

ESTUDIO DE IMPACTO
AMBIENTAL (EsIA) Y PLAN DE
MANEJO AMBIENTAL (PMA)

**PROYECTO FOTOVOLTAICO
LA CEIBA**



OPERADOR DEL PROYECTO:



ELABORADO POR:



JULIO , 2026

Contenido

4.	CICLO DE VIDA DEL PROYECTO	23
4.1	Metodología	23
4.1.1.	Categorías de impacto ambiental.....	24
4.1.2.	Evaluación del Ciclo de Vida	25
4.2	Desarrollo.	38
4.2.1.	Objetivos.....	38
4.2.2.	Alcance	38
4.2.3.	Unidad Funcional.....	38
4.2.4.	Monto Estimado y Vida Útil	39
4.2.5.	Límites del Sistema	39
4.2.6.	Descripción del Análisis de Inventario	39
4.2.7.	Cálculo del impacto	45
4.2.8.	Impacto ambiental del proyecto	47
4.2.9.	Simulación del impacto.....	47
4.2.10.	Limitaciones del estudio	48
4.3	Análisis e interpretación de resultados.	49
4.3.1.	Resultados globales	49
4.3.2.	Análisis por fases del ciclo de vida	49
4.3.3.	Conclusiones.....	50
4.3.4.	Recomendaciones técnicas	51
4.3.5.	Lineamientos y beneficios ambientales derivados del análisis.....	52
5.	Bibliografía.....	55

Tabla 4-1.	Categoría de impacto ambiental.	25
Tabla 4-2.	Valores de ponderación del proyecto.	29
Tabla 4-3.	Componentes tecnológicos.....	41
Tabla 4-4.	Materias primas	41
Tabla 4-5.	Inventario de materias primas y procesos para la fase de construcción.....	42
Tabla 4-6.	Inventario para la fase de operación.....	44
Tabla 4-7.	Inventario para la fase de cierre.....	45

4. CICLO DE VIDA DEL PROYECTO

El análisis del ciclo de vida del proyecto es esencial para asegurar que el proyecto de energía fotovoltaica sea sostenible, rentable y resiliente. Este enfoque integral permite gestionar de manera eficiente los recursos, minimizar impactos negativos, cumplir con las normativas y maximizar los beneficios económicos y ambientales a lo largo de la vida útil del proyecto.

4.1 Metodología

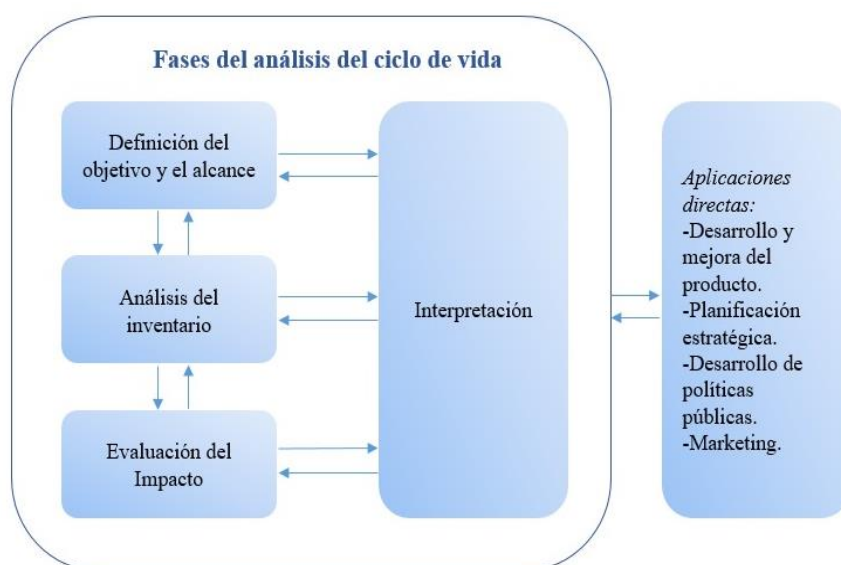
El Análisis del Ciclo de Vida (ACV), de acuerdo a la Norma NTE-ISO 14040: 2000, es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto, a través de las siguientes acciones:

- Compilación de un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema.
- Evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas.
- Interpretación de los resultados de las fases de inventario e impactos en relación con los objetivos del estudio (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2000).

El alcance y resultados obtenidos por el ACV, contribuyen a: la identificación de oportunidades para mejorar los aspectos ambientales en los diversos puntos de su ciclo de vida, la toma de decisiones en organizaciones del sector privado o gubernamental, selección de indicadores importantes de desempeño ambiental y mercadeo ambiental de la empresa. Para su análisis se determinan las siguientes etapas:

- Definición del objetivo y alcance de estudio
- Análisis del inventario
- Evaluación de impacto ambiental
- Interpretación (INEN, 2000)

Figura 4-1. Estructuras Ciclo de Vida (ACV).



Fuente: Tomado de Martínez (2017), basado en ISO 14040.

Para establecer el alcance del estudio se debe definir entre otros puntos: funciones del sistema o producto, unidad funcional, tipo de sistema a estudiar, límites de este, requisitos de los datos, supuestos, limitaciones y tipo de revisión crítica.

Dentro del análisis del inventario, se recolecta datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes del sistema del producto. Entre los ingresos y salidas, se puede incluir el uso de recursos y las descargas al aire, agua y suelo, asociados con el sistema.

La evaluación del impacto va dirigida a evaluar la importancia de los potenciales impactos ambientales, utilizando los resultados del análisis de inventario. En general, este proceso implica relacionar los datos del inventario con impactos ambientales específicos, tratando de valorar dichos impactos. El nivel de detalle, la selección de los impactos evaluados y las metodologías usadas dependen del objetivo y alcance del estudio.

La interpretación de resultados consiste en la evaluación sistemática de las necesidades y oportunidades para reducir las cargas ambientales asociadas con el consumo de energía, de materias primas y el impacto ambiental de las emisiones que tienen lugar durante el ciclo de vida de un producto, proceso o actividad; En esta etapa se combinan los resultados de las dos etapas anteriores (análisis de inventario y evaluación de impacto), con la finalidad de extraer, de acuerdo con los objetivos y alcance del estudio, conclusiones y recomendaciones que permitan la toma de decisiones futuras.

4.1.1. Categorías de impacto ambiental.

El estudio de ACV evalúa varias categorías de impacto según el sector y objetivo del proceso del producto y/o servicio en estudio; para la declaración ambiental de un producto se debe considerar la norma ISO 14025: Reglas de Categorización de un Producto y dependerá del tipo de sistema bajo estudio. Las categorías de impacto evaluadas por la metodología ILCD 2011 (El método ILCD Midpoint fue publicado por el *Joint Research Centre* de la Comisión Europea en 2012, empleando los factores de caracterización para la evaluación de impacto según lo recomendado en el documento "*Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context - based on existing environmental impact assessment models and factors (EC-JRC, 2011)*".)

Tabla 4-1. Categoría de impacto ambiental.

CATEGORÍA DE IMPACTO AMBIENTAL	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE REFERENCIA
Cambio climático:	Cambios extremos del clima: de lluvias y sequías, incremento de la temperatura atmosférica debido a la emisión de gases de efecto invernadero	kg eq. CO ₂
Agotamiento del ozono:	Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de ozono atmosférica.	kg eq. CFC- 11
Toxicidad humana, efectos no carcinogénicos:	Riesgos relativos y consecuencias sobre la salud.	CTUh
Partículas:	Impactos respiratorios causados por sustancias inorgánicas respirables provenientes de emisiones de fuentes primarias y secundarias	kg PM 2.5 eq.
Radiación ionizante E (ecosistemas):	Efecto de la exposición a la radiación sobre la salud humana y el ecosistema	kBq. U235 eq.
Formación de oxidantes fotoquímicos:	Formación de los precursores que dan lugar a la contaminación fotoquímica. La luz solar incide sobre dichos precursores, provocando la formación de una serie de compuestos conocidos como oxidantes fotoquímicos (ejemplo: Ozono-O ₃).	kg eq. C ₂ H ₄
Acidificación	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera.	mole H ⁺
Eutrofización:	Crecimiento excesivo de la población de algas originado por el enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo del oxígeno del agua.	kg. Eq. de NO ₃
Ecotoxicidad	Probabilidad de un efecto tóxico sobre el tiempo y el espacio asociados con la descarga de una sustancia química en el ambiente	CTUe
Uso del suelo	Daño al ecosistema debido a los efectos de la ocupación y transformación del suelo	(kg C / m ² / a), kg de déficit de C
Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables	Reducción de los recursos renovables (recursos bióticos) y no renovables (minerales y combustibles fósiles).	kg Sb eq

Fuente: European Commission & Joint Research Centre Institute for Environmental and Sustainability, 2012.

4.1.2. Evaluación del Ciclo de Vida

Para el actual proyecto se ha definido analizar y evaluar el ciclo de vida con el “Eco-indicador 99” (Anexo 4-1), los Eco-indicadores son números que expresan el impacto ambiental total de un proceso o producto. Con los Eco-indicadores estándar se puede analizar las cargas ambientales de determinados procesos o productos durante su Ciclo de Vida.

Impactos ambientales de los productos

Todos los productos dañan el medio ambiente de una forma u otra. Las materias primas tienen que extraerse, el producto tiene que fabricarse, distribuirse, embalsarse y por último, eliminarse. Durante la utilización de los productos suele producirse también un impacto ambiental, ya que

en esta etapa del Ciclo de Vida se suele consumir energía o materiales. Si deseamos valorar el daño ambiental de un producto, debemos estudiar todas las etapas de su Ciclo de Vida. El análisis ambiental de todas las fases del Ciclo de Vida recibe el nombre de Análisis del Ciclo de Vida ACV (LCA o Life Cycle Assessment).

El método ACV se ha desarrollado incorporando un sistema de coeficientes de ponderación, lo que permite calcular un valor único que representa el impacto ambiental total a partir de los efectos evaluados. Este valor se denomina Ecoindicador.

Los datos se han recopilado previamente en el caso de la mayoría de los materiales y procesos, y de ahí se ha calculado el Eco-indicador. Se han definido los materiales y los procesos de tal forma que encajen entre sí, de esta manera, se obtiene un indicador de la producción de cada uno de los materiales a ser utilizados en el proyecto.

El Eco-indicador de un material o proceso consiste por lo tanto en un número que indica el impacto ambiental de dicho material o proceso, a partir de los datos obtenidos del Análisis de Ciclo de Vida. Cuanto mayor es el indicador, mayor es el impacto ambiental. En el Eco-indicador 99 se ha definido el término “medio ambiente” según tres tipos de daños:

- **A la salud humana:** En esta categoría se incluye el número y la duración de las enfermedades, y los años de vida perdidos debido a la muerte prematura por causas ambientales. Los efectos aquí incluidos son: cambio climático, disminución de la capa de ozono, efectos cancerígenos y respiratorios y radiación ionizante (nuclear).
- **A la calidad del medio ambiente:** En esta categoría se incluye el efecto sobre la diversidad de especies, especialmente en las plantas vasculares y los organismos sencillos. Entre los efectos incluidos están: la ecotoxicidad, acidificación, eutrofización y el uso del suelo.
- **A los recursos:** En esta categoría se incluye la necesidad extra de energía requerida en el futuro para extraer mineral de baja calidad y recursos fósiles. La disminución de los recursos brutos, tales como arena y gravilla se incluyen dentro del uso del suelo.

