltaic Devices», *Coatings*, vol. 4, n.º 1, pp. 162-202, mar. 2014, doi: 10.3390/coatings4010162.

[31] S. Weckend, A. Wade, y G. Heath, «End-of-life Management Solar Photovoltaic Panels», jun. 2016. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf?rev=49a75178e38c46288a18753346fb0b09

[32] Presidente de la República de Colombia, «Decreto 1076 de 2015», 2015.

[33] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Políticas Públicas Ambientales», 2020. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/planeacion-y-seguimiento/politicas-publicas-ambientales/

[34] «CONSTITUCIÓN POLÍTICA 1991», Bogotá , jul. 1991. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Constitucion/1687988

[35] Congreso de Colombia, «Ley 99 de 1993». Accedido: 24 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297

[36] Congreso de Colombia, «Ley 1715 de 2014», 2014.

[37] Congreso de la República, «Ley 1672 de 2013», 2013.

[38] Presidente de la República de Colombia, «Decreto 1076 de 2015», 2015.

[39] Congreso de Colombia, «Ley 2327 de 2023», 2023.

[40] Congreso de Colombia, «Ley 1252 de 2008», 2008.

[41] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Resolución 1257 de 2021», Bogotá , nov. 2021. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1257-de-2021.pdf

[42] V. Y. D. T. MINISTRA DE AMBIENTE, «Resolución 361 de 2011», 2011.

[43] Incontec, *NTC 2883:2006*. 2006. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://tienda.icontec.org/gp-modulos-fotovoltaicos-fv-de-silicio-cristalino-para-aplicacion-terrestre-calificacion-del-diseno-y-aprobacion-de-tipo-ntc2883-2006.html

[44] A. Santiago, R. Morales, y O. Mauricio Hernández Gómez, «Síntesis de la Normatividad Colombiana Para Instalaciones Solares Fotovoltaicas».

[45] Incontec, *NTC 5464 de 2010*. 2020. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://tienda.icontec.org/gp-modulos-fotovoltaicos-fv-de-lamina-delgada-para-uso-terrestre-calificacion-del-diseno-y-homologacion-ntc5464-2010.html

[46] J. Manuel Santos Calderón *et al.*, «CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL CONPES 3874». Accedido: 2 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf

[47] P. De y T. Energética, «CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL CONPES 4075». Accedido: 2 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4075.pdf

[48] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, «Resolución 0851 del 2022», 2022. Accedido: 2 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/08/Resolucion-0851-de-2022.pdf

[49] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Política nacional gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*. Bogotá, D.C.: Colombia., 2017. Accedido: 2 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica_RAEE.pdf

[50] Victoria Eugenia De la Cruz Torres, «Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: "Colombia potencia mundial de la vida"», 2023.

[51] M. Wit, J. Hoogzaad, y Caspar von Daniels, «The Circularity Gap Report 2020 », ene. 2020. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://pacecircular.org/sites/default/files/2020-01/Circularity%20Gap%20Report%202020.pdf

[52] A. Ali, S. A. Malik, M. Shafiullah, M. Z. Malik, y M. H. Zahir, «Policies and regulations for solar photovoltaic end-of-life waste management: Insights from China and the USA», *Chemosphere*, vol. 340, p. 139840, nov. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139840.

[53] ab 作者808, «Normas nacionales de requisitos técnicos generales para el reciclaje de módulos fotovoltaicos.», 2022.

[54] EDF ENR, «Reciclaje de paneles solares fotovoltaicos: ¿cómo funciona?»

[55] República francesa, «LEY 2020-105», 2020.

[56] A. Arya y A. Bhutani, «ESTUDIO COMPARADO DE LEGISLACIÓN INTERNACIONAL SOBRE ECONOMÍA CIRCULAR: RELEVANCIA POTENCIAL PARA COSTA RICA Y RECOMENDACIONES PARA LEGISLADORES.», 2022. Accedido: 22 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.undp.org/es/costa-rica/publications/legislaci%C3%B3n-internacional-sobre-econom%C3%ADa-circular

[57] República francesa, «Decreto N° 2014-928», 2014.

