

Evaluación de impactos ambientales de la instalación, funcionamiento y desmantelamiento de un parque fotovoltaico en La Guajira colombiana

Accésit del IV Premio SEGIB-AECID de investigación sobre Desarrollo Sostenible en Iberoamérica

Laura Estefanía GUERRERO-MARTIN
guerrero.laura.9705@gmail.com
Fundación de Educación Superior San José
(Colombia)

Camilo Andrés GUERRERO-MARTIN
camilo.guerrero@poli.ufrj.br
Universidade Federal do Pará
(Brasil)

Leidy Stefanny CAMACHO-GALINDO
stefa110992@gmail.com
Fundación de Educación Superior San José
(Colombia)

Environmental impact assessment of the installation, operation and dismantling of a photovoltaic park in the Colombian Guajira

IV SEGIB-AECID Secondary Award in Research on Sustainable Development in Ibero-America

Resumen/Abstract

1. Introducción

2. Metodología

2.1. Descripción del proyecto energético

2.2. Determinación del área del proyecto

2.3. Identificación de actividades del proyecto energético

2.4. Identificación de impactos generados

2.5. Signo de los impactos ambientales

2.6. Evaluación de impactos ambientales

2.6.1. Valores otorgados a cada impacto

2.6.2. Clasificación del impacto

3. Resultados

3.1. Impactos en la fase de construcción

3.2. Impactos en la fase de operación

3.3. Impactos en la fase de desmantelamiento

4. Análisis de resultados

4.1. Resultados en la etapa de construcción

4.2. Resultados en la etapa operativa

4.3. Resultados en la etapa de desmantelamiento

5. Conclusiones

6. Bibliografía

Evaluación de impactos ambientales de la instalación, funcionamiento y desmantelamiento de un parque fotovoltaico en La Guajira colombiana

Accésit del IV Premio SEGIB-AECID de investigación sobre Desarrollo Sostenible en Iberoamérica

Laura Estefanía GUERRERO-MARTIN
guerrero.laura.9705@gmail.com
Fundación de Educación Superior San José
(Colombia)

Camilo Andrés GUERRERO-MARTIN
camilo.guerrero@poli.ufrj.br
Universidade Federal do Pará
(Brasil)

Leidy Stefanny CAMACHO-GALINDO
stefa110992@gmail.com
Fundación de Educación Superior San José
(Colombia)

Environmental impact assessment of the installation, operation and dismantling of a photovoltaic park in the Colombian Guajira

IV SEGIB-AECID Secondary Award in Research on Sustainable Development in Ibero-America

Citar como/cite as:

Guerrero-Martin LE, Guerrero-Martin CA, Camacho-Galindo LS (2024). Evaluación de impactos ambientales de la instalación, funcionamiento y desmantelamiento de un parque fotovoltaico en la Guajira colombiana. *Iberoamerican Journal of Development Studies* 13(2):226-253.
DOI: 10.26754/ojs_ried/ijds.10716

Resumen

Las energías renovables son una opción prometedora para la producción de energía, debido a su sostenibilidad y capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque ofrecen ventajas significativas, como ser recursos inagotables y de bajo impacto climático, su adopción se enfrenta a desafíos ambientales y sociales. La fabricación, instalación, operación y desmantelamiento de tecnologías como los paneles solares puede generar residuos y alterar ecosistemas. Por lo tanto, es esencial realizar evaluaciones ambientales integrales en todas las etapas de los proyectos de energía renovable, considerando variables del impacto, como la «intensidad», la «extensión» y la «recuperabilidad» del impacto. En el presente artículo, se realiza una evaluación ambiental de un parque solar en La Guajira (Colombia) con la metodología propuesta por Vicente Conesa y se realiza un análisis de posibles medidas de manejo ambiental que minimicen los impactos negativos, lo que garantiza que el desarrollo de estos proyectos sea sostenible y respetuoso.

Palabras clave: evaluación, impactos ambientales, parque solar fotovoltaico, La Guajira.

Abstract

Renewable energies are a promising option for energy production, due to their sustainability and ability to reduce greenhouse gas emissions. Although they offer significant advantages, such as being inexhaustible resources and low climate impact, their adoption faces environmental and social challenges. The manufacture, installation, operation and decommissioning of technologies such as solar panels can generate waste and disrupt ecosystems. Therefore, it is essential to conduct comprehensive environmental assessments at all stages of renewable energy projects, considering impact variables such as impact «intensity», «extent», and «recoverability». In this article, an environmental assessment of a solar park in La Guajira (Colombia) is conducted using the methodology proposed by Vicente Conesa and an analysis is made of possible environmental management measures to minimize negative impacts, ensuring that the development of these projects is sustainable and respectful.

Keywords: assessment, environmental impacts, solar photovoltaic park, La Guajira.

1 Introducción

El rápido crecimiento económico mundial y el aumento de la población han incrementado la demanda de energía basada en combustibles fósiles, lo que ha generado altas emisiones de gases de efecto invernadero y graves impactos ambientales. Para afrontar esta crisis, se están desarrollando tecnologías energéticas sostenibles, como la energía fotovoltaica, que ofrecen una alternativa renovable y menos perjudicial para el medio ambiente (Mahmud *et al.* 2018).

Debido a esta creciente necesidad de implementación de proyectos de energía solar, se empieza a poner el foco en los impactos ambientales de este tipo de energía. Hernández *et al.* (2014) resaltan que los efectos ambientales de los parques solares varían según la extensión y la vida útil del proyecto, que normalmente se extiende entre veinticinco y cuarenta años.

Por lo anterior, es necesaria una evaluación de impactos ambientales donde se contemplen todas las etapas del proyecto: desde la construcción y adecuación hasta el funcionamiento y la clausura. La evaluación de impactos ambientales se erige como una herramienta esencial en la elaboración de planes de manejo ambiental para abordar los impactos negativos significativos derivados de cualquier tipo de proyecto regido por el Decreto 1076 de 2015 en Colombia (MADS 2015). Es imperativo contar con esta evaluación, especialmente en proyectos vinculados al uso de energías renovables, tales como parques solares, granjas eólicas o proyectos que empleen energía geotérmica.

Contrariamente a lo que pudiera pensarse, los proyectos de producción de energía sustentable de este tipo conllevan impactos ambientales y sociales adversos, que deben ser evaluados a través de metodologías con las que se contemplen aspectos cruciales como la «intensidad», la «extensión», la «reversibilidad» o la «recuperabilidad» de dichos impactos. Esto es vital para determinar la idoneidad del área seleccionada para el proyecto y establecer planes de trabajo con actividades e indicadores específicos para prevenir o mitigar estos impactos ambientales identificados.

Para el presente estudio, se ha elegido la región de La Guajira en la costa caribeña colombiana, la cual destaca por su potencial de radiación solar para las granjas solares. Sin embargo, también es una región diversa en cuanto a su componente biótico, abiótico y socioeconómico, lo cual debe ser considerado en la valoración de los impactos ambientales, prestando especial atención a la fauna y flora de la zona que intervenir.

2 Metodología

Para la valoración de los impactos ambientales, se establecieron los pasos que se observan en la figura 1. En primer lugar, se realiza la identificación de actividades del proyecto energético, en las que resaltan la etapa de construcción y adecuación del terreno hasta la finalización del proyecto; en un segundo paso, se identifican los impactos generados por el uso del suelo y actividades económicas de la zona antes del proyecto y, posteriormente, se procede a la identificación de los impactos generados en todas las etapas del proyecto; en el tercer paso, se identifica la clasificación de naturaleza del impacto (impacto positivo o negativo) y, por último, se realiza la valoración de los impactos estableciendo los impactos significativos, a través de la metodología de Fernández-Vítora *et al.* (1997).