Junto a los impactos ambientales aquí mencionados hay otros impactos adicionales que podrían contribuir a estas tres categorías de daño. Bajo criterio del equipo técnico, se han incluido los más relevantes.

Usos y limitaciones

Durante el proceso de diseño, se genera un gran número de opciones que pueden ser analizadas para elegir la que se crea más conveniente. Para desarrollar proyectos compatibles con el medio ambiente, debe ser posible se debe incluir los aspectos ambientales de un producto en el análisis y la selección de las opciones de diseño.

Los valores estándar de ecoindicadores se han desarrollado como una herramienta práctica que apoya en la búsqueda de alternativas más sostenibles. Su propósito principal es facilitar la toma de decisiones con criterios ambientales y servir como un recurso de uso interno.

No están concebidos para su aplicación en el marketing ambiental, el etiquetado ecológico ni para realizar comparaciones públicas que afirmen que un producto es superior a otro. Asimismo, tampoco han sido diseñados para que los gobiernos los utilicen como normas, patrones o directrices oficiales. El uso de Eco-indicadores sólo tiene un propósito: hacer productos más compatibles con el medio ambiente; es por tanto, una herramienta que puede utilizarse en todas las empresas y sectores (Ministry of Housing, 2000).

Unidades de los Eco-indicadores

Los valores estándar de los Eco-indicadores se pueden considerar como cifras sin dimensión. Como base utiliza el “punto Eco-indicador” (Pt). En las listas de Eco-indicadores se emplea normalmente la unidad de milipuntos (mPt), es decir: 700 mPt= 0.7 Pt.

El valor absoluto de los puntos no es demasiado relevante ya que el objetivo principal es el de comparar las diferencias relativas entre productos o componentes. La escala se ha elegido de tal forma que el valor de 1 Pt represente 1 centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano medio.

Los valores estándar de Eco-indicador 99 se clasifican en:

- Materiales: los indicadores de materiales se miden según la medida de 1 kilo de material.
- Procesos de producción: tratamiento y procesado de varios materiales. Cada tratamiento se expresa en la unidad apropiada al proceso particular (metros cuadrados, kilos, metros soldados, etc.).
- Procesos de transporte: se expresan normalmente en toneladas por kilómetro.
- Procesos de generación de energía: se determinan unidades para electricidad y calor.
- Escenarios de eliminación: se expresan por kilos o por materiales, subdivididos en los tipos de materiales y en los métodos para proceder a su desecho.

Las cifras de las medias se utilizan para realizar estas estimaciones, empleando una definición particular de los términos “material” y “proceso”.

Para calcular los Eco-indicadores es necesario dar tres pasos:

- Inventario de las emisiones relevantes, la extracción de recursos y el uso del suelo de todos los procesos incluidos en el Ciclo de Vida de un producto. Es un procedimiento estándar de los LCA.
- Cálculo de los daños que pueden causar esos flujos a la salud humana, a la calidad del ecosistema y a los recursos.
- Ponderación de las tres categorías de daño.

Inventario de los procesos

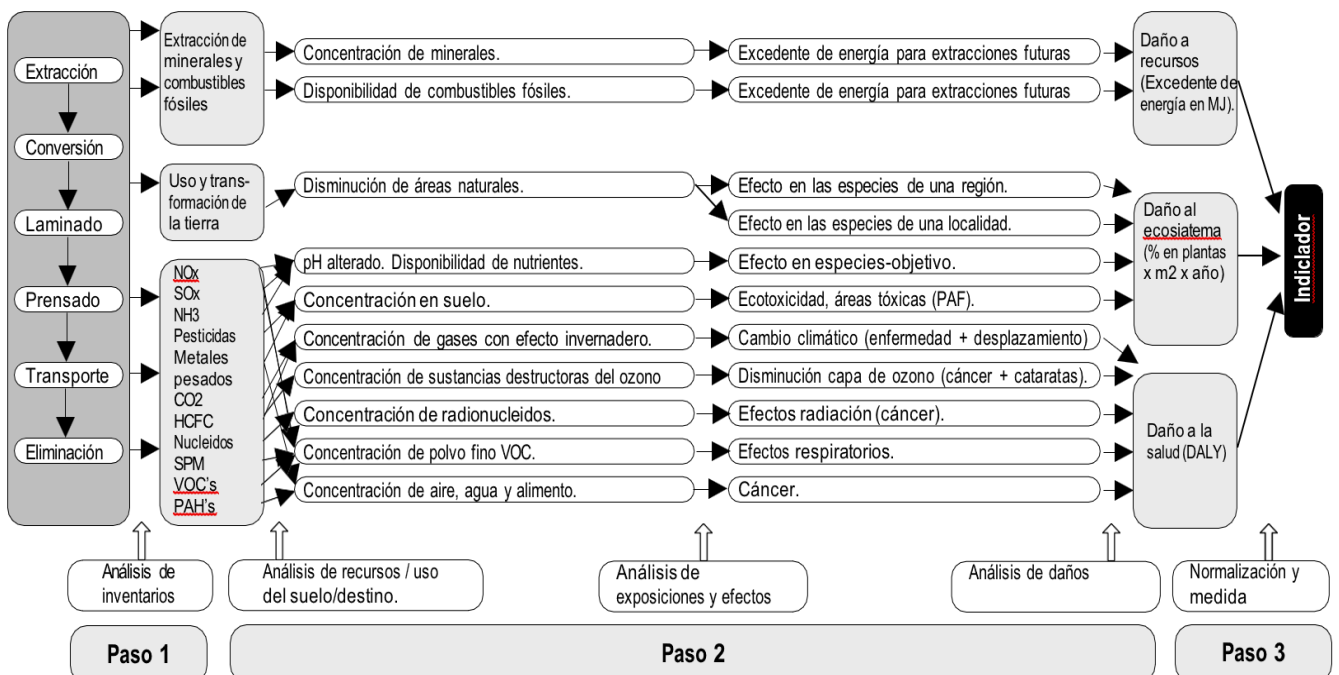
En el inventario de esos datos se empleó una metodología consistente que incluye elementos tales como:

- Límites del sistema: lo que se incluye y lo que no;
- Clasificación: cómo tratar procesos industriales que generan más de una salida;
- Aspectos regionales: si se utilizan datos alemanes, suizos o de otros países europeos;
- Temas sobre la calidad de los datos generales: edad, representatividad, medias, tecnología moderna etc.

El modelo de daños

Para poder utilizar las medidas de las tres categorías de daño se ha desarrollado una serie de modelos de daño complejos. En la siguiente figura se representa los mismos de forma esquemática.

Figura 4-2. Representación detallada del modelo de daños.



Fuente: Anexo A Eco-Indicador 99.

Ponderación

El paso más crítico y controvertido en una metodología es el paso de ponderación. En el desarrollo de la metodología con Eco-indicator 99 se inicia con el diseño del procedimiento de ponderación y se investiga el tipo de información que podría manejar un equipo de personas para realizar el procedimiento de ponderación; en este caso se miden los diferentes tipos de daños que causan

esos impactos y se limita sólo a tres el número de elementos a analizar. De esta forma, sólo se tiene que evaluar la seriedad de estas tres categorías de impactos:

- Daño a la salud humana: expresado como el número de años de vida perdidos y el número de años que ha sufrido una enfermedad. Se combinan bajo el nombre de “años de vida sometidos a una discapacidad” (DALYs), término también utilizado por el banco mundial y la OMS.
- Daño a la calidad del ecosistema: expresado como la pérdida de especies en un área determinada durante un tiempo determinado.
- Daño a los recursos: expresados como el exceso de energía que se necesitará para extraer minerales y combustibles fósiles en el futuro.

Los resultados obtenidos indican que los miembros de este grupo consideran igualmente importante los daños ocasionados a la salud y al ecosistema, considerando la mitad de importante los daños a los recursos.

Tabla 4-2. Valores de ponderación del proyecto.

Material	Indicador	Descripción	Cantidad Kg
Producción de metales férricos (en milipuntos por Kg)			
Hierro fundido	240	Hierro fundido con >2% de carbón	1
Acero de convertidores	94	Bloques de material que sólo contienen acero primario	1
Acero de arco eléctrico	24	Bloques de material que sólo contienen chatarra (acero secundario)	1
Acero	86	Bloques de material que sólo contienen 80% de hierro primario y 20% de restos	1
Acero de alta aleación	910	Bloques de material que sólo contienen 71% de acero primario, 16% Cr, 13% Ni.	1
Acero de baja aleación	110	Bloques de material que sólo contienen 93% de acero primario, 5% de restos y 1% de materiales de aleación	1
Producción de metales no férricos (en milipuntos por Kg)			
Aluminio 100% rec	60	Bloques de material que sólo contienen materiales secundarios	1
Aluminio 0% rec.	780	Bloques de material que sólo contienen materiales primarios	1
Cromo	970	Bloques de material que sólo contienen materiales primarios	1
Cobre	1400	Bloques de material que sólo contienen materiales primarios	1
Plomo	640	Bloques de material que contienen 50% de plomo secundario	1
Níquel enriquecido	5200	Bloques de material que sólo contienen materiales primarios	1

Material	Indicador	Descripción	Cantidad Kg
Paladio enriquecido	4600000	Bloques de material que sólo contienen materiales primarios	1
Platino	7000000	Bloques de material que sólo contienen materiales primarios	1
Rodio enriquecido	12000000	Bloques de material que sólo contienen materiales primarios	1
Zinc	3200	Bloques de material que sólo contienen materiales primarios (baño de calidad)	1
Procesado de metales (en milipuntos)			
Curvado-aluminio	0,000047	Una hoja de 1 mm de espesor y 1 m de ancho, curvada 90º	4
Curvado-acero	0,00008	Una hoja de 1 mm de espesor y 1 m de ancho, curvada 90º	4
Curvado-RVS	0,00011	Una hoja de 1 mm de espesor y 1 m de ancho, curvada 90º	4
Soldadura fuerte (con plata, cobre o latón)	4000	Por kg de cobresoldadura, incluyendo material de cobresoldado (45% de plata, 27% de cobre, 25% de latón)	1
Laminado en frío de rollos	18	Reducción de 1 mm en cada bandeja de 1 m2.	4
Cromado electrolítico	1100	Por m2, de 1 µm de espesor, doble cara, datos poco fiables	4
Galvanizado electrolítico	130	Por m2, de 2,5 µm de espesor, doble cara, datos poco fiables	4
Extrusión – aluminio	72	Por kg	4
Fresado, torneado, perforación	800	Por dm3 de material eliminado sin producción de material de desecho	4
Prensado	23	Por kg de material deformado sin incluir las partes no deformadas	4
Soldado por puntos – aluminio	2,7	Por soldadura de 7 mm de diámetro, ancho de la lámina: 2 mm	4
Corte / estampación – aluminio	0,000036	Por mm2 de superficie de corte	4
Corte / estampación – acero	0,00006	Por mm2 de superficie de corte	4
Corte / estampación – RVS	0,000086	Por mm2 de superficie de corte	4
Laminado	30	Por kg producido de láminas fuera del material del bloque	4
Zincado de bandas	4300	(Baño de zinc sedzimir) por m2, de 20-45 µm de espesor, incluyendo el zinc	1
Galvanizado en caliente	3300	Por m2, espesor de 100 µm incluyendo zinc	1
Baño de zinc (conversión um)	49	Por m2, espesor extra µm, incluyendo zinc	1
Producción de Plástico Granulado (en milipuntos por Kg)			
ABS	400		3