[58] M. Franch, «Gestión de Envases y Embalajes en Alemania», 2023. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.ahk.es/es/servicios/consultoria-de-mercado/gestion-de-envases-y-embalajes-en-alemania

[59] Deutsche Recycling, «ElektroG: ¿Qué regula la Ley alemana de aparatos eléctricos y electrónicos? Lo que el productor y el distribuidor deben saber», 2022. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En

línea]. Disponible en: https://deutsche-recycling.es/blog/elektrog-que-regula-la-ley-alemana-de-aparatos-electricos-y-electronicos/

[60] Deutsche Recycling, «La nueva Ley alemana de baterías (Batteriegesetz 2021, BattG2). Los cambios más importantes para los fabricantes y distribuidores de baterías y acumuladores», 2022. Accedido: 26 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://deutsche-recycling.es/blog/nueva-ley-alemana-de-baterias/

[61] L. R. Dominicana, «Decreto 253-23».

[62] Ricardo Casarín, «Presentan en el Senado proyecto de ley sobre reciclaje de paneles solares», 2023.

[63] elEconomista.es, «Una sentencia obliga a Iberdrola a desmantelar la planta fotovoltaica más grande de Europa», 15 de junio de 2022. Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.eleconomista.es/energia/amp/11820266/Una-sentencia-obliga-a-Iberdrola-a-desmantelar-la-planta-fotovoltaica-mas-grande-de-Europa-

[64] N. Ortega, «El Gobierno entierra la construcción de una megaplanta solar en Chiva y Godelleta», Valencia, 21 de agosto de 2023. Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.lasprovincias.es/economia/planta-solar-chiva-godelleta-20230821114925-nt.html

[65] V. Guillou, «Un parque de 332 mil paneles solares: Asset Chile vende planta de empresa que cayó en quiebra», 10 de noviembre de 2023. Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.latercera.com/pulso-pm/noticia/un-parque-de-332-mil-paneles-solares-asset-chile-vende-planta-de-empresa-que-cayo-en-quiebra/XGD4V4RA3FGUBNKPBNN2I7IQ54/

[66] L. Quiroga, «Otra compañía renuncia a proyecto solar en Colombia: tributaria y licencia, las razones», Bogotá , 6 de octubre de 2023. Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.eltiempo.com/amp/economia/empresas/otra-compania-renuncia-a-proyecto-solar-en-colombia-tributaria-y-licencia-las-razones-812930

[67] apnews, «Plans for largest US solar field north of Vegas scrapped», 23 de julio de 2021. Accedido: 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://apnews.com/article/technology-government-and-politics-environment-and-nature-las-vegas-nevada-9bf3640dfefbc6f7f45a97c6810f5ff7

[68] La jornada de oriente, «Implementa Nueva Xcala programa de conservación de suelo y agua».

[69] J. D. Marín-Jiménez y P. J. González-Cruz, «Lecciones aprendidas del diseño de parques solares fotovoltaicos: Un enfoque de las características técnicas», *I+D Tecnológico* , vol. 16, n.º 1, 2020. doi: https://doi.org/10.33412/idt.v16.1.2440.

[70] WikiArquitectura, «Jardín Botánico de Taiyuan», TAIYUAN, 2021. Accedido: 10 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://es.wikiarquitectura.com/edificio/jardin-botanico-de-taiyuan/

[71] La Jornada de Oriente, «Implementa Nueva Xcala programa de conservación de suelo y agua», nov. 2023. Accedido: 10 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.lajornadadeoriente.com.mx/tlaxcala/implementa-nueva-xcala-programa-de-conservacion-de-suelo-y-agua/

[72] Unesco, «Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018: soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua», París, 2018. Accedido: 11 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en:

unesdoc.unesco.org/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_7e99b75b-efad-4db2-8cc3-da0007893705?_=261494spa.pdf&to=168&from=1