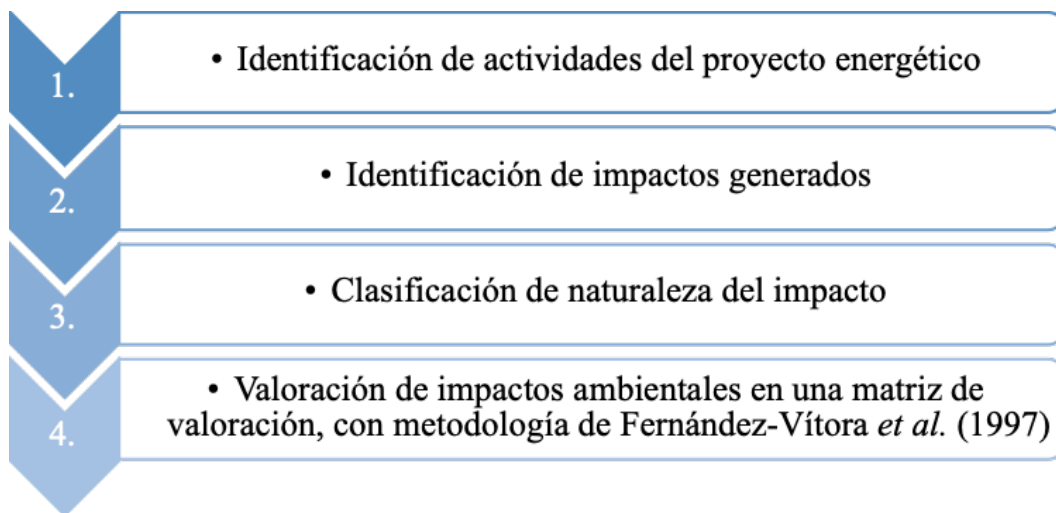


Figura 1
Metodología

Fuente: elaboración propia.

2.1. Descripción del proyecto energético

Para evaluar los impactos, se utilizarán los datos técnicos de un proyecto actualmente en funcionamiento en La Guajira (Colombia), descritos en la resolución número 02153 del 30 de noviembre de 2021 de la ANLA (ANLA 2021). Este proyecto de energía eólica cuenta con aproximadamente 430 000 módulos fotovoltaicos, una potencia nominal de 203 360 megavoltaiamperios, una potencia estimada de 2208 kilovatios-hora/kilovatios pico y una potencia total de 168 megavatios en corriente alterna. El parque ocupa una superficie aproximada de 290 hectáreas, que albergará paneles solares, vías internas y de acceso e infraestructura necesaria.

Se proponen módulos fotovoltaicos de 465 vatios, dispuestos en filas de 72 módulos cada una, con una separación de aproximadamente 4 metros entre filas para facilitar el acceso. Las dimensiones aproximadas de cada panel son de 2015 milímetros × 996 milímetros × 40 milímetros, con un peso de 22,7 kilogramos. La tecnología utilizada es bifacial mono PERC, y los marcos están fabricados en aluminio. Los paneles estarán montados sobre estructuras metálicas con una inclinación adecuada (ANLA 2021).

El proyecto también incluye la construcción de una subestación elevadora y una torre de remate. La subestación contará con celdas de media tensión, armarios de control y protección, sistemas de comunicación y áreas para servicios adicionales, como oficinas, comedores, enfermería, baños portátiles y centro de acopio de residuos. También se desarrollarán edificios para operación y mantenimiento, así como corredores viales internos y externos (ANLA 2021).

2.2. Determinación del área del proyecto

El parque solar evaluado se ubica en el departamento de La Guajira (Colombia), en una zona rural que abarca las veredas La Montaña, Potrerito, Catatumbo y Los Pondones, dentro del municipio de El Molino.

En términos de caracterización ambiental, en la dimensión abiótica, se identifican los tipos de suelo y el uso del suelo. La mayor parte del área del proyecto está destinada a agroecosistemas, seguida por bosques fragmentados y vegetación secundaria. Los tres ecosistemas naturales predominantes en la zona son el bosque andino húmedo, el bosque de galería seco y el bosque subandino seco. El municipio de El Molino destaca como el noveno en La Guajira en términos de cobertura forestal, al albergar el 3 % del bosque del departamento. Además, se caracteriza por contar con áreas protegidas (Usaid 2020).

En cuanto a la dimensión biótica, se han identificado varias especies de fauna. Entre los mamíferos se encuentran el ocelote (*Leopardus pardalis*) y la nutria (*Lontra longicaudis*) y, en el grupo de aves, destaca el martinete verde (*Chloroceryle aenea*).

De acuerdo con Vega Escobar *et al.* (2020), desde una perspectiva socioeconómica, en el Plan de Desarrollo de El Molino, se indica que no se han asignado suficientes recursos para asegurar la participación ciudadana y comunitaria en los procesos del municipio, lo que se debe a deficiencias en la comunicación de información por parte de la Administración.

En el ámbito social, se han observado problemas como la falta de empleo, la desintegración familiar y el aumento de personas desplazadas, lo que ha llevado a un incremento en la deserción escolar y en los niveles de pobreza, entre otros desafíos. Esta situación ha

provocado que algunas personas recurran a actos violentos, como homicidios, asaltos a mano armada, tráfico de armas, cultivos ilícitos, venta de drogas, robo de vehículos, violencia intrafamiliar, consumo excesivo de alcohol y contrabando de mercancías e hidrocarburos.

El municipio se enfrenta a serios desafíos, incluyendo la delincuencia común, la presencia de grupos armados y una falta de oportunidades laborales, lo que afecta negativamente al bienestar general de la población. Aunque el desempleo ha aumentado, sigue siendo una preocupación importante. Además, hay un creciente número de casos de depresión y suicidio, especialmente entre los jóvenes, lo que ha generado preocupaciones sobre la salud mental en la comunidad (Vega Escobar *et al.* 2020).

Esta región cuenta con un significativo potencial para desarrollar los recursos energéticos eólicos y solares. Aunque la radiación solar varía a lo largo del año, con los meses de mayor radiación entre mayo y agosto, la tecnología moderna puede compensar las fluctuaciones estacionales. Las comunidades de la región de La Guajira se enfrentan a desafíos para acceder a electricidad del sistema interconectado, debido a la distancia y la dificultad en la instalación y mantenimiento de infraestructuras. Las energías renovables ofrecen una solución viable para estas comunidades remotas, especialmente con la reducción de costes en estas tecnologías (Ojeda Camargo *et al.* 2017).

2.3. Identificación de actividades del proyecto energético

De acuerdo con las actividades enunciadas por Hernández *et al.* (2014), se contemplará la etapa de construcción, destacándose la nivelación de superficies y la remoción de vegetación, así como la construcción de corredores de transmisión, subestaciones y carreteras. Según ANLA (2021), en la Resolución número 02153, en el otorgamiento de la licencia ambiental de un parque solar en La Guajira, se identificó que, en esta fase, se debe realizar la remoción de la cobertura vegetal, ya que es necesario contar con espacios libres para la instalación y funcionamiento adecuado de los equipos. Con el propósito de aprovechar al máximo la radiación solar, será necesario eliminar la vegetación que pueda interferir con ellos, mediante la tala o poda. Posteriormente, se contemplará la etapa de instalación de los paneles solares, seguida de la etapa de operación, en la cual destacan la generación de energía eléctrica, la actividad vehicular y el lavado de paneles. Finalmente, se llevará a cabo la etapa de desmantelamiento, que incluye actividades como la remoción de los paneles, corredores, subestaciones y caminos, así como también actividades importantes y enmarcadas en el Plan de Manejo Ambiental de todo proyecto: la restauración de áreas intervenidas. Estas fases y actividades se pueden observar en la tabla 1.

Fase de construcción e instalación	Remoción de cobertura vegetal
	Conformación de taludes
	Construcción de infraestructura de apoyo
	Construcción de accesos y vías internas
	Montaje de paneles e instalación de infraestructura de conexión eléctrica
Fase de operación	Generación de energía eléctrica
	Mantenimiento y limpieza de paneles solares
	Vertimientos en el suelo
Fase de desmantelamiento	Retiro de equipos, obras y estructuras
	Restauración de áreas intervenidas

Tabla 1

Actividades del proyecto del parque fotovoltaico

Fuente: adaptado de ANLA (2021).

2.4. Identificación de impactos generados

Para la identificación de los impactos generados, se tendrán en cuenta tres aspectos clave: el medio biótico, el medio abiótico y el medio socioeconómico; además del listado de impactos ambientales específicos del año 2021 emitido por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (MADS 2021), como se muestra en la tabla 2.