Material	Indicador	Descripción	Cantidad Kg
HDPE	330		1
LDPE	360		1
PA 6.6	630		3
PC	510		1
PET	380		1
PET botellas	390	Para botellas	3
PP	330		1
PS (GPPS)	370	Uso general	3
PS (HIPS)	360	Gran impacto	1
PS (EPS)	360	Expandible	3
PUR absorción de energía	490		3
PUR bloques de espuma flexible	480	Para muebles, camas, ropa	3
PUR espuma dura	420	Para elaborar electrodomésticos, aislamientos, materiales de construcción	1
PUR espuma semirígida	480		3
PVC gran impacto	280	Sin estabilizador de metales (Pb o Ba) ni plastificantes (véase químicos)	1
PVC rígido	270	PVC rígido con 10% de plastificantes (estimación aproximada)	1
PVC flexible	240	PVC flexible con 50% de plastificantes (estimación aproximada)	1
PVDC	440	Para capas finas	3
Procesados de Plásticos (en milipuntos)			
Extrusión con soplado de aire de PE	2,1	Por kg de PE granulado, pero sin producción de PE. Láminas para fabricar bolsas	2
Calandrado de láminas de PVC	3,7	Por kg de PVC granulado, pero sin producción de PVC	2
Moldeado por inyección –1	21	Por kg de PE; PP; PS y ABS granulado, pero sin producción de material	4
Moldeado por inyección –2	44	Por kg de PVC y PC, pero sin producción de material	4
Granceado, taladrado	6,4	Por dm3 de material procesado, pero sin producción de material de desecho	4
Modelado por presión	6,4	Por kg	4
Moldeado de PUR por inyección	12	Por kg, sin producción de PUR ni otros posibles componentes	4
Soldadura ultrasónica	0,098	Por metro soldado	4
Moldeo o conformado en vacío	9,1	Por kg de material, pero sin producción del mismo	4
Producción de caucho (en milipuntos por Kg)			
Gomas EPDM	360	Vulcanizado con 44% de carbono, incluyendo el moldeado	1
Producción de materiales de embalaje (en milipuntos por Kg)			

Material	Indicador	Descripción	Cantidad Kg
Cartón de embalaje	69	Omisión de la absorción de CO ₂ en la fase de dilatación	1
Papel	96	Contiene 65% de papel de deshecho, omisión de la absorción de CO ₂ en la fase de dilatación	1
Vidrio (marrón)	50	Vidrio para envases que contiene un 61% de vidrio reciclado	2
Vidrio (verde)	51	Vidrio para envases que contiene un 99% de vidrio reciclado	2
Vidrio (blanco)	58	Vidrio para envases que contiene un 55% de vidrio reciclado	2
Producción de productos químicos y otros (en milipuntos por Kg)			
Amoniaco	160	NH ₃	1
Argón	7,8	Gas inerte empleado en bombillas, soldadura de metales reactivos como el aluminio	1
Betonita	13	Para la arena de los gatos, porcelana etc.	1
Negro de humo	180	Empleado como colorante y relleno	1
Productos químicos inorgánicos	53	Valor medio de producción de químicos inorgánicos	1
Productos químicos orgánicos	99	Valor medio de producción de químicos orgánicos	1
Cloro	38	Cl ₂ producido mediante procesos de diagrama (tecnología punta)	1
Dimetil p-pathalate	190	Como plastificante para suavizar el PVC	1
Etilenglicol / óxido de etileno	330	Como disolvente artificial y limpiador	1
Fueloil	180	Sólo para producción. Sin combustión	1
Gasolina sin plomo	210	Sólo para producción. Sin combustión	1
Diesel (Gasóleo)	180	Sólo para producción. Sin combustión	1
H ₂	830	Gas hidrógeno. Empleado en procesos de reducción	1
H ₂ SO ₄	22	Ácido sulfúrico. Empleado para limpieza y mordentado	1
HCl	39	Ácido hidroclorehídrico. Empleado para procesar metales y en limpieza	1
HF	140	Ácido fluorhídrico	1
N ₂	12	Nitrógeno. Empleado como atmósfera inerte	1
NaCl	6,6	Cloruro de sodio	1
NaOH	38	Sosa cáustica	1
Ácido nítrico	55	HNO ₃ . Empleado para evitar la oxidación de los metales (mordentado)	1
O ₂	12	Oxígeno	1
Ácido fosfórico	99	H ₃ PO ₄ Empleada en preparados y fertilizantes	1
Polipropilen glicol	200	Utilizado como anticongelante y disolvente	1
R134a (refrigerante)	150	Sólo producción de R134. La emisión de 1 kg de R134 genera 7300 mPt	1

Material	Indicador	Descripción	Cantidad Kg
R22 (refrigerante)	240	Sólo producción de R22. La emisión de 1 kg de R22 genera 8400 mPt	1
Silicato (vidrio soluble)	60	Empleado en la fabricación de gel de sílice (sílica gel), detergentes y en la limpieza de metales	1
Sosa	45	Na ₂ CO ₃ . Empleados en detergentes	1
Urea	130	En fertilizantes	1
Agua descarbonizada	0,0026	Sólo procesado. No se contemplan los efectos en aguas subterráneas (si los hubiera)	1
Agua desmineralizada	0,026	Sólo procesado. No se contemplan los efectos en aguas subterráneas (si los hubiera)	1
Zeolita	160	Utilizada en procesos de absorción y en detergentes	1
Producción de material de construcción (en milipuntos por Kg)			
Barniz alquídico	520	Producción y emisiones durante el barnizado, conteniendo 55% de disolventes	5
Cemento	20	Cemento portland	1
Material cerámico	28	Ladrillos etc.	1
Hormigón sin refuerzo	3,8	Hormigón con densidad de 2200 kg/m ³	1
Vidrio templado revestido	51	Para ventanas. Cubierta de estaño, plata y níquel (77 g/m ²)	1
Vidrio templado no revestido	49	Para ventanas	1
Yeso	9,9	Selenita. Empleada como relleno	1
Gravilla	0,84	Extracción y transporte	1
Cal (quemada)	28	CaO. Empleados para producir cementos. También se puede utilizar como base consistente.	1
Cal (hidratada)	21	Ca(OH) ₂ . Empleados para fabricar mortero	1
Lana mineral	61	Para aislamientos	1
Construcción sólida	1500	Estimación para un edificio (cemento) por m ³ de volumen (bienes de equipo)	1
Construcción en metal	4300	Estimación para un edificio (cemento) por m ³ de volumen (bienes de equipo)	1
Arena	0,82	Extracción y transporte	1
Tableros de madera	39	Madera europea (criterios FSC). Omisión de la absorción de CO ₂ en la fase de crecimiento	1
Madera maciza	6,6	Madera europea (criterios FSC). Omisión de la absorción de CO ₂ en la fase de crecimiento	1
Uso del suelo	45	Ocupación como suelo urbano por m ² al año	1
Calor (en milipuntos por MJ)			
Briqueta de carbón (estufas)	4,6	Combustión de carbón en un horno de 5-15 kW	1
Carbón para hornos industriales	4,2	Combustión de carbón en un horno industrial (1-10 MW)	1

Material	Indicador	Descripción	Cantidad Kg
Aglomerado de lignito	3,2	Combustión de lignito en un horno de 5-15 kW	1
Gas (calderas)	5,4	Combustión de gas en una caldera atmosférica (≈100 kW) con NOx bajo	1
Gas para hornos industriales	5,3	Combustión de gas en un horno industrial (≈100 kW) con NOx bajo	1
Petróleo (calderas)	5,6	Combustión de petróleo en una caldera 10 kW	1
Petróleo para hornos industriales	11	Combustión de petróleo en un horno industrial	1
Madera para combustión	1,6	Combustión de madera. Omisión de la absorción y emisión de CO2	1
Energía solar (en milipuntos por kWh)			
Placa solar de fachada m-Si	9,7	Pequeña instalación (3 kWp) con células monocristalinas, empleada en fachadas de edificios	1
Placa solar de fachada p-Si	14	Pequeña instalación (3 kWp) con células policristalinas, empleada en fachadas de edificios	1
Techo solar m-Si	7,2	Pequeña instalación (3 kWp) con células monocristalinas, empleada en techos de edificios	1
Techo solar p-Si	10	Pequeña instalación (3 kWp) con células policristalinas, empleada en techos de edificios	1
Electricidad (en milipuntos por kWh)			
Electricidad AV Europa (UCPTE)	22	Alto voltaje (≈24 kV)	1
Electricidad MV Europa (UCPTE)	22	Voltaje medio (1kV-24 kV)	1
Electricidad BV Europa (UCPTE)	26	Bajo voltaje (≈1000 Volt)	1
Electricidad BV Austria	18	Bajo voltaje (≈1000 Volt)	1
Electricidad BV Bélgica	22	Bajo voltaje (≈1000 Volt)	1
Electricidad BV Suiza	8,4	Bajo voltaje (≈1000 Volt)	1
Electricidad BV Gran Bretaña	33	Bajo voltaje (≈1000 Volt)	1
Electricidad BV Francia	8,9	Bajo voltaje (≈1000 Volt)	1
Electricidad BV Grecia	61	Bajo voltaje (≈1000 Volt)	1
Electricidad BV Italia	47	Bajo voltaje (≈1000 Volt)	1
Electricidad BV Países Bajos	37	Bajo voltaje (≈1000 Volt)	1
Electricidad BV Portugal	46	Bajo voltaje (≈1000 Volt)	1
Transporte (en milipuntos por tkm)			
Camión de reparto ≈3,5 t	140	Transporte por carretera con 30% de carga, 33% de gasolina sin plomo, 38% de gasolina	1