[73] S. Martos, A. Durán, M. Castro, y J. Vélez, «La Siembra y Cosecha del Agua en Iberoamérica; un sistema ancestral de gestión del agua que utiliza Soluciones Basadas en la Naturaleza», feb. 2020. Accedido: 11 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.icog.es/TyT/index.php/2020/02/la-siembra-y-cosecha-del-agua-en-iberoamerica-un-sistema-ancestral-de-gestion-del-agua-que-utiliza-soluciones-basadas-en-la-naturaleza/

[74] M. Fernanda Suárez Londoño *et al.*, *Lineamientos para incorporar la dimensión minero energética en los planes de ordenamiento territorial municipal*, Versión formuladores. 2019. [En línea]. Disponible en: www.estudiozuka.com

[75] AQUAVOLTAICA, «AQUAVOLTAICA BASIC RECOLECCIÓN DE AGUAS PLUVIALES EN PLANTAS FOTOVOLTAICAS». Accedido: 12 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.aquavoltaica.com/

[76] M. Fernanda Suárez Londoño *et al.*, *Lineamientos para incorporar la dimensión minero energética en los planes de ordenamiento territorial municipal*, Versión formuladores. 2019. [En línea]. Disponible en: www.estudiozuka.com

[77] MUNICIPIO DE CIÉNAGA y SECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA Y DESARROLLO ECONÓMICO SOSTENIBLE, «PROYECTO DE REVISIÓN Y AJUSTES DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL – DEL MUNICIPIO DE CIÉNAGA», 2010. Accedido: 12 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.cienaga-magdalena.gov.co/Ciudadanos/ProyectosNormatividad/Proyecto%20de%20Revisi%C3%B3n%20y%20Ajustes%20del%20Plan%20de%20Ordenamiento%20Territorial%20-%20POT.pdf

[78] Alcaldía Municipal de Fundación Magdalena, «Plan de Ordenamiento Básico Territorial Fundación Magdalena 2000 - 2009: PBOT Fundación Magdalena 2000 - 2009», 2000. Accedido: 12 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/123456789/10268

[79] Alcaldía municipal de Fundación, «PLAN DE DESARROLLO MUNICIPAL 2023 FUNDACION SIGUE AVANZANDO». Accedido: 12 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://fundacion-magdalena.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionyControl/PLAN%20DE%20DESARROLLO.pdf

[80] ALCALDÍA DE EL PASO, «PLAN ESQUEMA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL 2000 - 2009 "ENTRE TODOS PODEMOS GESTIONAR UN DESARROLLO ORDENADO" Diagnostico», 2000. Accedido: 12 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/10307/4177-2.pdf?sequence=2&isAllowed=y

[81] ADMINISTRACIÓN MUNICIPAL DE EL PASO – CESAR y UNION TEMPORAL FORO – UNIVERSIDAD REFORMADA, «PROCESO DE REVISIÓN, AJUSTES Y/O MODIFICACIÓN AL ESQUEMA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL –EOT- DE EL MUNICIPIO DE EL PASO DEPARTAMENTO DEL CESAR.», 2015. Accedido: 12 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Carmen-Meza-

Estrada/publication/322571273_EOT_EL_PASO-CESAR_Mesa_de_Trabajo_Cabecera_Urbana/links/5ac79e54aca272abdc5cf49d/EOT-EL-PASO-CESAR-Mesa-de-Trabajo-Cabecera-Urbana.pdf

[82] Alcaldía municipal de el Paso, «ACTUALIZACIÓN DEL ESQUEMA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL EOT DEL MUNICIPIO DE EL PASO.», 2021.