MEDIO ABIÓTICO	
Alteración de la geofoma del terreno	Cambio en la dinámica de los procesos geomorfológicos
	Cambio en la morfología del terreno
	Cambio en la estabilidad del terreno
Alteración de la calidad del suelo	Cambio en las características biológicas del suelo
	Cambio en las características físicas del suelo
	Cambio en las características químicas del suelo
Cambio de uso de suelo	Incremento o disminución de las áreas de conservación y protección ambiental
	Incremento o disminución de las áreas de conservación y protección del patrimonio cultural
	Incremento o disminución de las áreas de producción agrícola
	Incremento o disminución de las áreas de producción forestal
Alteración de la cobertura vegetal	Cambio en la distribución de la cobertura vegetal
	Cambio en la extensión (área) de la cobertura vegetal
	Cambio en la forma (geometría) de la cobertura vegetal
	Incremento o disminución de la cobertura vegetal
Alteración de la percepción visual del paisaje	Artificialización del entorno
	Cambio en la estética arquitectónica
	Cambio en la estética característica del paisaje

Alteración en la calidad del recurso hídrico superficial	Cambio en las características físicas de las aguas superficiales
Alteración hidrogeomorfológica de la dinámica fluvial y/o del régimen sedimentológico	Incremento de la escorrentía
	Cambio en el patrón de drenaje
Alteración en la oferta y/o disponibilidad del recurso hídrico subterráneo	Incremento o disminución de la recarga de acuíferos
Alteración a la calidad del recurso hídrico subterráneo	Cambio en las características químicas de las aguas subterráneas
	Incremento o disminución de la concentración de material particulado
Alteración de la calidad del aire	Incremento o disminución de la concentración de contaminantes criterio
	Incremento o disminución de la presión sonora
MEDIO BIÓTICO	
Alteración a ecosistemas terrestres	Cambio en el hábitat de las especies de flora y fauna
Alteración a comunidades de flora	Fragmentación de ecosistemas
	Cambio en la composición de las especies
	Cambio de la dinámica de sucesión vegetal
Alteración a comunidades de fauna	Cambio en la composición de las especies de fauna
	Desplazamiento o ahuyentamiento de fauna
	Incremento o disminución de la movilidad de la fauna
Alteración de ecosistemas acuáticos	Cambio en el hábitat de las especies acuáticas
Alteración a la hidrobiota	Cambio en la diversidad de las especies
MEDIO SOCIOECONÓMICO	
Demográfico	Incremento o disminución de la población flotante
	Cambio en la dinámica del empleo
Económico	Incremento o disminución de los ingresos familiares
	Incremento o disminución de la oferta de bienes y servicios
Organización comunitaria	Cambio en la organización comunitaria
	Generación de conflictos por el uso de la tierra

Tabla 2

Listado de impactos ambientales específicos (MADS 2021) asociados a un proyecto de parque fotovoltaico

Fuente: elaboración propia, con el listado de impactos ambientales específicos (MADS 2021).

Uno de los medios más afectados, especialmente durante la etapa de construcción, es el medio abiótico. Este medio incluye

diversos componentes que pueden verse impactados, tales como la geoforma, la geomorfología, la estabilidad del terreno, la calidad del suelo, el uso actual del suelo, la percepción visual, la hidrología, la hidrogeología, la calidad del aire y el nivel de ruido. En particular, destaca el impacto sobre el suelo en términos de sus características químicas, físicas y uso.

Por último, se identificaron impactos en el medio socioeconómico. Es importante señalar que la mayoría de estos impactos serán valorados como positivos en la siguiente etapa, dado que la construcción de estos proyectos genera demanda de mano de obra, lo que beneficia a las comunidades locales.

2.5. Signo de los impactos ambientales

Los «impactos ambientales» pueden ser clasificados como «positivos» (+) o «negativos» (-). Según la tabla 3, esta clasificación se basa en los efectos resultantes de las acciones sobre los factores ambientales.

VARIABLES	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN
IN (intensidad)	Hace alusión al nivel de impacto que tiene una actividad o acción en un factor específico dentro del ámbito en el que se lleva a cabo, como el suelo, el aire o el agua	Baja: 1. Afectación mínima Media: 2 Alta: 4 Muy alta: 8 Total: 12. Destrucción total
EX (extensión)	Se refiere a la extensión o ámbito de posible influencia que el impacto tiene sobre el entorno del proyecto o la actividad	Puntual: 1. Zona específica afectada directamente por el proyecto Parcial: 2. Supera las áreas directamente afectadas por el proyecto o actividad Extenso: 4. Incluye toda el área de estudio en su totalidad Total: 8. Si bien el impacto es puntual, ocurre en un lugar crucial Crítica: 12
MO (momento)	Indica el lapso temporal desde que ocurre la acción hasta que se inicia el efecto en el entorno o medio en cuestión	Largo plazo: 1. Cuando el efecto tarda en manifestarse más de cinco años Medio plazo: 2. Entre uno y cinco años Inmediato: 4. Inferior a un año Crítico: 8. Inmediato, en cercanías de poblaciones o elementos vulnerables
PE (persistencia)	Se refiere al período durante el cual se espera que la modificación de la variable evaluada permanezca, desde su inicio, y a partir del cual se inicia su proceso de restauración, ya sea con o sin acciones de gestión	Fugaz: 1. Persiste por menos de un año Temporal: 2. Si persiste por uno a diez años Permanente: 4. Si persiste por un tiempo indefinido o mayor a diez años
RV (reversibilidad)	Se hace referencia a la habilidad inherente del entorno para absorber, de manera natural, una alteración o impacto producido por una o varias actividades del proyecto en análisis. Esto implica activar mecanismos de autodepuración o autorrecuperación, sin la necesidad de aplicar medidas de gestión, una vez que cesa la acción que causó la alteración	Corto plazo: 1. La restauración natural de la variable a su condición original, sin intervención, puede ocurrir en menos de un año Medio plazo: 2. La restauración natural de la variable a su estado original, sin intervención, puede llevarse a cabo entre uno y diez años Irreversible: 4. La restauración natural de la variable a su estado original, sin intervención, no es factible

VARIABLES	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN
SI (sinergia)	Esta cualidad involucra el aumento de dos o más efectos simples. La suma total de estos efectos, resultantes de acciones que ocurren simultáneamente, es mayor que la suma de los efectos esperados, si las acciones que los generan actúan de manera independiente y no simultánea. El sinergismo, como parte de este proceso, implica la creación de nuevos efectos sobre el factor examinado	Sin sinergismo (simple): 1. No muestra interacción sinérgica con otras acciones que afecten al mismo factor o componente Sinérgico: 2. Puede mostrar interacción sinérgica con otras acciones que afecten al mismo factor o componente Muy sinérgico: 4. Es claro y altamente probable que una acción afecte a un componente presente en una interacción sinérgica con otras acciones, que inciden en el mismo factor o componente
AC (acumulación)	Se refiere al aumento gradual, o no, de la alteración en una o varias variables socioambientales evaluadas, teniendo en cuenta la acción continua y repetida que la causa en el área	Simple: 1. Es la situación en la cual la actividad o el impacto no generan efectos que se acumulen con el tiempo Acumulativo: 4. Este escenario ocurre cuando la acción que causa un impacto se prolonga en el tiempo, lo que resulta en un aumento progresivo de su gravedad. Esto sucede porque la variable afectada no puede recuperarse en la misma medida en que la acción se incrementa en el espacio y el tiempo
EF (efecto)	Hace referencia a la relación entre la causa y el efecto, o al surgimiento del efecto en una variable socioambiental como consecuencia de una actividad	Indirecto: 1. Cuando el impacto resultante en una variable socioambiental es el resultado de la interacción con otra variable, que a su vez está siendo afectada por las actividades que se están llevando a cabo Directo: 4. El impacto es resultado directo de la actividad o acción que se está realizando
PR (periodicidad)	Se refiere a la consistencia en la aparición del efecto, ya sea de manera cíclica o repetitiva, de manera impredecible en el tiempo, o continua en el tiempo	Irregular y discontinuo: 1. Son aquellos cuyo efecto o impacto, causado por una acción o actividad, se manifiesta a través de cambios irregulares en su presencia («discontinuo») o aquellos cuyo efecto o impacto se manifiestan de manera impredecible en el tiempo y cuyas alteraciones deben evaluarse según la probabilidad de ocurrencia Periódico: 2. Es el efecto o impacto que, debido a una acción o actividad, se manifiesta con un patrón de ocurrencia intermitente y se mantiene a lo largo del tiempo Continuo: 4. Es el efecto o impacto que, debido a una acción o actividad, se manifiesta mediante cambios regulares en su presencia
MC (recuperabilidad)	Se refiere a la habilidad para recuperar, ya sea completa o parcialmente, el elemento afectado, debido a un proyecto, obra o actividad. Esto implica la capacidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la intervención, mediante la aplicación de medidas de gestión ambiental	De manera inmediata: 1. Los efectos pueden ser revertidos mediante medidas de gestión tan pronto como ocurre la acción perturbadora A medio plazo: 2. La recuperación puede lograrse mediante medidas de gestión después del evento, en un plazo no inferior a un año Mitigable: 4. Las acciones correctivas implementadas reducen los efectos generados Irrecuperable: 8. Las consecuencias derivadas de las actividades no pueden ser revertidas mediante medidas ambientales de gestión
I (importancia)	Se evalúa la importancia de un impacto, al combinar diversos criterios, como su alcance, fuerza, durabilidad y consecuencia. Esta evaluación se realiza sumando estos criterios, dando tres veces más peso a la intensidad y dos veces más a la extensión, debido a su mayor significancia	Ecuación 1 $I = (3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC)$

Tabla 3

VARIABLES para la evaluación de impacto ambiental

Fuente: elaboración propia, adaptada de Fernández-Vítora *et al.* (1997) y Guerrero-Martin *et al.* (2024).