Material	Indicador		Descripción	Cantidad Kg	
			con plomo, 29% de diesel (38% sin catalizador). Media europea incluyendo viaje de vuelta		
Camión 16 t	34		Transporte por carretera con 40% de carga, Media europea incluyendo viaje de vuelta	1	
Camión 28 t	22		Transporte por carretera con 40% de carga, Media europea incluyendo viaje de vuelta	1	
Camión 28 t (volumen)	8		Transporte por carretera por m3km. Se emplea cuando el factor determinante es le volumen y no la carga	1	
Camión 40 t	15		Transporte por carretera con 50% de carga, Media europea incluyendo viaje de vuelta	1	
Utilitario W-Europa	29		Transporte por carretera por km	1	
Transporte por ferrocarril	3,9		Transporte por tren, 20% diesel y 80% mediante trenes eléctricos	1	
Buque cisterna fluvial	5		Transporte marítimo con 65% de carga. Media europea incluyendo el viaje de vuelta	1	
Buque cisterna oceánico	0,8		Transporte marítimo con 54% de carga. Media europea incluyendo el viaje de vuelta	1	
Buque carguero fluvial	5,1		Transporte marítimo con 70% de carga. Media europea incluyendo el viaje de vuelta	1	
Buque carguero oceánico	1,1		Transporte marítimo con 70% de carga. Media europea incluyendo el viaje de vuelta	1	
Transporte aéreo medio	78		Transporte aéreo con 78% de carga. Media de todos los vuelos	6	
Transporte aéreo continental	120		Transporte aéreo en un Boeing 737 con carga del 62%. Media de todos los vuelos	6	
Transporte aéreo intercontinental	80		Transporte aéreo en un Boeing 747 con carga del 78%. Media de todos los vuelos	6	
Transporte aéreo intercontinental	72		Transporte aéreo en un Boeing 767 o MD 11 con carga del 71%. Media de todos los vuelos	6	
Reciclado de basuras (en milipuntos por kg)					
Material	Indicador		Descripción	Cantidad Kg	
	Total	Proceso	Prod. Eliminado		
Reciclado de PE	-240	86	-330	Si no se mezcla con otros plásticos	7
Reciclado de PP	-210	86	-300	Si no se mezcla con otros plásticos	7
Reciclado de PS	-240	86	-330	Si no se mezcla con otros plásticos	7
Reciclado de PVC	-170	86	-250	Si no se mezcla con otros plásticos	7
Reciclado de papel	-1,2	32	-33	El reciclado evita producir papel virgen	2
Reciclado de cartón	-8,3	41	-50	El reciclado evita producir cartón virgen	2

Material		Indicador		Descripción		Cantidad Kg
Reciclado de vidrio		-15	51	-66	El reciclado evita producir vidrio virgen	2
Reciclado aluminio		-720	60	-780	El reciclado evita producir aluminio primario	1
Reciclado metales de hierro		-70	24	-94	El reciclado evita producir acero primario	1
Tratamiento de residuos (en milipuntos por kg)						
Incineración		Realizada en una planta de incineración de basuras. Medio de recuperación de energía, el 22% de los residuos urbanos de Europa es incinerada				
Incineración de PE		-19	Este indicador puede utilizarse para HDPE y LDPE			2
Incineración de PP		-13				2
Incineración de PUR		2,8	Este indicador puede utilizarse para todos los tipos de PUR			2
Incineración de PET		-6,3				2
Incineración de PS		-5,3	Producción de energía relativamente baja, también puede usarse para ABS, HIPS, GPPS, EPS			2
Incineración de nylon		1,1	Liberación de energía relativamente baja			2
Incineración de PVC		37	Liberación de energía relativamente baja			2
Incineración de PVDC		66	Liberación de energía relativamente baja			2
Incineración de papel		-12	Gran liberación de energía. Emisiones de CO2 no contempladas			2
Incineración de cartón		-12	Gran liberación de energía. Emisiones de CO2 no contempladas			2
Incineración de acero		-32	40% de separación magnética para reciclado, eliminando el hierro crudo (media europea)			2
Incineración de aluminio		-110	15% de separación magnética para reciclado, eliminando aluminio primario			2
Incineración de vidrio		5,1	Se trata de un material casi inerte. El indicador se puede aplicar a otros materiales inertes			2
Vertederos		Vertederos controlados. El 78% de los residuos urbanos europeos se lleva a vertederos				
Vertederos de PE		3,9				2
Vertederos de PP		3,5				2
Vertederos de PET		3,1				2
Vertederos de PS		4,1	Este indicador también puede aplicarse a los vertederos de ABS			2
Vertederos de espuma EPS		7,4	Espuma de PS, 40 kg/m3			2
Vertederos de espuma 20 kg/m3		9,7	Vertederos de espuma tipo PUR con 20 kg/m3			2

Material	Indicador	Descripción	Cantidad Kg
Vertederos de espuma 100 kg/m3	4,3	Vertederos de espuma tipo PUR con 100 kg/m3	2
Vertedero de Nylon	3,6		2
Vertederos de PVC	2,8	Se excluye el filtrado de estabilizadores del metal	2
Vertederos de PVDC	2,2		2
Vertederos de papel	4,3	No se consideran las emisiones de CO2 y metano	2
Vertederos de cartón	4,2	No se consideran las emisiones de CO2 y metano	2
Vertederos de vidrio	1,4	Se trata de un material casi inerte. El indicador se puede aplicar a otros materiales inertes	2
Vertederos de acero	1,4	Se trata de un material casi inerte. El indicador se puede aplicar a otros materiales inertes	2
Vertederos de aluminio	1,4	Se trata de un material casi inerte. El indicador se puede aplicar a otros materiales inertes	2
Vertederos de 1 m3 de volumen	140	Volumen del vertedero por m3, empleo de restos voluminosos, como espuma y derivados	2
Residuos Urbanos	En Europa, el 22% de los residuos urbanos se incinera y el 78% se lleva a vertederos. Este indicador no es válido para residuos voluminosos y materiales secundarios		
Residuos urbanos de PE	-1,1		2
Residuos urbanos de PP	-0,13		2
Residuos urbanos de PET	1		2
Residuos urbanos de PS	2	No aplicable a espumas	2
Residuos urbanos de PA 6.6	3,1		2
Residuos urbanos de PVC	10		2
Residuos urbanos de PVDC	16		2
Residuos urbanos de papel	0,71		2
Residuos urbanos de cartón	0,64		2
Residuos urbanos de acero ECCS	-5,9	Sólo válido para acero primario	2
Residuos urbanos de aluminio	-23	Sólo válido para aluminio primario	2
Residuos urbanos de vidrio	2,2		2

Material	Indicador	Descripción	Cantidad Kg
Basura domestica	Separación por consumidor de la Residuos destinados al reciclado (media europea)		
Papel	-0,13	44% de separación	2
Cartón	-3,3	44% de separación	2
Vidrio	-6,9	52% de separación	2

Fuente: (Ministry of Housing, 2000).

4.2 Desarrollo.

4.2.1. Objetivos

Objetivo General.

Evaluar los impactos ambientales potenciales del Parque Fotovoltaico La Ceiba mediante la aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), considerando todas las etapas del sistema, desde la construcción hasta su cierre, en la provincia de Loja, cantón Zapotillo, parroquia Zapotillo, sector La Ceiba.

Objetivos Específicos:

- ✓ Definir los límites del sistema, la unidad funcional y los supuestos del estudio de acuerdo con la metodología de análisis de ciclo de vida.
- ✓ Elaborar el inventario de ciclo de vida, identificando y cuantificando las entradas y salidas del sistema.
- ✓ Evaluar los impactos ambientales potenciales a partir del inventario generado.
- ✓ Interpretar los resultados obtenidos para identificar las etapas críticas del sistema y proponer mejoras orientadas a la reducción de impactos ambientales.

4.2.2. Alcance

La investigación del sistema se adaptó conforme a la información recopilada. En el presente estudio se considera el sistema desde el transporte de materias primas hasta el fin de vida útil del sistema considerando desmontaje y reciclaje.

4.2.3. Unidad Funcional

El estudio se basa en la unidad funcional de 1 KWh de electricidad, para permitir comparaciones con sistemas encontrados en la literatura y con otros tipos de tecnologías de generación solar fotovoltaica. Los impactos ambientales potenciales también están referenciados a la unidad de 1 KWh.

4.2.4. Monto Estimado y Vida Útil

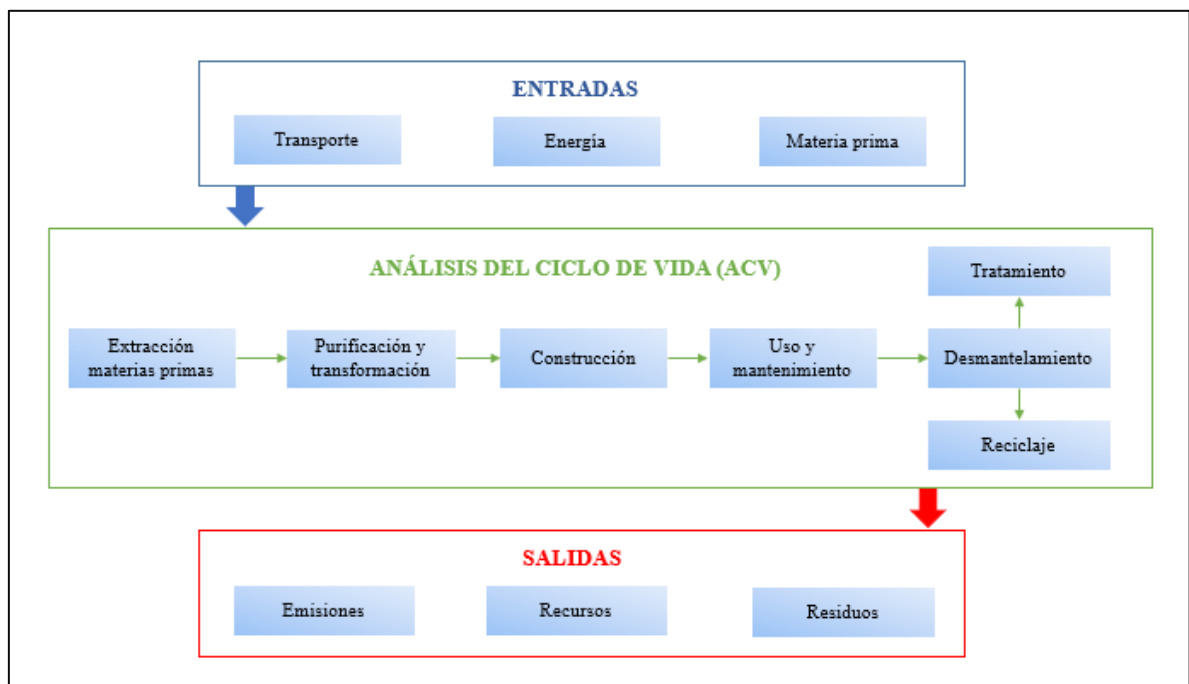
La inversión estimada para el Proyecto alcanza un total aproximado de 150 MMUSD (ciento cincuenta millones de dólares americanos). El Proyecto tiene una vida útil de 25 años, desde su entrada en operación comercial. Este plazo podrá ser extendido en la medida que las condiciones de los equipos instalados y del mercado eléctrico justifiquen el continuar con la inversión en el proyecto.