[83] A. Moreda, A. Flores, A. Risso, y A. Salazar, «El Fondo Colombia Sostenible ». Accedido: 11 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/

[84] SBA, «Programas de financiamiento», Washington. Accedido: 11 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.sba.gov/es/programas-de-financiamiento

[85] M. Gil, «En Cempre tenemos proyectos por US$3 millones para invertir en economía circular», jun. 2022. Accedido: 11 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.larepublica.co/empresas/en-cempre-tenemos-proyectos-por-us-3-millones-para-invertir-en-economia-circular-3381853

[86] A. Rodríguez y R. Aramendis, «El financiamiento de la bioeconomía en América Latina: Identificación de fuentes nacionales, regionales y de cooperación internacional», 2019. Accedido: 11 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/7b2687e5-9a49-49e2-a60d-310239a57678/content

[87] «Negocios Verdes de Corpamag, es una marca registrada.», sep. 2022. Accedido: 11 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://blog.negociosverdes.corpamag.gov.co/#:~:text=Negocios%20Verdes%20de%20Corpamag%2C%20es%20una%20marca%20registrada.&text=Nuestro%20programa%20busca%20brindar%20los,nivel%20regional%2C%20nacional%20e%20internacional

[88] Energy5, «Parques solares flotantes Energías limpias para procesos de desalinización», dic. 2023. Accedido: 10 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://energy5.com/es/parques-solares-flotantes-energias-limpias-para-procesos-de-desalinizacion#anchor-0

[89] SMART ENERGY, «Japón usará blockchain para el reciclaje de paneles solares», ago. 2021. Accedido: 10 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/investigacion/japon-usara-blockchain-para-el-reciclaje-de-paneles-solares

ANEXOS

Anexo 1. Consentimiento informado

Para la grabación de imágenes y voz con fines académicos y de divulgación de investigación social por parte de la Universidad del Magdalena y/o terceros

Lugar y fecha: _____

Yo, _____, con documento de identidad, C.C. N°. _____ de _____, de manera voluntaria y libre autorizo a la Universidad del Magdalena, utilice el material fílmico que provea en la grabación total y/o parcial de mi imagen, voz, opiniones, declaraciones, comentarios y/o reacciones, para su divulgación y/o publicación en la página web, redes sociales y demás canales online y de comunicación de la Universidad del Magdalena o de terceros. En tal sentido, autorizo a que utilice mi imagen grabada a fin de que la misma sea publicada y/o incorporada en los videoclips y/o cualquier otro producto audiovisual, vinculado directa y/o indirectamente al mismo, para los exclusivos fines de divulgación académica de la investigación "Lecciones aprendidas de los cierres: Desde el cierre de Prodeco y hacia una Economía Circular en los cierres de los parques solares en el Corredor Vida del Cesar – Magdalena" Entre la Universidad del Magdalena y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Dejo expresa constancia de que por medio del presente documento, cedo de manera gratuita, el derecho a divulgar mi imagen como actor clave en dicha investigación.

Firma del autorizante: _____

Anexo 2. Encuesta

1. ¿Conoce si hay personas en la comunidad con experiencia en algunas de las siguientes áreas técnicas?
   - Tecnologías de energías renovables
   - Instalación eléctrica
   - Soldadura
   - Habilidades en construcción de obras civiles
   - Otras similares, ¿Cuáles?

   _____

2. ¿Había escuchado sobre el término de "Economía circular"?
   - Sí
   - No

3. ¿Conoce si hay edificaciones, estructuras o lugares clave en el municipio que puedan ser mejorados mediante la reutilización de paneles del parque solar, cuando este llegue al final de su vida útil?
   - Sí
   - No
   - Si la respuesta es positiva, ¿Cuáles?

   _____

4. ¿Conoce si actualmente existen programas educativos o de formación en energías renovables que la comunidad pueda aprovechar?
   - Sí
   - No
   - Si la respuesta es positiva, ¿Cuáles?

   _____

5. ¿Realiza en su vida cotidiana el reciclaje o reutilización de algunos residuos?
   - Sí
   - No
   - Si la respuesta es positiva, ¿Cuáles?

   _____