Un impacto se considera positivo (+) cuando la acción mejora la calidad ambiental en el área afectada. Por el contrario, un impacto se clasifica como «negativo» (-) cuando la acción resulta en una disminución de la calidad ambiental.

Es importante tener en cuenta que algunos impactos pueden tener efectos tanto positivos como negativos. En tales casos, cada tipo de impacto se evaluará por separado, para proporcionar una comprensión completa de sus efectos.

2.6. Evaluación de impactos ambientales

En esta etapa, se valorarán los impactos ambientales y se realizará a través de una matriz de impactos ambientales, como se puede ver en la tabla 3. Se identifican el medio, los componentes afectados, el impacto generado, la actividad, la clasificación del impacto y la valoración del impacto.

Para la valoración del impacto, se seguirá la metodología de Fernández-Vítora *et al.* (1997). Esta metodología ha sido aplicada en varios estudios medioambientales y proyectos de desarrollo para evaluar los posibles impactos de las actividades humanas en el medio ambiente (Guerrero-Martin *et al.* 2024). Cada criterio de evaluación cuenta con una puntuación que varía de 1 a 12, asignada con base en las características numéricas específicas de cada impacto y, en la tabla 3, se observa el valor que puede tomar cada variable.

Para determinar la importancia del impacto ambiental, se relacionan las variables en la ecuación 1. El significado de cada variable se relaciona en la tabla 3:

$$I = (3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC) \quad (\text{Ec. 1})$$

En esta ecuación, se observa que la «intensidad» y la «extensión» tienen factores diferenciales al resto de variables. Multiplicar la intensidad por un factor de 3 puede estar diseñado para reflejar la importancia significativa de la severidad del impacto; es decir, un impacto de alta intensidad podría tener efectos desproporcionadamente negativos sobre el medio ambiente y, con el factor 3, se ajusta el cálculo, para capturar esa mayor relevancia.

Por su parte, la «extensión» se refiere al área o el alcance geográfico del impacto. Multiplicar la extensión por un factor de 2 podría reflejar la importancia del área afectada, aunque quizá no con el mismo peso que la «intensidad». Este factor ayuda a ponderar el impacto total, al considerar no solo la magnitud, sino también la extensión espacial del efecto. Mientras que la extensión también es importante, el factor 2 sugiere que, aunque es significativo, no tiene el mismo peso que la intensidad en el cálculo del impacto total.

2.6.1. Valores otorgados a cada impacto

En la tabla 4, se presentan los valores asignados a cada impacto por variable. Por limitaciones de espacio, cabe aclarar que se muestran solo los valores correspondientes a la fase de construcción.

Intensidad: se han identificado cinco impactos con una calificación de 4, indicando alta intensidad. Estos impactos son: (1) disminución de áreas de conservación ambiental, (2) reducción de zonas de protección del patrimonio cultural, (3) disminución de la movilidad de la fauna, (4) alteración del hábitat acuático y (5) cambio en la estética del paisaje. La «alta intensidad» se debe a que el proyecto se ubica en zonas de gran valor ecológico y cultural, lo que afecta significativamente a los recursos y la percepción visual del entorno.

En contraste, el impacto de los cambios en la organización comunitaria se clasifica con «baja intensidad» (1), ya que el proyecto ofrece capacitación y consulta a los residentes, lo que facilita una adaptación armoniosa.

Los impactos restantes tienen una calificación de 2, indicando intensidad media. Aunque presentes, estos impactos no son tan severos ni extensos como los de la alta intensidad mencionados.

Extensión: siete impactos han recibido una calificación de 4, lo que indica que afectan a áreas extensas, incluso más allá del área de instalación de los paneles solares. Estos impactos incluyen: (1) reducción de áreas de conservación y protección ambiental, (2) disminución de zonas de protección del patrimonio cultural, (3) pérdida de áreas agrícolas, (4) disminución de áreas forestales, (5) afectación de la movilidad de la fauna, (6) alteración del hábitat de especies acuáticas y (7) cambios en la diversidad de especies. La «alta extensión» de estos impactos se debe a la predominancia de usos agrícolas y ecosistemas forestales en el municipio, así como a la construcción de infraestructuras, que afecta a áreas más amplias que la zona directa del proyecto. En contraste, los impactos clasificados con una puntuación de 2 tienen una extensión parcial, limitándose al área específica del proyecto, sin extenderse significativamente más allá.

Momento: siete impactos han sido clasificados con una puntuación de 4, lo que significa que se manifiestan de inmediato al inicio del proyecto. Esto implica que no hay un intervalo notable entre la acción y el efecto. Los impactos restantes, con una calificación de 2, se manifestarán a medio plazo, en un período de uno a diez años.

Persistencia: la «persistencia» de un impacto se refiere a la duración de su efecto. Los impactos con una calificación de 4 tienen efectos que perdurarán durante toda la vigencia del proyecto, como se detalla en la tabla 4. Otros impactos, con una calificación de 4, se encuentran en la tabla 3. Por su parte, los impactos clasificados con una puntuación de 2 tienen una persistencia temporal, lo que indica que sus efectos serán transitorios.

Efecto: todos los impactos han sido clasificados con un valor de 4, lo que indica que tienen un efecto directo y se manifiestan inmediatamente como resultado de una acción o actividad específica.

FASE DEL PROYECTO: FASE DE CONSTRUCCIÓN

Conformación de taludes/construcción de infraestructura de apoyo/adecuación y construcción de Zódmé/
construcción de accesos y vías internas

MEDIO	COMPONENTES	IMPACTO GENERADO	ACTIVIDADES												
			+/-	IN	EX	MO	PE	RV	MC	SI	AC	EF	PR	I	
Medio abiótico	Geoformas	Cambio en la dinámica de los procesos geomorfológicos	-	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2	-24	
	Morfología	Cambio en la morfología del terreno	-	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2	-24	
	Estabilidad del terreno	Cambio en la estabilidad del terreno	-	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2	-24	
		Cambio en las características biológicas del suelo	-	2	2	2	2	1	1	2	1	4	2	-25	
	Calidad del suelo	Cambio en las características físicas del suelo	-	2	2	2	2	1	1	2	1	4	2	-25	
		Cambio en las características químicas del suelo		2	2	2	2	1	1	2	1	4	2	-25	
		Disminución de las áreas de conservación y protección ambiental	-	4	4	4	4	2	2	2	1	4	2	-41	
	Uso actual del suelo	Disminución de las áreas de conservación y protección del patrimonio cultural	-	4	4	4	4	2	2	2	1	4	2	-41	
		Disminución de las áreas de producción agrícola	-	2	4	4	4	2	2	2	1	4	2	-35	
		Disminución de las áreas de producción forestal	-	2	4	4	4	2	2	2	1	4	2	-35	
		Cambio en la distribución de la cobertura vegetal	-	2	2	2	4	2	2	2	4	4	2	-32	
	Percepción visual del paisaje	Cambio en la extensión (área) de la cobertura vegetal	-	2	2	2	2	1	1	2	1	4	2	-25	
		Cambio en la forma (geometría) de la cobertura vegetal	-	2	2	2	2	1	1	2	1	4	2	-25	
		Disminución de la cobertura vegetal	-	2	2	2	2	1	1	2	1	4	2	-25	
		Artifización del entorno	-	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2	-24	
	Percepción visual del paisaje	Cambio en la estética arquitectónica	-	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2	-24	
		Cambio en la estética característica del paisaje	-	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2	-24	