4.2.5. Límites del Sistema

El Parque Fotovoltaico La Ceiba incluye las siguientes etapas (ver la siguiente figura):

- Etapa de construcción (transporte, equipos.)
- Fase de operación y mantenimiento de la planta fotovoltaica.
- Fase de desmantelamiento o cierre del proyecto.

Figura 4-3. Límites del Sistema.



Elaborado: Equipo consultor, 2025

4.2.6. Descripción del Análisis de Inventario

El análisis de inventario de ciclo de vida (ACV) se desarrolló a partir de bases de datos sustentadas en supuestos técnicos y en información secundaria proveniente de estudios reconocidos, debido a la limitada disponibilidad de datos específicos del proyecto. En general, no se dispone de información detallada sobre variables clave asociadas a las distintas etapas del ciclo de vida, tales como consumos reales de insumos, tiempos efectivos de operación, frecuencias de uso, rendimientos específicos, así como parámetros logísticos y operativos. Esta falta de información

restringe la posibilidad de realizar estimaciones directas y precisas de los flujos de entrada y salida del sistema.

Ante estas limitaciones, se recurrió a bases de datos consolidadas y literatura especializada, como AMPYR y los trabajos de Frischknecht et al. (2020) y Vidal et al. (2017), que proporcionan información representativa sobre materiales, procesos y flujos asociados a sistemas fotovoltaicos. Este enfoque es consistente con metodologías empleadas en evaluaciones ambientales y análisis de ciclo de vida (ACV), donde, en ausencia de información específica del proyecto, se recurre a datos secundarios, factores de referencia o información derivada de experiencias documentadas, conforme a lineamientos establecidos en normas internacionales como la ISO 14044 y guías metodológicas del IPCC.

Asimismo, los valores reportados en dicho documento se basan en información consolidada a partir de proyectos ejecutados, lo que implica que reflejan condiciones reales de operación, incluyendo el uso efectivo de maquinaria pesada, logística de transporte y requerimientos energéticos asociados a la construcción. En este sentido, el uso de este tipo de referencia permite reducir la incertidumbre asociada a estimaciones teóricas, al apoyarse en datos empíricos representativos de proyectos similares.

Estas fuentes permiten caracterizar de manera consistente las distintas etapas del ciclo de vida del sistema, incluyendo la producción de materiales, el transporte, la construcción, la operación, el desmontaje y el reciclaje. A partir de esta información, se identificaron y cuantificaron las principales entradas y salidas del sistema, lo que posibilitó la evaluación de los impactos ambientales del proyecto con un nivel de aproximación acorde a la disponibilidad de datos.

La información consignada en el inventario de ciclo de vida fue desarrollada en el Capítulo 7 del presente Estudio de Impacto Ambiental (EIA), correspondiente a la Demanda de Recursos Naturales, donde se expone de manera detallada la metodología empleada, así como los resultados del análisis realizado.

Inventario Ambiental.

Se trata de una zona que no forma parte de ningún espacio dentro del Sistema nacional de Áreas Protegidas, siendo el Área Protegida con Autonomía Descentralizada la más cercana en un radio de 15 km.

La vegetación que forma parte de este entorno y que será reducida con la instalación del Parque Fotovoltaico La Ceiba, se trata de

- ✓ Área sin cobertura vegetal.
- ✓ Bosque nativo.
- ✓ Vegetación Arbustiva y Herbácea

Adicionalmente dentro del área de implantación del proyecto nos encontramos con tres quebradas efímeras. La evaluación del impacto visual aquí se podría considerar como moderada, ya que se encuentra próxima al polígono industrial y lejos de cualquier zona de especial

protección, aunque dista pocos kilómetros del centro poblado de Catamaillo, por lo que puede generar impacto para la población.

Inventario del sistema.

En este apartado se consideraron las fases que se llevan a cabo en el sistema: transporte, materias primas usadas en la construcción, fase de generación (producción de energía del sistema), mantenimiento, desmantelamiento y reciclaje de la misma.

✓ **Componentes tecnológicos del proyecto.**

En el caso de los componentes tecnológicos al no ser fabricados en el Ecuador para su inventario y evaluación ambiental se considera el transporte que comprende el trayecto Puerto de Guayaquil – Zapotillo (La Ceiba) relacionando los 366 kilómetros de distancia con el peso de los componentes.

Tabla 4-3. Componentes tecnológicos.

Componente	Modelo	Peso unitario (Kg)	Cantidad
Modulo Fotovoltaico	TSM- 500DE18M.08	34.6	400088

Elaborado: Equipo consultor, 2025

Nota: Datos tomados de la descripción del proyecto.

✓ **Materias Primas**

En cuanto a las materias primas directas y auxiliares se describen a continuación:

Tabla 4-4. Materias primas

MATERIAS PRIMAS	
Directas	Auxiliares
Acero	Electro suelda
Hormigón	Mixer
Agua	Agua
Combustibles Fósiles	Gasolina, diésel, aceite
Plástico	Recipientes
Cobre	Cables

Elaborado: Equipo consultor, 2025.

Nota: Datos tomados de la descripción del proyecto.

Estas serán estimadas con respecto a su impacto ambiental en razón del tiempo y capacidades de la maquinaria utilizada en cada una de las fases del proyecto.

✓ **Fase de construcción**

Se estima que la etapa de construcción del Parque Fotovoltaico La Ceiba, dure alrededor de 18 meses. Durante esta fase se consideran diversos procesos y materiales asociados a la instalación

de la infraestructura del proyecto, incluyendo la fabricación e instalación de módulos fotovoltaicos, estructuras de soporte, obras civiles, cableado y sistemas eléctricos, así como el transporte de materiales, agua y uso de maquinaria.

Tabla 4-5. Inventario de materias primas y procesos para la fase de construcción.

Fase	Procesos y materiales	Unidad	Cantidad
Construcción	Agua	Kg	8596125
	Diésel	Kg	37152
	Hormigón	Kg	10000000
	Acero	Kg	20000000
	Cobre	Kg	800000
	Aluminio	Kg	6000000
	Silicio	Kg	553721,792
	Metales	Kg	2491748,064
	Plástico	Kg	1522734,928
	Vidrio	Kg	9274840,016
	Transporte de materiales	tkm	4983496,128

Nota: Los cálculos realizados se muestran en el Anexo 4-2 (Hoja de cálculo 3).

Elaborado: Equipo consultor, 2025.

El cálculo de las cantidades del inventario del ciclo de vida descritas en la Tabla 4-5, se realizó a partir de los parámetros técnicos del proyecto y mediante el uso de factores de referencia provenientes de la literatura para sistemas fotovoltaicos de gran escala. A continuación, se describe el procedimiento aplicado:

En primer lugar, se establecieron los datos base del proyecto, considerando una capacidad instalada de 200 MW y una duración de la fase de construcción de 18 meses (Anexo 4-2; Hoja 1). Estos parámetros permitieron dimensionar el alcance del proyecto y sirvieron como base para la estimación de consumos y cantidades.

Para el cálculo del consumo de diésel en la fase de construcción, se utilizó un factor de referencia de 600 litros por mes por cada 50 MW de capacidad instalada. Dicha cifra se obtuvo del reporte de Evaluación de Impacto Ambiental y Social de un proyecto de energía solar de 200 MWac / 260 MWp (AMPYR), como se muestra en la Tabla 2-6 denominada “*Materia prima estimada durante la fase de construcción*” del anexo 4-2, hoja 2. Este valor fue escalado a la capacidad total del proyecto (200 MW), equivalente a cuatro bloques de 50 MW. Posteriormente, el consumo mensual total fue multiplicado por la duración de la fase de construcción (18 meses), obteniendo un volumen total de 43,2 m³ de diésel.

En el caso del consumo de agua en la fase de construcción, se empleó un factor de 5730,75 m³/año, el cual involucra actividades de construcción, agua doméstica y potable. Dicha cifra se obtuvo del reporte de Evaluación de Impacto Ambiental y Social de un proyecto de energía solar de 200 MWac / 260 MWp (AMPYR), como se muestra en la Tabla 2-4 denominada “*Requerimiento de agua durante la fase de construcción*” (del anexo 4-2, hoja 2). Este valor fue igualmente escalado a la capacidad total del proyecto, obteniendo un consumo total de 8596,125 m³.

Para efectos de modelación en el análisis de ciclo de vida, el consumo de agua y diésel fue convertido de unidades de volumen (m^3) a masa (kg), considerando una densidad de 1000 kg/m^3 y 860 kg/m^3 respectivamente, con el fin de mantener la coherencia de unidades dentro del inventario.

Con relación a los materiales de infraestructura de la planta de generación fotovoltaica (hormigón, acero, cobre y aluminio), se utilizaron factores de consumo por unidad de potencia instalada (t/MW), obtenidos del artículo científico *“Tendencias mundiales en el consumo y suministro de metales: el nexo entre materia prima y energía”* (Vidal, Rostom, François, & Giraud, 2017), cuyos datos se muestran en la denominada Figura 2 del anexo 4-2, hoja 2.

Para el hormigón y el acero se adoptaron valores conservadores correspondientes al rango inferior reportado en la literatura (50 t/MW y 100 t/MW , respectivamente), mientras que para el cobre y el aluminio se utilizaron valores promedio (4 t/MW y 30 t/MW).

Esta selección se realizó con el fin de evitar la sobreestimación de impactos ambientales, considerando que estos materiales presentan una alta contribución en términos de masa dentro del sistema.

En cuanto a los módulos fotovoltaicos, se partió de un peso unitario de $34,6 \text{ kg}$ por módulo y una composición porcentual de materiales: 67% vidrio, 18% metales, 11% plásticos y 4% silicio. Esta composición fue tomada del reporte denominado: Inventarios del ciclo de vida y evaluaciones del ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos (Frischknecht, Stolz, Krebs, de Wild-Scholten, & Sinha, 2020) como se muestra en la denominada Tabla 2 del anexo 4-2, hoja 2, titulada “Lista de materiales y eficiencia de paneles de silicio monocristalino y multicristalino”. A partir de estos porcentajes, se aproximó la masa de cada material por módulo. Posteriormente, estos valores fueron multiplicados por el número total de módulos instalados (400.088 unidades), obteniendo las cantidades totales de materiales del sistema fotovoltaico.

Para el componente correspondiente al transporte de los módulos, se consideró una distancia de 366 km entre el puerto de Guayaquil y el sitio del proyecto. La masa total de los paneles fue multiplicada por la distancia, obteniendo un flujo de transporte en toneladas-kilómetro (tkm).

El detalle de los cálculos realizados, así como las fuentes de información empleadas para la estimación de dichas cantidades, se presenta en el anexo 4-2, (Hoja de cálculo 1 de cantidades) adjunta al presente estudio (*ACV_Proyecto_Fotovoltaico_La Ceiba*).

✓ **Fase de operación**

La fase de operación del Parque Fotovoltaico La Ceiba comprende principalmente actividades de mantenimiento preventivo y en caso necesario, correctivo de las instalaciones. Estas actividades incluyen la inspección visual y limpieza de los módulos fotovoltaicos, revisión de conexiones eléctricas y cableado, mantenimiento de inversores, lubricación de estructuras de seguimiento solar (trackers), así como la verificación de instalaciones eléctricas generales y de la subestación elevadora.

De acuerdo con la literatura especializada en análisis de ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos, la fase de operación presenta impactos significativamente menores en comparación con la fase

de construcción, siendo el consumo de agua el principal flujo relevante, especialmente debido a las actividades de limpieza periódica de los módulos fotovoltaicos.

En este sentido, y con el fin de mantener la coherencia metodológica del estudio, se ha priorizado la inclusión del consumo de agua como el parámetro más representativo dentro de esta fase, sin perjuicio de considerar de manera secundaria otros consumos menores como energía auxiliar, combustibles y lubricantes. Los resultados asociados al componente agua para esta fase se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4-6. Inventario para la fase de operación.

Fase	Procesos	Unidad	Cantidad
Operación	Agua	Kg	43636915

Nota: Los cálculos realizados se muestran en el Anexo 4-2 (Hoja de cálculo 3).

Elaborado: Equipo consultor, 2025.

El consumo total de agua (doméstico, potable y para limpieza) se estimó a partir de un valor anual de 1856,89 m³/año, el cual fue obtenido del reporte de Evaluación de Impacto Ambiental y Social de un proyecto de energía solar de 200 MWac / 260 MWp (AMPYR), y se muestra en la Tabla 2-5 denominada “*Requerimiento de agua durante la fase de construcción*” del anexo 4-2 (hoja 2). Posteriormente este factor fue multiplicado por el tiempo total de operación, obteniendo un consumo acumulado de 43.636,915 m³. Finalmente, se transformó de unidades de volumen (m³) a masa (kg), considerando una densidad de 1000 kg/m³.

✓ *Fase de desmantelamiento o cierre del proyecto.*

La fase de cierre o desmantelamiento del Parque Fotovoltaico La Ceiba contempla el retiro progresivo de todos los componentes e infraestructura instalada al final de la vida útil del proyecto, estimada en aproximadamente 12 meses.

Esta etapa incluye actividades como el desmontaje de módulos fotovoltaicos, estructuras de soporte, sistemas eléctricos, cableado, inversores, transformadores y demás equipos asociados, así como la rehabilitación del área intervenida en la medida de lo posible.

Los impactos ambientales en esta fase están asociados principalmente a los residuos de los módulos fotovoltaicos y su transporte hacia centros de acopio, reciclaje o disposición final (Tabla 4-7). En este sentido, se ha priorizado un escenario de reciclaje, en concordancia con prácticas actuales y recomendaciones de la literatura, lo cual permite reducir significativamente los impactos ambientales mediante la recuperación de materiales y la evitación de la producción de materias primas vírgenes.

En términos generales, la fase de cierre presenta un impacto ambiental moderado en comparación con la fase de construcción, pudiendo incluso generar beneficios ambientales netos cuando se implementan estrategias adecuadas de valorización de residuos como es el reciclaje.

Tabla 4-7. Inventario para la fase de cierre.

Fase	Procesos y materiales	Unidad	Cantidad
Cierre	Transporte de residuos	tkm	4706635,232
	Acero	Kg	20000000
	Metales	Kg	2491748,064
	Plástico	Kg	1522734,928
	Vidrio	Kg	9274840,016
	Aluminio	Kg	6000000

Nota: Los cálculos realizados se muestran en el Anexo 4-2 (Hoja de cálculo 3).

Elaborado: Equipo consultor, 2025.

En la Tabla 4-7, se planteó que las cantidades de residuos corresponden a los materiales de entrada del sistema, manteniendo la misma proporción de composición de los módulos fotovoltaicos y de la infraestructura instalada. Este enfoque es consistente con la metodología de análisis de ciclo de vida, bajo el principio de conservación de masa.

Para la modelación del transporte de residuos generados en la fase de cierre del proyecto, se consideró una distancia aproximada de 340 km hacia la ciudad de Cuenca, asumiendo que en esta localidad se realizará el tratamiento y reciclaje de los materiales recuperables. Se consideró una duración de 12 meses. La masa total de residuos fue calculada a partir de la masa de los módulos fotovoltaicos y materiales de instalación de la planta como referencia para estimar el flujo de transporte, obteniendo 4.706.635,232 tkm.

La selección de Cuenca como destino de los residuos se fundamenta en su condición de centro con infraestructura adecuada para la gestión de residuos, incluyendo la presencia de gestores ambientales autorizados y capacidades técnicas para el tratamiento, valorización y reciclaje de materiales como metales, vidrio y componentes eléctricos.

Asimismo, esta aproximación responde a un criterio conservador y representativo dentro del análisis de ciclo de vida, considerando escenarios realistas de logística regional en ausencia de información específica sobre el destino final exacto de los residuos al término de la vida útil del proyecto.

La inclusión de esta distancia permite capturar los impactos asociados al transporte en la fase de desmantelamiento, manteniendo la coherencia del modelo y alineándose con prácticas comunes en estudios de ACV, donde se emplean supuestos técnicamente justificados para representar escenarios de fin de vida.

En este contexto, el escenario de reciclaje en Cuenca resulta consistente con las políticas actuales de gestión de residuos y economía circular, contribuyendo a la reducción de impactos ambientales mediante la recuperación de materiales valorizables.

4.2.7. Cálculo del impacto

Para la obtención de los valores de impacto ambiental mediante el método Eco-indicator 99, se procedió a completar el formulario de ponderación correspondiente, respetando las unidades

establecidas para cada uno de los materiales y procesos considerados en el análisis.

Con el fin de garantizar la consistencia en los cálculos, todos los flujos de entrada (materiales y procesos) fueron expresados en unidades de masa (kg), lo que permitió su adecuada correlación con los factores de caracterización disponibles en el manual del método Eco-indicator 99.

Los factores de impacto (eco-indicadores) fueron obtenidos a partir de las tablas del manual electrónico del método descritas en las páginas A25 – A30 del documento adjunto denominado “ANEXO 4-1. Eco indicador 99”, donde se identificaron los valores correspondientes a cada material o proceso analizado. Posteriormente, estos valores fueron multiplicados por las cantidades estimadas en el inventario, con el objetivo de calcular el impacto ambiental individual de cada componente. Esto se puede evidenciar en la Tabla 4-8.

Finalmente, los resultados fueron expresados en milipuntos (mPt), permitiendo así la agregación de impactos y la obtención del valor total por etapa del ciclo de vida (construcción, operación y cierre) del proyecto.

Este procedimiento permitió identificar los procesos y materiales más relevantes desde el punto de vista ambiental, facilitando la interpretación de resultados y la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad del sistema fotovoltaico.

Tabla 4-8. Ponderación de impactos ambientales.

Fases	Procesos y materiales	Indicador	Resultado en (mPt)	Impacto en (mPt)
Construcción	Agua	0,026	223499,25	9202958350
	Diésel	180	6687360	
	Hormigón	3,8	38000000	
	Acero	86	1720000000	
	Cobre	1400	1120000000	
	Aluminio	780	4680000000	
	Silicio	60	33223307,52	
	Metales	86	214290333,5	
	Plástico	510	776594813,3	
	Vidrio	58	537940720,9	
	Transporte de materiales	15	75998315,95	
Operación	Agua	0,026	1134559,79	1134559,79
Cierre	Transporte de residuos	15	70599528,48	-6328401819
	Acero	-70	-1400000000	
	Metales	-70	-174422364,5	
	Plástico	-240	-365456382,7	
	Vidrio	-15	-139122600,2	
	Aluminio	-720	-4320000000	

Elaborado: Equipo consultor, 2025.

El análisis de los resultados obtenidos mediante el método Eco-indicator 99 permitió identificar que los materiales con mayor contribución al impacto ambiental total, expresado en milipuntos (mPt), corresponden principalmente al aluminio y al acero. Este resultado es coherente, considerando que ambos materiales presentan elevados impactos asociados a sus procesos de producción, especialmente en términos de consumo energético y uso de recursos.

Adicionalmente, se evidenció que el tratamiento asignado a los residuos en la fase de cierre tiene

una influencia significativa en los resultados del análisis de impacto ambiental.

Cuando los residuos generados, especialmente los módulos fotovoltaicos, son modelados bajo un escenario de disposición final en vertedero, se observa un incremento considerable en el valor total de impacto expresado en milipuntos (mPt), debido a la pérdida de materiales valorizables y a los impactos asociados a su disposición.

Por el contrario, al considerar un escenario de reciclaje, los impactos ambientales se reducen de manera notable, ya que se incorpora el beneficio ambiental derivado de la recuperación de materiales como vidrio, aluminio y metales, evitando así la producción de materias primas vírgenes y sus impactos asociados.

Este comportamiento es consistente con la literatura especializada en análisis de ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos, donde se destaca la importancia de las estrategias de gestión de residuos al final de la vida útil como un factor determinante en la sostenibilidad del sistema.

Bajo estas circunstancias, resulta fundamental definir adecuadamente el destino final de los módulos fotovoltaicos y demás componentes al término de su vida útil, ya que la elección entre reciclaje o disposición final puede modificar de manera significativa los resultados del análisis ambiental.

4.2.8. Impacto ambiental del proyecto

Se calculó la energía total producida por la planta fotovoltaica durante su periodo de operación, considerando una vida útil estimada de 25 años y una generación anual de aproximadamente 396,8 GWh/año.

El valor obtenido en la Tabla 4-9 representa, por tanto, el impacto ambiental asociado a la producción de 1 kWh de energía eléctrica a lo largo de toda la vida útil del sistema fotovoltaico, integrando las contribuciones de las fases de construcción, operación y cierre (Calculo en el anexo 4-2; hoja 4).

Tabla 4-9. Impacto del proyecto.

Componente	Cantidad	Unidad
Impacto	0,289888215	mPt/KWh

Elaborado: Equipo consultor, 2025.

4.2.9. Simulación del impacto

Con el fin de validar y complementar el análisis realizado, se llevó a cabo la simulación del sistema en el software OpenLCA, utilizando las bases de datos ecoinvent_3.9.1_LCIA_Methods y elcd_3_2_greendelta, junto con el método IPCC 2013 GWP 100a, orientado a la evaluación del potencial de calentamiento global (Anexo 4-2; hojas 5 y 6).