Medio abiótico	Hidrología	Cambio en las características físicas de las aguas superficiales	-	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2	-24
		Incremento de la escorrentía	-	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2	-24
		Cambio en el patrón de drenaje	-	2	2	2	4	2	2	2	4	4	2	-32
	Hidrogeología	Disminución de la recarga de acuíferos	-	2	2	2	4	2	2	2	4	4	2	-32
		Cambio en las características químicas de las aguas subterráneas	-	2	2	2	4	2	2	2	4	4	2	-32
	Calidad del aire	Incremento de la concentración de material particulado	-	2	2	2	4	2	2	2	4	4	2	-32
		Incremento de la concentración de contaminantes criterio	-	2	2	2	4	2	2	1	1	4	2	-28
	Nivel de ruido	Incremento de la presión sonora	-	2	2	2	4	2	2	1	1	4	2	-28
	Medio biótico	Flora	Cambio en el hábitat de las especies de flora y fauna	-	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2
Fragmentación de ecosistemas			-	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2	-24
Cambio en la composición de las especies			-	2	2	2	2	1	1	1	1	4	2	-24
Cambio en la dinámica de sucesión vegetal			-	2	2	2	2	1	1	2	1	4	2	-25
Fauna		Cambio en la composición de las especies de fauna	-	2	2	2	2	1	1	2	1	4	2	-25
		Desplazamiento o ahuyentamiento de fauna	-	2	2	2	2	1	1	2	1	4	2	-25
		Disminución de la movilidad de la fauna	-	4	4	4	4	2	2	2	1	4	2	-41
Comunidades hidrobiológicas		Cambio en el hábitat de las especies acuáticas	-	4	4	4	4	2	2	2	1	4	2	-41
		Cambio en la diversidad de las especies	-	2	4	4	4	2	2	2	1	4	2	-35
Medio socio-económico	Demográfico	Incremento de la población flotante	-	2	2	2	2	1	1	2	4	4	2	-28
	Económico	Cambio en la dinámica del empleo	+	2	2	2	2	1	1	2	4	4	2	28
		Incremento de los ingresos familiares	+	2	2	2	2	1	1	2	4	4	2	28
		Incremento de la oferta de bienes y servicios	+	2	2	2	2	1	1	2	4	4	2	28
	Organización comunitaria	Cambio en la organización comunitaria	+	1	2	2	2	1	1	2	4	4	2	25
		Generación de conflictos por el uso de la tierra	-	2	2	2	2	2	2	4	4	4	2	-32

Tabla 4

Valoración de impactos ambientales en el medio abiótico

Fuente: elaboración propia, con metodología de evaluación de Fernández-Vítora *et al.* (1997).

Reversibilidad: este concepto se refiere a la capacidad de un factor afectado para recuperarse de manera natural. Los impactos clasificados con una puntuación de 4 son aquellos cuya recuperación es difícil y puede tardar entre uno y diez años. Estos impactos afectan significativamente al medio ambiente o a los ecosistemas, y su reversión completa es compleja. En contraste, los impactos con una puntuación más baja pueden volver a sus condiciones iniciales de manera inmediata tras el cese de las actividades.

Recuperabilidad: la «recuperabilidad» se refiere a la capacidad de restaurar un factor afectado mediante medidas correctoras y restauradoras. Los impactos clasificados con una puntuación de 4 pueden requerir más de diez años para recuperarse, debido a la disminución de coberturas vegetales o cambios hidrológicos persistentes. Por otro lado, los impactos con una puntuación de 1 permiten una recuperación inmediata del entorno o del factor afectado, una vez que se aplican las medidas correctoras adecuadas.

Sinergia: la «sinergia» entre impactos se refiere a la interacción combinada de múltiples impactos que, al ocurrir simultáneamente, generan efectos acumulativos o amplificados, que no se pueden prever si se consideran de manera aislada. Los impactos con una puntuación de 2 muestran una sinergia moderada y están principalmente relacionados con cambios en las características del suelo, el uso del suelo y las coberturas vegetales.

Acumulación: la «acumulación» de impactos se manifiesta de manera progresiva y más intensa cuando la acción causante se mantiene de forma continua o reiterada. Estos impactos no se limitan a la mera suma de sus efectos individuales; pueden resultar en consecuencias más significativas, debido a su acumulación. En este contexto, los impactos socioeconómicos continúan generando efectos positivos y cambios en la esfera económica de las familias.

Periodicidad: todos los impactos han sido clasificados con una puntuación de 2, lo que indica que son impactos periódicos. Estos impactos se manifiestan en ciclos regulares o en intervalos específicos durante la vida del proyecto. Aunque no son constantes, su recurrencia es predecible y requiere una gestión y monitoreo continuos durante los períodos en los que se presentan.

2.6.2. Clasificación del impacto

Posteriormente, la importancia del impacto ambiental se clasificará en «impacto bajo», «impacto moderado» e «impacto severo» o «crítico», entendiéndose como «crítico» un impacto que debe eliminarse, por lo que debe reconsiderarse alguna actividad o zona específica dentro del proyecto.

Conesa indica la clasificación para los impactos ambientales negativos en las tablas 5 y 6.

CARÁCTER NEGATIVO

BAJO	< -25
MODERADO	-25 A < -50
SEVERO	-50 A -75
CRÍTICO	> -75

Tabla 5

Clasificación de los impactos negativos

Fuente: elaboración propia.

CARÁCTER POSITIVO

BAJO	< 25
MEDIO	25 a 50
ALTO	> 50

Tabla 6

Clasificación de los impactos positivos

Fuente: elaboración propia.

3 Resultados

3.1. Impactos en la fase de construcción

Durante la etapa de construcción, se identifican impactos significativos en el componente de calidad del suelo. La actividad constructiva genera desechos, ruido, polvo, residuos sólidos, sustancias tóxicas, contaminación del aire y del agua, malos olores, alteraciones climáticas, cambios en el uso del suelo, remoción de vegetación y emisiones de sustancias peligrosas (Enshassi *et al.* 2014).

Según Ruiz *et al.* (2008), la cubierta vegetal desempeña un papel primordial. La vegetación se ve afectada durante esta etapa, debido a actividades como el desbroce y la retirada de la cubierta vegetal. Además, Ruiz *et al.* (2008) destacan que el impacto paisajístico es uno de los principales impactos ambientales.

- **Impactos negativos severos**

Los «impactos severos» fueron los que tuvieron de importancia entre 50 a 75 puntos. En esta fase, se identifican impactos principalmente en el medio biótico, en el componente de fauna y flora y, en el medio abiótico, en el componente paisajístico (véase la tabla 7).

Impactos clasificados como «severos»	Cambio en la extensión (área) de la cobertura vegetal
	Cambio en la distribución de la cobertura vegetal
	Cambio en la forma (geometría) de la cobertura vegetal
	Artifización del entorno
	Cambio en la estética arquitectónica
	Cambio en la estética característica del paisaje
	Cambio en el hábitat de las especies de flora y fauna
	Fragmentación de ecosistemas
	Cambio en la composición de las especies de flora
	Cambio de la dinámica de sucesión vegetal
	Cambio en la composición de las especies de fauna
Desplazamiento o ahuyentamiento de fauna	

Tabla 7

Impactos negativos severos-fase de construcción

Fuente: elaboración propia.

● Impactos negativos moderados

Los «impactos moderados» fueron los que tuvieron una importancia de entre 25 a 50 puntos; de aquí resaltan impactos relacionados con el uso del suelo, como la disminución de áreas de conservación y protección ambiental, de patrimonio cultural, de producción agrícola y forestal. Cabe resaltar que, cuando se está realizando un estudio de impacto ambiental, se debe tener una caracterización específica de la zona de interés, por lo que esta es una descripción general de algunas de las áreas que pueden ser afectadas.

Aquí se encuentran dos impactos socioeconómicos: el incremento de la población flotante en esta etapa y la generación de conflictos por el uso de la tierra (véase la tabla 8).

Impactos clasificados como «moderados»	Disminución de las áreas de conservación y protección ambiental
	Disminución de las áreas de conservación y protección del patrimonio cultural
	Disminución de las áreas de producción agrícola
	Disminución de las áreas de producción forestal
	Incremento de la población flotante
	Generación de conflictos por el uso de la tierra

Tabla 8

Impactos negativos moderados-fase de construcción

Fuente: elaboración propia.