A partir de esta simulación, se obtuvo un impacto de 0,0536 kg CO₂ equivalente por kWh generado. Este valor evidencia que los materiales con mayor contribución al calentamiento global corresponden al hormigón, seguido del aluminio y el acero, lo cual es consistente con las emisiones asociadas a la producción de estos materiales.

Cabe destacar que las capturas del modelado y de la evaluación obtenida en OpenLCA se adjuntan como parte del presente estudio dentro de la plantilla de Excel (hojas 5 y 6), permitiendo evidenciar la trazabilidad del proceso de cálculo y la consistencia del modelado desarrollado.

4.2.10. Limitaciones del estudio

El presente análisis de ciclo de vida (ACV) del Parque Fotovoltaico La Ceiba se desarrolló con base en información técnica disponible, literatura especializada y supuestos metodológicos representativos. No obstante, es importante señalar que el estudio presenta ciertas limitaciones inherentes a la disponibilidad de datos y a las decisiones de modelación adoptadas, las cuales se detallan a continuación.

En primer lugar, varias de las cantidades de materiales y consumos fueron estimadas mediante factores de referencia por unidad de potencia instalada (t/MW o consumos por MW), debido a la ausencia de información específica del proyecto en fase de diseño detallado. Si bien estos factores provienen de literatura científica y estudios de proyectos fotovoltaicos de características similares, su aplicación puede introducir incertidumbre en los resultados finales.

En segundo lugar, la composición de los módulos fotovoltaicos se basó en valores promedio reportados en estudios internacionales. Sin embargo, esta composición puede variar dependiendo del fabricante, la tecnología específica del módulo y las condiciones del mercado, lo cual no fue considerado de manera particular en este análisis.

Asimismo, el modelado del transporte de materiales y residuos se realizó utilizando distancias promedio representativas (366 km para el transporte de módulos y 340 km para la gestión de residuos), lo cual puede generar variaciones respecto a escenarios reales.

En relación con la fase de operación, se priorizó el consumo de agua como principal flujo relevante, dado que la literatura especializada indica que otros consumos (energía auxiliar, combustibles y lubricantes) tienen una contribución menor. No obstante, la exclusión detallada de estos flujos secundarios podría subestimar ligeramente los impactos asociados a esta fase.

Por otra parte, la fase de cierre fue modelada bajo un escenario de reciclaje para la mayoría de los materiales, lo cual representa una condición favorable desde el punto de vista ambiental. Sin embargo, este escenario depende de la disponibilidad futura de infraestructura y políticas de gestión de residuos, por lo que podría diferir de la realidad al final de la vida útil del proyecto.

Adicionalmente, el análisis se basó en bases de datos internacionales (ecoinvent 3.9.1 y ELCD 3.2), las cuales contienen información representativa de contextos globales o europeos. En consecuencia, los procesos modelados pueden no reflejar completamente las condiciones específicas del contexto local, especialmente en términos de matriz energética, tecnologías utilizadas y eficiencia de procesos.

Finalmente, los resultados obtenidos deben ser interpretados como una aproximación representativa del comportamiento ambiental del sistema, más que como valores absolutos. A pesar de estas limitaciones, el estudio proporciona una base sólida para la evaluación ambiental del proyecto y permite identificar los principales puntos críticos del ciclo de vida, contribuyendo

a la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad.

4.3 Análisis e interpretación de resultados.

El alcance del estudio se definió considerando como unidad funcional la generación de 1 KWh de electricidad, estableciendo como límites del sistema todas las etapas del ciclo de vida del proyecto, que incluyen el transporte de materias primas, la fase de construcción, la operación y mantenimiento a lo largo de 25 años de vida útil, así como el desmantelamiento y reciclaje de los componentes al final de su funcionamiento. La inversión estimada asciende a 150 millones de dólares, lo que permite dimensionar la magnitud del proyecto y, al mismo tiempo, facilita la comparación objetiva de la tecnología solar fotovoltaica frente a otras fuentes de generación eléctrica bajo una misma base funcional de referencia.

4.3.1. Resultados globales

Los resultados de la etapa de ponderación obtenidos mediante la metodología Eco-indicador 99 determinan que la carga ambiental total asociada al proyecto asciende a 2 875 691 091 milipuntos (mPt), valor que se desagrega en diferentes categorías de impacto. La fase de construcción representa el punto crítico del ciclo de vida, concentrando la casi totalidad de los impactos ambientales, lo que sugiere que las estrategias de mitigación deben focalizarse en la optimización del diseño estructural, la reducción en el consumo de materiales de construcción de alto impacto y la incorporación de alternativas de eficiencia energética y gestión sostenible de recursos.

4.3.2. Análisis por fases del ciclo de vida

Fase de Construcción

La fase de construcción representa el punto crítico del ciclo de vida del proyecto fotovoltaico, al concentrar la mayor parte de las cargas ambientales acumuladas, especialmente en lo que respecta a la categoría de uso de recursos naturales y materiales con alta huella ambiental. Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) evidencian que aproximadamente el 97% del impacto total asociado al uso de recursos se origina en esta etapa, lo que la convierte en el principal foco de atención para estrategias de mitigación ambiental.

Este elevado impacto responde a la alta demanda de materiales de construcción intensivos en energía y recursos naturales, tales como:

- Hormigón estructural, utilizado en las bases de cimentación de los módulos y en las estructuras auxiliares.
- Metales como acero, aluminio y cobre, presentes en estructuras de soporte, cableado, canalizaciones eléctricas y componentes electromecánicos.

A ello se suma el consumo intensivo de combustibles fósiles para el funcionamiento de maquinaria pesada, equipos de movimiento de tierras, transporte de materiales y generación de energía en obra, generando un importante volumen de emisiones indirectas de gases de efecto invernadero (GEI), además de impactos asociados al agotamiento de recursos no renovables, acidificación, y generación de partículas contaminantes.

Desde un punto de vista técnico, se puede concluir que la huella ambiental de esta fase no es simplemente una consecuencia circunstancial del diseño del proyecto, sino que es estructuralmente elevada, dada la naturaleza de la infraestructura y la escala del desarrollo. No obstante, si bien estos impactos son difíciles de evitar completamente, existen márgenes significativos para su mitigación a través de estrategias de mejora tecnológica, eficiencia de procesos y sustitución de materiales.

Fase de Operación y Mantenimiento

Durante los 25 años de vida útil del proyecto, la fase de operación se caracteriza por un perfil de impactos ambientales relativamente bajo en comparación con la construcción. El aspecto más relevante se asocia al consumo de agua para la limpieza de módulos fotovoltaicos. Aunque esta magnitud representa una fracción menor del impacto global, adquieren especial relevancia en contextos hídricamente vulnerables como el cantón Zapotillo. Desde una perspectiva técnica, la implementación de sistemas de limpieza en seco, tecnologías de reducción de consumo hídrico y reutilización de aguas tratadas o recicladas constituye una medida prioritaria de mitigación. Adicionalmente, el uso de autoconsumo eléctrico generado por el propio parque para cubrir los requerimientos auxiliares contribuye a minimizar la huella energética de esta fase. Para el desarrollo de las actividades de la fase de operación, el operador del proyecto contempla el abastecimiento de agua mediante tanqueros contratados a proveedores autorizados. El agua será destinada exclusivamente a las labores de limpieza de los paneles fotovoltaicos, sin contemplarse la captación directa de fuentes superficiales o subterráneas del área de influencia.

Fase de Desmantelamiento

La fase de desmantelamiento comprende el desmontaje, transporte y disposición final de los 400.088 módulos fotovoltaicos, junto con estructuras metálicas y componentes eléctricos. Bajo el escenario actual, el traslado de estos materiales hacia plantas de reciclaje en el país involucra las cargas asociadas al transporte. Sin embargo, esta etapa puede transformarse en una oportunidad estratégica de economía circular, mediante la implementación de cadenas de reciclaje locales o regionales que permitan recuperar materiales de alto valor como aluminio, vidrio y silicio, reduciendo al mismo tiempo las emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas al transporte de larga distancia. De este modo, el desmantelamiento puede evolucionar de ser una fuente de impacto a un componente clave en la mejora del desempeño ambiental global del proyecto.

4.3.3. Conclusiones

- El análisis del ciclo de vida (ACV) revela que la etapa de construcción del parque solar fotovoltaico constituye la principal fuente de impactos ambientales del proyecto, concentrando 9 202 958 350 mPt.
- La fase operativa del sistema solar fotovoltaico genera beneficios netos ambientales, al desplazar la generación eléctrica convencional de origen fósil. Esto se traduce en una reducción significativa de emisiones de CO₂, óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxidos de azufre (SO₂) y partículas en suspensión, además de disminuir la dependencia energética de fuentes no renovables. La prolongación de la vida útil de los componentes y el

mantenimiento predictivo emergen como estrategias clave para maximizar este beneficio.

- La etapa de desmantelamiento plantea desafíos relevantes tanto desde el punto de vista ambiental como logístico, debido al volumen y variedad de residuos generados, incluyendo materiales potencialmente reciclables y componentes con riesgo de contaminación si no se gestionan adecuadamente. Sin embargo, esta fase también representa una oportunidad para la implementación de principios de economía circular, a través del reaprovechamiento y valorización de materiales, así como el diseño de sistemas modulares y fácilmente desmontables desde la fase de planificación.

4.3.4. Recomendaciones técnicas

El uso intensivo de recursos constituye la categoría de impacto más significativa, atribuible principalmente al consumo de materiales con alta huella ambiental como hormigón, acero y aluminio primario, así como al uso de agua y combustibles fósiles durante la etapa constructiva. Esta categoría refleja impactos acumulativos relacionados con el agotamiento de recursos no renovables y las emisiones indirectas asociadas a su extracción y transformación. Las recomendaciones de mitigación para este caso serían:

- Aplicar criterios de optimización estructural mediante modelado BIM y análisis estructurales avanzados para minimizar volúmenes de hormigón, acero y áridos sin comprometer la integridad estructural.
- Sustituir materiales vírgenes de alta carga ambiental por insumos reciclados o secundarios (por ejemplo, uso de aluminio reciclado, cementos con adiciones puzolánicas, áridos reciclados).
- Durante la construcción, incorporar equipos y maquinaria con alta eficiencia energética o sistemas de propulsión alternativos (eléctricos, híbridos o alimentados con biocombustibles certificados). Evaluar la viabilidad de electrificación parcial de los procesos constructivos mediante fuentes renovables temporales.
- Implementar planes de uso eficiente del agua, incluyendo sistemas de recirculación y reutilización de aguas grises en actividades como curado de hormigón, limpieza de maquinaria y control de polvo.

Los impactos de la categoría de generación de residuos sólidos provienen fundamentalmente de la generación de residuos en las fases de construcción, operación y mantenimiento, incluyendo efluentes contaminados, residuos peligrosos (aceites, solventes), restos de materiales y embalajes. Las recomendaciones de mitigación son las siguientes:

- Diseñar e implementar un Plan de Gestión de Residuos Sólidos adaptado al ciclo de vida del proyecto, con énfasis en la segregación en origen, trazabilidad, valorización de residuos reciclables y minimización de disposición final.
- Instalar plantas modulares de tratamiento in situ (sistemas físico-químicos y biológicos compactos) para reducir la carga contaminante de aguas residuales y mitigar el riesgo de contaminación del suelo y aguas superficiales/subterráneas.
- Establecer alianzas con gestores autorizados para la disposición adecuada de residuos peligrosos, cumpliendo con la normativa nacional vigente (por ejemplo, aceites usados, baterías, solventes, pinturas).

Aunque cuantitativamente marginal, la categoría de materiales, procesos y transporte, representa impactos relevantes asociados al transporte de módulos fotovoltaicos, estructuras metálicas y equipos desde los países de origen, lo que implica un componente importante de emisiones indirectas por logística internacional. Las recomendaciones de mitigación son las siguientes:

- Optimizar las rutas y modos de transporte mediante estrategias de consolidación de carga, priorización del transporte marítimo sobre terrestre o aéreo, y uso de transportistas certificados con flotas de alta eficiencia.
- Incentivar la cadena de suministro local para componentes no críticos (estructuras secundarias, cableado, partes mecánicas) con el fin de reducir distancias logísticas, plazos de entrega y huella de carbono.
- Emplear técnicas de prefabricación para componentes estructurales y eléctricos, con el objetivo de reducir retrabajos en obra, minimizar residuos y acortar tiempos de montaje, lo que también reduce el consumo energético y logístico.

4.3.5. Lineamientos y beneficios ambientales derivados del análisis

El análisis del ciclo de vida (ACV) asociado al proyecto permiten establecer una serie de lineamientos estratégicos y beneficios potenciales que pueden ser aplicados transversalmente en las distintas etapas del proyecto, con el objetivo de mejorar su desempeño ambiental, reducir externalidades negativas y aumentar su sostenibilidad a largo plazo.

Fase de diseño.

Lineamientos:

- Integrar criterios de ecodiseño y análisis multicriterio ambiental en la selección de materiales, tecnologías y configuración del sistema.
- Incorporar principios de economía circular desde el diseño, facilitando desmontaje, reciclaje y reutilización futura de componentes.
- Priorizar tecnologías y materiales con Declaración Ambiental de Producto (EPD) o certificaciones equivalentes.

Beneficios:

- Reducción anticipada de impactos ambientales asociados a la extracción y transformación de materias primas.
- Mayor eficiencia en el uso de recursos y reducción del volumen de residuos a lo largo del ciclo de vida.
- Mejora en la trazabilidad y control de impactos indirectos (huella de carbono y huella hídrica).

Fase de Construcción

Lineamientos:

- Utilizar materiales de menor huella ambiental (reciclados, locales, certificados).

- Implementar prácticas de construcción sostenible: prefabricación, reducción de retrabajos, eficiencia en maquinaria.
- Aplicar un Plan Integral de Manejo de Residuos (PIMR) con segregación en origen y valorización de residuos.

Beneficios:

- Reducción significativa del impacto ambiental global del proyecto.- La implementación de estrategias orientadas a la eficiencia en el uso de recursos naturales como la optimización estructural, el empleo de materiales reciclados o de bajo impacto, y la prefabricación de componentes permite una disminución sustantiva de los impactos ambientales globales, particularmente en las categorías dominantes como el uso de recursos no renovables y las emisiones indirectas asociadas a la producción y transporte de materiales. Estas acciones contribuyen a una menor presión sobre ecosistemas, reducen la huella de carbono del proyecto y mejoran su desempeño en términos de sostenibilidad ambiental bajo metodologías como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).
- Reducción de costos operativos mediante eficiencia logística y optimización del uso de materiales.- El rediseño de procesos constructivos con criterios de eficiencia permite no solo mitigar impactos ambientales, sino también alcanzar una reducción tangible de costos económicos asociados a la logística, transporte, almacenamiento y manejo de materiales. Estrategias como la consolidación de cargas, la priorización de proveedores locales, y la minimización de retrabajos a través del uso de elementos prefabricados generan economías de escala y reducen pérdidas por desperdicio. Además, el uso racional de insumos reduce los costos de disposición de residuos, transporte y consumo energético durante la construcción y mantenimiento.
- Mejora del cumplimiento normativo ambiental y fortalecimiento de la licencia social para operar.- La adopción de buenas prácticas ambientales desde el diseño hasta el desmantelamiento del proyecto fortalece el cumplimiento con la normativa ambiental vigente, incluyendo regulaciones sobre emisiones, gestión de residuos y uso de agua. Al mismo tiempo, el compromiso ambiental demostrado mediante acciones concretas, como planes de manejo ambiental, monitoreo continuo y participación comunitaria mejora la percepción del proyecto por parte de autoridades regulatorias, comunidades locales y otros actores clave, lo que se traduce en una mayor estabilidad operativa, reducción de riesgos legales o reputacionales, y facilitación de procesos de fiscalización, auditoría o renovación de permisos.

Fase de Mantenimiento

Lineamientos:

- Aplicar planes de mantenimiento predictivo y preventivo que minimicen paradas y consumo de recursos.
- Usar lubricantes, aceites y químicos con bajo impacto ambiental, certificados y compatibles con reciclaje.
- Capacitar al personal técnico en prácticas sostenibles de mantenimiento.

Beneficios:

- Reducción del consumo de insumos y minimización en la generación de residuos peligrosos. - La implementación de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo, junto con la selección de insumos con menor carga ambiental (como lubricantes biodegradables, aceites de larga duración y productos certificados con bajo riesgo toxicológico), contribuye a una reducción sustancial en el volumen y peligrosidad de los insumos utilizados durante la operación y mantenimiento del proyecto. Esto se traduce en una disminución significativa de residuos peligrosos, como aceites usados, solventes y materiales contaminados, lo cual simplifica la gestión ambiental, reduce los costos de tratamiento y disposición final, y disminuye los riesgos asociados a la manipulación y almacenamiento de sustancias peligrosas.
- Disminución del impacto operativo sobre los componentes ambientales (aire, agua y suelos).- Una operación eficiente y ambientalmente controlada permite minimizar la liberación de contaminantes hacia los diferentes medios receptores. Por ejemplo, la reducción de fugas de fluidos contaminantes, el mantenimiento adecuado de los sistemas de contención y drenaje, y el uso de maquinaria de bajas emisiones contribuyen a reducir significativamente las emisiones atmosféricas (partículas, NO_x, CO, SO₂), así como las potenciales descargas accidentales de sustancias contaminantes hacia el suelo o cuerpos hídricos. Estas medidas aseguran la protección de los recursos naturales locales, previenen la degradación ambiental y favorecen el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental establecidos por la normativa vigente.
- Aumento de la confiabilidad operativa y mejora en la eficiencia energética de los equipos.
 - La aplicación sistemática de programas de mantenimiento basados en análisis de condición o mantenimiento predictivo mediante monitoreo en tiempo real permite optimizar el rendimiento técnico de los equipos electromecánicos, reducir el tiempo fuera de servicio y anticipar fallas críticas. Esto se traduce en una mayor disponibilidad y confiabilidad operacional del sistema, así como en una mejora de la eficiencia energética, dado que los equipos operan en condiciones óptimas de carga, temperatura y lubricación. Como resultado, se reducen tanto los consumos energéticos innecesarios como las emisiones asociadas a ineficiencias en la operación.

Fase de desmantelamiento

Lineamientos:

- Diseñar e implementar un Plan de Desmantelamiento con enfoque en economía circular.
- Establecer alianzas con gestores autorizados para reciclaje y recuperación de módulos, estructuras y componentes eléctricos.
- Aplicar metodologías de evaluación de fin de vida útil para determinar oportunidades de reutilización.

Beneficios:

- Recuperación de materiales valiosos y reducción significativa de residuos enviados a disposición final. - La aplicación de un enfoque de economía circular en la fase de desmantelamiento permite la recuperación y reutilización de materiales de alto valor económico y ambiental, como aluminio, acero, vidrio templado, cobre y módulos

fotovoltaicos parcialmente funcionales. Mediante el desmontaje planificado, la segregación adecuada y la trazabilidad de materiales, es posible redirigir un volumen significativo de componentes al reciclaje o a nuevos ciclos productivos. Esta estrategia no solo reduce drásticamente la cantidad de residuos enviados a vertederos o rellenos de seguridad, sino que también disminuye la demanda de materias primas vírgenes en otros sectores industriales, con el consiguiente ahorro energético y reducción de emisiones asociadas.

- Conversión de un pasivo ambiental en una oportunidad económica a través de la valorización de materiales. - El tratamiento adecuado de los residuos generados al final del ciclo de vida del proyecto transforma lo que tradicionalmente se considera un pasivo ambiental y financiero en una oportunidad de generación de valor económico. A través de alianzas con empresas recicladoras especializadas y la implementación de cadenas logísticas reversas, los materiales recuperados pueden comercializarse o reincorporarse como insumos en nuevos procesos constructivos o industriales. Este modelo de gestión no solo reduce costos asociados al tratamiento y disposición final, sino que también puede generar ingresos directos o beneficios fiscales, promoviendo una mayor sostenibilidad financiera del proyecto.
- Mejora sustancial del perfil ambiental y reputacional del proyecto frente a inversionistas, autoridades y comunidades.- La integración de criterios de sostenibilidad y circularidad en la fase de cierre del proyecto fortalece su licencia social para operar, mejora su alineación con estándares internacionales (como los Principios del Ecuador o los Objetivos de Desarrollo Sostenible) y aumenta su atractivo ante inversionistas institucionales que exigen criterios ESG (ambientales, sociales y de gobernanza) en sus decisiones de financiamiento. Además, la demostración de buenas prácticas ambientales durante el desmantelamiento mejora la percepción pública y la confianza por parte de comunidades locales y entidades regulatorias, reduciendo riesgos reputacionales y facilitando la aprobación de futuros desarrollos del promotor.

5. Bibliografía

- AMPYR. (s.f.). *Environmental and social impact assessment for a 200 MWac / 260 MWp solar power project in Mhasale Village, Dhule District, Maharashtra.*
- Frischknecht, R., Stolz, P., Krebs, L., de Wild-Scholten, M., & Sinha, P. (2020). *Life cycle inventories and life cycle assessments of photovoltaic systems.*
- Ministry of Housing, S. P. (2000). *Eco-Indicator 99 Manual for Designers: A Damage Oriented Method for life Cycle Impact Assessments.* Den Haag, The Netherlands.
- Vidal, O., Rostom, F., François, C., & Giraud, G. (2017). *Global Trends in Metal Consumption and Supply: The Raw Material–Energy Nexus.*