- **Impactos negativos bajos**

Los «impactos bajos» tuvieron una importancia menor a 25 puntos. Aquí resaltan los impactos relacionados con el medio biótico, específicamente del componente geomorfológico (véase la tabla 9).

Impactos clasificados como «bajos»	Cambio en la dinámica de los procesos geomorfológicos
	Cambio en la morfología del terreno
	Cambio en la estabilidad del terreno
	Cambio en las características biológicas del suelo
	Cambio en las características físicas del suelo
	Cambio en las características químicas del suelo
	Cambio en las características físicas de las aguas superficiales
	Incremento de la escorrentía
	Cambio en el patrón de drenaje
	Incremento o disminución de la recarga de acuíferos
	Cambio en las características químicas de las aguas subterráneas
	Incremento de la concentración de material particulado
	Incremento de la concentración de contaminantes criterio
Incremento de la presión sonora	

Tabla 9
Impactos negativos bajos-fase de construcción
Fuente: elaboración propia.

- **Impactos positivos medios**

Véase la tabla 10.

Impactos positivos medios	Cambio en la dinámica del empleo
	Incremento de los ingresos familiares

Tabla 10
Impactos positivos medios-fase de construcción

- **Impactos positivos bajos**

Entre los impactos positivos menores identificados, se encuentran los «cambios en la organización comunitaria». Estos proyectos no solo contribuyen a la generación de energía sostenible, sino que también fortalecen la cohesión de la comunidad, promoviendo la colaboración y el trabajo en equipo. Además, incluyen programas de capacitación y educación, que incrementan el conocimiento

técnico de la población local y generan nuevas oportunidades de empleo. Este enfoque también fomenta una mayor conciencia ambiental en la comunidad. Dichos impactos son especialmente significativos, dado que el municipio no ha invertido adecuadamente en la participación ciudadana, por lo que el proyecto representa una oportunidad para mejorar este aspecto.

Véase la tabla 11.

Impactos positivos bajos	Cambio en la organización comunitaria
---------------------------------	---------------------------------------

Tabla 11
Impactos positivos bajos-fase de construcción
Fuente: elaboración propia.

3.2. Impactos en la fase de operación

En esta fase, no se identificaron impactos ambientales asociados a impactos a las geofformas, morfología o estabilidad del terreno.

- **Impactos negativos moderados**

Véase la tabla 12.

Impactos clasificados como «moderados»	Cambio en las características químicas de las aguas subterráneas
	Cambio en la estética característica del paisaje
	Cambio en la dinámica de sucesión vegetal
	Cambio en la composición de las especies de fauna
	Desplazamiento o ahuyentamiento de fauna
	Cambio en la composición de las especies de fauna
	Incremento de la población flotante
	Generación de conflictos por el uso de la tierra

Tabla 12
Impactos negativos moderados-fase de operación
Fuente: elaboración propia.

- **Impactos negativos bajos**

Véase la tabla 13.

Impactos clasificados como «bajos»	Cambio en las características biológicas del suelo
	Cambio en las características físicas del suelo
	Cambio en las características físicas de las aguas superficiales
	Incremento de la escorrentía
	Incremento de la concentración de material particulado

Tabla 13
Impactos negativos bajos-fase de operación.
Fuente: elaboración propia.

- **Impactos positivos medios**

Véase la tabla 14.

Impactos positivos medios	Cambio en la dinámica del empleo
	Incremento de los ingresos familiares

Tabla 14

Impactos positivos medios-fase de operación

Fuente: elaboración propia.

- **Impactos positivos bajos**

Véase la tabla 15.

Impactos positivos bajos	Cambio en la organización comunitaria
---------------------------------	---------------------------------------

Tabla 15

Impactos positivos bajos-fase de operación

Fuente: elaboración propia.

3.3. Impactos en la fase de desmantelamiento

En esta fase de desmantelamiento, se identifican algunos impactos positivos en el componente suelo, debido a que en esta fase se contemplan actividades como el retiro de equipos, obras y estructuras y la restauración de áreas intervenidas.

- **Impactos negativos moderados**

Véase la tabla 16.

Impactos clasificados como «moderados»	Incremento de la concentración de material particulado
	Incremento de la presión sonora

Tabla 16

Impactos negativos moderados-fase de desmantelamiento

Fuente: elaboración propia.

- **Impactos positivos medios**

Véase la tabla 17.

Impactos positivos medios	Cambio en la dinámica de los procesos geomorfológicos
	Cambio en las características químicas del suelo
	Incremento de la movilidad de la fauna
	Desplazamiento o ahuyentamiento de fauna
	Cambio en el hábitat de las especies de flora y fauna

Tabla 17

Impactos negativos medios-fase de desmantelamiento

Fuente: elaboración propia.

● Impactos positivos bajos

Véase la tabla 18.

Impactos positivos bajos	Cambio en la morfología del terreno
	Cambio en la estabilidad del terreno
	Cambio en las características biológicas del suelo
	Incremento de la escorrentía
	Incremento de la recarga de acuíferos
	Incremento de las áreas de conservación y protección ambiental
	Cambio en la estética arquitectónica
	Cambio en la estética característica del paisaje
	Cambio en la extensión (área) de la cobertura vegetal
	Cambio en la forma (geometría) de la cobertura vegetal
	Incremento de la cobertura vegetal
	Fragmentación de ecosistemas
	Cambio en la composición de las especies

Tabla 18

Impactos positivos bajos-fase de desmantelamiento

Fuente: elaboración propia.

4 Análisis de resultados

4.1. Resultados en la etapa de construcción

Según la evaluación de impactos ambientales, la fase de puesta en marcha de un proyecto de energía sostenible es la más crítica, especialmente debido a las actividades de desmonte. Durante esta etapa, los impactos más significativos afectan al medio abiótico y biótico, mientras que el impacto en el medio socioeconómico es relativamente bajo o medio. Según Tsoutsos *et al.* (2005), los impactos ambientales más notables incluyen:

- Impacto visual: afecta a la estética del paisaje natural, alterando su apariencia original.
- Vertidos rutinarios: se generan vertidos de aguas residuales domésticas y residuos sólidos procedentes de los campamentos del proyecto.
- Utilización del suelo: los proyectos requieren grandes extensiones de terreno, lo que puede reducir tierras cultivables y afectar a ecosistemas sensibles.
- Efectos en el ecosistema: pueden impactar a la fauna, especialmente a aves e insectos.

Estos hallazgos coinciden con los resultados de la evaluación de impacto ambiental realizada en esta fase.

En relación con el «impacto visual», se han identificado impactos severos, como la artificialización del entorno, cambios en la estética arquitectónica y modificaciones en el paisaje característico (Kalbarczyk 2016). Para mitigar estos efectos, es recomendable situar el proyecto cerca de centros poblados, para minimizar el impacto en zonas rurales o áreas de conservación ambiental. Sin embargo, debido a los altos costes y la disponibilidad limitada de terrenos cercanos a centros poblados, los proyectos a menudo se ubican en áreas más alejadas (García Orrego 2021, Rincón *et al.* 2018).

Para abordar el impacto visual, se pueden implementar medidas como la plantación de cercas vivas alrededor del proyecto o compensaciones, como trabajar con comunidades locales que valoran los servicios ecosistémicos del paisaje (UICN 2021).

En cuanto a los ecosistemas, se han identificado impactos severos, como cambios en el hábitat de flora y fauna, fragmentación de ecosistemas, alteración en la composición de especies de flora y modificación en la dinámica de sucesión vegetal. Turney *et al.* (2011) señalan que la biodiversidad, medida por la densidad de especies, influye significativamente en los impactos ambientales de las plantas solares. En áreas con alta biodiversidad, como los bosques tropicales, la instalación puede alterar drásticamente los ecosistemas. En contraste, en biomas con menor biodiversidad, como los desiertos, los impactos son relativamente menores.

En un estudio reciente de Blaydes *et al.* (2024), se demuestra que los parques solares pueden afectar a la biodiversidad de los polinizadores, debido a la pérdida de hábitat y la disminución de la abundancia y diversidad floral, limitando sus recursos de forrajeo y reproducción. Para mitigar estos efectos, se pueden implementar prácticas de gestión ambiental con las cuales maximizar los recursos florales dentro del parque solar, apoyando así a los grupos de polinizadores y contribuyendo a políticas y estrategias ambientales adecuadas.

Tawalbeh *et al.* (2021) destacan que la fase de construcción es la que más impacto ambiental tiene sobre el suelo y el hábitat, seguida por el impacto en el medio biótico. Por otro lado, Hernández *et al.* (2014) indican que las instalaciones ubicadas en entornos construidos existentes pueden afectar negativamente a la biodiversidad. La remoción de vegetación y la nivelación del suelo a nivel local, junto con la fragmentación del paisaje a nivel regional, pueden contribuir a la pérdida de biodiversidad, al dificultar el movimiento de especies y la dispersión de sus genes.

Durante la etapa de construcción, se han identificado impactos moderados, relacionados con el cambio en el uso del suelo. Estos incluyen la reducción de áreas de conservación y protección am-

biental, así como la disminución de zonas de protección cultural, producción agrícola y forestal. Es importante señalar que esta evaluación se realizó de manera general, sin considerar una caracterización detallada del área específica de estudio.

Para mitigar estos impactos, es crucial que los parques solares sean diseñados y construidos con un enfoque integral. Los huertos solares, donde se combinan sistemas agrícolas con paneles solares, podrían ofrecer beneficios ambientales significativos. Estos huertos permiten la creación de hábitats más diversos y refugios en paisajes agrícolas intensamente gestionados, y su menor intensidad de manejo, en comparación con los cultivos tradicionales, favorece una mayor diversidad de plantas. Esto, a su vez, apoya una mayor variedad de invertebrados y aves (Jarčuška *et al.* 2024).

Por otro lado, en esta misma clasificación, se identificaron dos impactos socioeconómicos relacionados con la demografía y la organización social: el aumento de la población flotante y la generación de conflictos por el uso de la tierra.

La necesidad de mano de obra para la construcción, adecuación e instalación del panel solar provocará un incremento en la población flotante. Esta población se trasladará temporalmente a la periferia del proyecto de energía solar, ya sea para trabajar en él o para aprovechar oportunidades de negocio. Sin embargo, este fenómeno debe analizarse desde diversas perspectivas. Gándara *et al.* (2020) indican que esta migración puede tener impactos negativos, como la segregación, ya que esta población tiende a enfrentarse a problemas de integración en el nuevo territorio. Además, Panaia (2010) señala que la población flotante, a menudo, carece de derechos y ejerce presión sobre los servicios urbanos.

La inseguridad es otro problema asociado: a medida que aumenta el flujo de personas temporales, también se observa un incremento proporcional en la incidencia de delitos contra la propiedad de los residentes locales. La identidad también puede verse afectada, ya que la población flotante podría tener dificultades para identificarse con los rasgos específicos de la población local, lo que puede afectar al sentido de pertenencia ambiental. Esto podría reflejarse en una menor atención al entorno y un control insuficiente de la contaminación.

El otro impacto ambiental está relacionado con el cambio en el uso del suelo. La posible reducción de áreas de producción, como las agrícolas y forestales, puede provocar conflictos entre la población local. Pasqualino *et al.* (2015) afirman que el aumento de sistemas de energía eólica y solar está generando una variedad de nuevos y complejos conflictos relacionados con el uso del suelo, debido a que estos sistemas requieren grandes extensiones de terreno. Por lo tanto, es crucial desarrollar políticas innovadoras en las que se aborden los conflictos específicos que surgen durante la implementación de estos proyectos.

En varios estudios, se indica que tanto la energía solar fotovoltaica como la energía solar concentrada (CSP) requieren una mayor cantidad de terreno, en comparación con otras tecnologías energéticas; además, hay estudios en los que se advierte sobre el rápido crecimiento de la energía solar y su potencial impacto en la ocupación de terrenos, como sucede, por ejemplo, en Estados Unidos (Tawalbeh *et al.* 2021).

Por lo anterior, es indispensable que, en el plan de manejo ambiental, se contemplen programas de información, participación comunitaria y autoridades locales, así como también programas de atención de peticiones, quejas y reclamaciones, y de educación y capacitación comunitaria, con los cuales mediar en estos posibles conflictos del uso del suelo.

En la construcción también se identifican impactos bajos, relacionados con la alteración de la geoforma del terreno, la calidad del suelo y el aire y la alteración en los niveles de presión sonora. Son impactos considerados «bajos», pero es importante presentar medidas de manejo para este tipo de impactos pues, en el caso de la afectación de la calidad del suelo, es un impacto que tiene sinergia con otros impactos y puede llegar a afectar gravemente a la población. En esta etapa de construcción, la eliminación de la cubierta vegetal promueve la liberación de carbono a la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO₂), lo cual reduce la cantidad de carbono en el suelo; de esta forma, afecta a la calidad del suelo, comprometiendo la sostenibilidad de los sistemas de producción, disminuyendo la fertilidad y la productividad de la tierra destinada a la agricultura y, en última instancia, impactando en la seguridad alimentaria (Guzmán *et al.* 2017). Es aconsejable plantar árboles y especies autóctonas en los alrededores de la central solar; no se aconseja reemplazar la biomasa con especies de gran altura, ya que podrían generar sombra (Guzmán *et al.* 2017).

El impacto de presión sonora tiene una permanencia baja en esta etapa de la construcción, y no se va a volver a presentar con frecuencia en otras etapas del proyecto; es indispensable tener control en torno a la seguridad y salud del trabajador.

Finalmente, en esta etapa, se identificaron impactos positivos en el medio socioeconómico. Pasqualino *et al.* (2015) también lo señalan en su estudio. Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe colombiano resaltan el crecimiento de la economía local, por lo cual se identificaron impactos, como incremento de la oferta de bienes y servicios y cambio en la dinámica del empleo.

4.2. Resultados en la etapa operativa

Durante esta etapa, el recurso del suelo sigue experimentando una afectación moderada, ya que incluye el funcionamiento continuo del parque solar. Esto implica que los paneles instalados en el

área designada continuarán impactando en las características físicas, químicas y biológicas del suelo, al bloquear la radiación solar directa. Sin embargo, este impacto puede ser mitigado ajustando la altura de los paneles solares, lo que puede ser una estrategia efectiva para reducir algunos efectos negativos sobre las propiedades químicas y biológicas del suelo. Cuppari *et al.* (2024) exploran cómo los paneles solares pueden integrarse con la agricultura mediante el enfoque agrovoltaico, destacando los beneficios de elevar los paneles para permitir la luz solar y el crecimiento de vegetación debajo, así como la reducción de la compactación del suelo y la mejora de la biodiversidad. También abordan los impactos en las propiedades químicas y biológicas del suelo y proponen medidas de mitigación.

El impacto paisajístico seguirá siendo una consideración, ya que el funcionamiento continuo del parque solar sigue afectando al paisaje.

Un aspecto crítico que controlar durante esta etapa es el impacto del lavado de los paneles solares, que puede causar contaminación del agua. Para esta actividad se requiere, aproximadamente, 0,02 metros cúbicos de agua por megavatio hora de energía, y el vertido de aguas con sedimentos al suelo durante el lavado puede dañar la cubierta vegetal y propiciar la erosión (Guzmán *et al.* 2017).

Carnevale *et al.* (2016) destacan que, aunque la operación de los paneles solares no produce emisiones contaminantes, el transporte y mantenimiento de los equipos pueden generar gases contaminantes y material particulado. Estas actividades, incluyendo la limpieza de los paneles y el mantenimiento de las vías, pueden afectar a la calidad del aire en las áreas cercanas. Además, durante esta etapa, se pueden generar residuos sólidos y líquidos, como productos químicos para la limpieza de los paneles y materiales de mantenimiento, los cuales requieren una gestión adecuada para prevenir la contaminación.

Para mitigar estos impactos, se recomienda la instalación de trampas de sedimentos y la construcción de canales perimetrales, así como la implementación de programas específicos para el manejo de residuos sólidos y especiales.

4.3. Resultados en la etapa de desmantelamiento

Esta es la etapa que menos impactos negativos representa puesto que, cuando el parque solar cumple con su tiempo de utilidad, se retirarán los equipos y se procederá a realizar las actividades de manejo ambiental después de la clausura; por esto, en esta etapa, se considerarán los mayores impactos positivos.

Debido a las actividades dentro de programas de revegetalización o restauración ambiental, con los que se pretende revegetali-

zar las áreas intervenidas, se producirá una reconexión del hábitat y, eventualmente, permitirá nuevamente el paso de fauna, recuperación y restauración de la calidad del suelo.

5 Conclusiones

Para garantizar que un parque solar se integre armoniosamente con su entorno natural y minimice sus impactos negativos, es crucial llevar a cabo una planificación exhaustiva, con la que se abarquen los aspectos ambientales afectados, la evaluación de riesgos y la participación comunitaria. Este enfoque integral es esencial para el éxito de los proyectos de energía solar. Además, es fundamental internalizar los costes y asegurar un compromiso a largo plazo por parte de los desarrolladores, para optimizar el rendimiento y reducir los impactos adversos (Guerin 2017). Según la valoración de este estudio, se deben considerar factores como los cambios en los ecosistemas locales y la flora y fauna presentes, así como la estética del paisaje circundante.

La viabilidad de un estudio de esta magnitud requiere un equipo interdisciplinario, que realice un análisis detallado del área propuesta para la instalación del parque solar. Este análisis debe incluir la evaluación de la biodiversidad local y la identificación de posibles impactos ambientales. Se deben mapear los ecosistemas presentes, tales como bosques, humedales y hábitats acuáticos, y realizar inventarios de la flora y fauna locales, incluyendo especies en peligro de extinción o protegidas.

La evaluación de impactos ambientales es esencial para desarrollar planes de manejo que mitiguen estos impactos. En proyectos de energía solar, es crucial minimizar la perturbación de los ecosistemas naturales y proteger la biodiversidad existente. Esto puede implicar seleccionar áreas de menor valor ecológico para la ubicación de los paneles solares e implementar medidas de mitigación, como la restauración de hábitats degradados y la creación de corredores ecológicos, para facilitar el movimiento de la fauna.

Uno de los retos más significativos es el impacto visual del parque solar en el paisaje circundante. Es fundamental diseñar estrategias de integración paisajística que reduzcan la alteración visual y preserven la calidad escénica del entorno. Esto puede incluir la selección de colores y materiales que se integren con el entorno natural y la plantación de vegetación de bajo perfil alrededor de los paneles solares para camuflarlos visualmente.

Además, en la evaluación de impactos, también se destaca la etapa de construcción como la más crítica en un proyecto de energía solar. Por esta razón, se deben implementar medidas para minimizar los impactos durante la construcción del parque, además

de una gestión adecuada de residuos, la prevención de la erosión del suelo y la reducción del ruido y la contaminación lumínica. Es igualmente importante monitorear, de manera continua, el funcionamiento del parque solar y realizar evaluaciones periódicas de su desempeño ambiental, para identificar y abordar cualquier impacto negativo que pueda surgir.

6 Bibliografía

- ANLA (2021). Resolución número 02153 del 30 de noviembre de 2021. Agencia Nacional de Licencias Ambientales.
- BLAYDES H, POTTS SG, WHYATT JD, ARMSTRONG A (2024). On-site floral resources and surrounding landscape characteristics impact pollinator biodiversity at solar parks. *Ecological Solutions and Evidence* 5:e12307. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12307>, acceso 10 de marzo de 2024.
- CARNEVALE EA, LOMBARDI L, ZANCHI L (2016). Wind and solar energy: a comparison of costs and environmental impacts. *Advances in Energy Research* 4(2):121.
- CUPPARI RI, BRANSCOMB A, GRAHAM M, NEGASH F, SMITH AK, PROCTOR K, ABOU NAJM M (2024). Agrivoltaics: synergies and trade-offs in achieving the sustainable development goals at the global and local scale. *Applied Energy* 362:122970.
- ENSHASSI A, KOCHENDOERFER B, RIZQ E (2014). Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Revista Ingeniería de Construcción* 29(3):234-254. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-5073201400300002>, acceso 14 de marzo de 2024.
- FERNÁNDEZ-VÍTORA VC, RIPOLL VC, RIPOLL LAC, GARRO VR (1997). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Mundi-Prensa, pp. 1-412.
- GÁNDARA WOONGG C, PADILLA LOZANO F, GUTIÉRREZ CASTORENA P (2020). Población flotante y ciudad desde una perspectiva socioespacial: revisión de estudios recientes. *Si Somos Americanos* 20(1):103-122. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-09482020000100103>, acceso 14 de marzo de 2024.
- GARCÍA ORREGO S (2021). Análisis espacial multicriterio para la ubicación de parques eólicos y granjas solares en Colombia (doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- GUERIN TF (2017). Evaluating expected and comparing with observed risks on a large-scale solar photovoltaic construction project: a case for reducing the regulatory burden. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74:333-348.
- GUERRERO-MARTIN CA, SZKLO A (2024). Analysis of potential environmental risks in the hydraulic fracturing operation in the «La Luna» formation in Colombia. *Sustainability* 16(5):2063.
- GUZMÁN MFS, RUIZ DDP, MARTÍNEZ JFG, SIERRA MLR, TORRES SNC (2017). Análisis prospectivo del uso de energía solar: caso Colombia. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* 71:85-93.
- HERNÁNDEZ RR, EASTER SB, MURPHY-MARISCAL ML, MAESTRE FT, TAVASSOLI M, ALLEN EB, ALLEN MF (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29:766-779.
- JARČUŠKA B, GÁLFFYOVÁ M, SCHNÜRMACHER R, BALÁŽ M, MIŠÍK M, REPEL M, KRIŠTÍN A (2024). Solar parks can enhance bird diversity in agricultural landscapes. *Journal of Environmental Management* 351:119902.
- KALBARCZYK E (2016). The impact of solar power facilities on landscape. *Architektura Krajobrazu* 2:30-39.
- MADS (2015). Decreto 1076 de 2015. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- MADS (2021). Listado de impactos ambientales específicos 2021. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

- MAHMUD MP, HUDA N, FARJANA SH, LANG C (2018). Environmental impacts of solar-photovoltaic and solar-thermal systems with life-cycle assessment. *Energies* 11(9):2346.
- OJEDA CAMARGO E, CANDELO BECERRA JE, SILVA ORTEGA JI (2017). Caracterización de los potenciales de energía solar y eólica para la integración de proyectos sostenibles en comunidades indígenas en La Guajira, Colombia.
- PANAIA M (2010). Algunas precisiones sobre el concepto de población flotante en el ámbito del trabajo. *Pampa (Santa Fe)* 6:27-36. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2314-02082010000100002&lng=es&tlng=es, acceso 17 de marzo de 2024.
- PASQUALINO J, CABRERA C, VANEGAS CHAMORRO M (2015). Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe colombiano. *Prospectiva* 13(1):68-75. <https://doi.org/10.15665/rp.v13i1.361>, acceso 16 de marzo de 2024.
- RINCÓN SM, CAMARGO AKV (2018). Energías renovables: un futuro óptimo para Colombia. *Punto de Vista* 9(13):2.
- RUIZ JM, SERRANO MLT (2008). Elección de criterios y valoración de impactos ambientales para la implantación de energía eólica. *Papeles de Geografía* 47-48:171-183.
- TAWALBEH M, AL-OTHMAN A, KAFIAH F, ABDELSALAM E, ALMOMANI F, ALKASRAWI M (2021). Environmental impacts of solar photovoltaic systems: a critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment* 759:143528.
- TSOUTSOS T, FRANTZESKAKI N, GEKAS V (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy* 33(3):289-296.
- TURNERY D, FTHENAKIS V (2011). Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(6):3261-3270.
- UICN (2021). Mitigar los impactos de los proyectos de energía solar y eólica sobre la biodiversidad: síntesis y mensajes clave. <https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2021.06.es>, acceso 16 de marzo de 2024.
- USAID (2020). Insumos técnicos para la formulación del Plan de Desarrollo 2020-2023: entendiendo la riqueza natural de El Molino, La Guajira.
- VEGA ESCOBAR JP, URBINA DÍAZ MA, VEGA DURÁN GF, ROSADO ACOSTA K, DÍAZ ARIAS FJ, VEGA MONTERO J, OROZCO CJ, HINOJOZA BORJA O, OROZCO MF, MONTERO MDR, MORALES LA, RAMÍREZ JA, PÉREZ ATARA D, CÁRDENAS GUTIÉRREZ E, BARRERA AYALA DA (2020). Plan de Desarrollo Municipal + Oportunidades + Progreso 2020-2023. https://elmolinolaguajira.micolombiadigital.gov.co/sites/elmolinolaguajira/content/files/000542/27061_diagnostico-plan-de-desarrollo-el-molino-oportunidades-progreso-20202023.pdf, acceso 14 de agosto de 2024.