



Comparación de los impactos ambientales entre un nuevo prototipo fotovoltaico de perovskita desarrollado en Colombia y diferentes celdas solares mediante el análisis de ciclo de vida.

Camilo A. Valderrama Benítez

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Director

Francisco J. Molina Pérez, Doctor (PhD) en Ingeniería

Química y ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Valderrama et al.,2022)
Referencia	Valderrama, CA., Molina, F. (2022). Comparación de los impactos ambientales entre un nuevo prototipo fotovoltaico de perovskita desarrollado en Colombia y diferentes celdas solares mediante el análisis de ciclo de vida. [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Ingeniería Ambiental, Cohorte XXV.

Grupo de Investigación Gestión y Modelación Ambiental (GAIA).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).

Los autores desean expresar su agradecimiento al Programa Científico de Colombia por el apoyo financiero proporcionado en el marco de la convocatoria del Ecosistema Científico para propuestas (Contrato No. FP44842-218-2018).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a los familiares que me han apoyado a través de los años y que me han motivado de una u otra forma en el camino de la investigación, en especial a mi abuela que con su amor y sabiduría ha hecho posible cumplir otro logro que parecía un sueño distante hace ya un tiempo atrás. Por último, a mi hermana, la cual admiro mucho como mujer y es un referente de lo que es perseverar y hacer bien las cosas.

Agradezco a mi asesor, Francisco Molina, por su apoyo y confianza en el desarrollo de esta investigación, es un orgullo poder culminar este proceso con éxito bajo su supervisión, el cual ha sido un referente tanto nivel académico como profesional y más importante aún, como persona. De igual manera, agradezco a la profesora Diana Catalina Rodríguez por darme la oportunidad de participar en este proyecto, la cual me motivo a presentarme desde un inicio y me acompañó en todo el proceso, gracias por su paciencia y apoyo. Por último, quiero agradecerles a los profesores Juan Camilo Villegas, Juan Felipe Montoya, Aida Luz Villa y Jaime Andrés Becerra, los cuales han sido claves para el desarrollo de mi investigación y me han formado profesionalmente.

A todos los amigos que me han acompañado en este tiempo, los cuales compartieron horas de estudio, cafés a medio día, sueños de investigación, miedos del tiempo, risas a las 5 p.m. y ocio y oda a la nada después de las largas jornadas laborales y académicas. En especial quiero agradecer a Juan Carlos Camacho y Daniela Uribe Zuluaga, amistades que surgieron en el transcurso y fueron muchas veces remos cuando el panorama de lograr el objetivo se veía turbio, gracias por la palabra y la escucha, agradezco su tiempo y los admiro. También a Melissa Serna, por ser calma y darme lo que yo más valoro, amor y tiempo.

Agradezco el apoyo financiero brindado por el Programa Científico Colombiano en el marco de la convocatoria de propuestas Ecosistema Científico (Contrato No. FP44842-218-2018) A su vez a Jaume-Adrià Alberola-Borràs (Universidad Jaume I) por su apoyo en el suministro de información y análisis de resultados.

Por último, quiero volver a dedicar una cita que mencione en mi proyecto de investigación de pregrado y que es vigente para todas las personas que me ayudaron en la maestría:

“Agradezco en el alma la generosidad que han tenido conmigo y la bondad que siempre ha sido su más hermosa cualidad. A su solidaridad debo en parte los pequeños triunfos que he obtenido en los últimos tiempos, los cuales les dedico de todo corazón. Eso es todo compañeros. Un abrazo muy cariñoso. -Diles que yo nunca me despidió. Sobre todo, nunca me despidió de las personas que amo-”

Gonzalo Arango, Oleajes de la sangre

DICCIONARIO DE SIGLAS, ACRONIMOS Y ABREVIATURAS

AC	Acidificación
ACV	Análisis de Ciclo de Vida.
ARH	Agotamiento de los Recursos Hídricos
ARMFR	Agotamiento de Recursos Minerales, Fósiles y Renovables
CC	Cambio Climático
CED	Capa de Electrodo Delantero
CET	Capa de Electrodo Trasero
CSP	Celda Solar de Perovskita
CTH	Capa de Transporte de Agujeros
CTE	Capa de Transporte de Electrones
DEA	Demanda de Energía Acumulada
EA	Ecotoxicidad en el Agua
EAD	Eutrofización de Agua Dulce.
GEI	Gases Efecto Invernadero.
GB	Glove Box
NIP	Negativa - Intrínseca – Positiva.
MP	Material Particulado
PER	Capa de Perovskita.
PIN	Positiva - Intrínseca – Negativa.
PCBM	Phenyl-C61-Butyric acid Methyl ester
US	Uso del Suelo
THC	Toxicidad Humana Cancerígena
THNC	Toxicidad Humana No Cancerígena

Tabla de contenido

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Planteamiento del Problema	6
1.2. Objetivo General.....	7
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
2.1. Definición de Objetivos y Alcance	8
2.2. Inventario del Ciclo de Vida.....	11
2.3. Evaluación ambiental – Selección de Categorías de Impacto	13
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	13
3.1. Impacto Ambiental de las Celdas Solares de Perovskita.....	13
3.1.1. <i>Impacto Ambiental de la Ecotoxicidad en el Agua Dulce.....</i>	<i>17</i>
3.1.2. <i>Impacto Ambiental de la Toxicidad Humana Cancerígena.....</i>	<i>19</i>
3.1.3. <i>Impacto Ambiental de la Toxicidad Humana No Cancerígena.....</i>	<i>21</i>
3.1.4. <i>Demanda de Energía Acumulada</i>	<i>25</i>
3.2. Evaluación comparativa con otras celdas solares.....	32
3.3. Análisis de sensibilidad	35
4. CONCLUSIONES.....	37
5. INFORMACIÓN DE SOPORTE	¡Error! Marcador no definido.

Lista de tablas

- Tabla 1.** Resultados de la contribución por procesos más influyentes en términos de porcentaje en la categoría de ecotoxicidad en el agua dulce (normalizado), para las cinco CSP de estudio. Solo se muestran los resultados con un porcentaje de impacto superior al 0,5 %..... **18**
- Tabla 2.** Evaluación comparativa de las GEI con otras celdas solares de primera, segunda y tercera generación. **33**
- Tabla 3.** Análisis de sensibilidad para la categoría de impacto ambiental Cambio Climático (CC); Toxicidad Humana No Cancerígena y Cancerígena (THNC; THC), al utilizar como unidad funcional la producción de 1 kWh con una vida útil de 5,10 y 15 años.. **36**

Lista de figuras

Figura 1. Esquemas de la estructura de las celdas solares de perovskita evaluadas mediante el ACV, diferenciada por composición de capa y arquitectura.....	8
Figura 2. Límite del sistema general para las celdas solares de perovskita evaluadas en el estudio, enfocado de la cuna a la puerta.....	9
Figura 3. Resultados de los impactos ambientales que compara los perfiles ambientales de las celdas solares de perovskita de estudio. El cálculo se realizó con el método ILCD Midpoint+ V1.11.....	14
Figura 4. Contribución de la materia y energía en la categoría de impacto ambiental de Agotamiento del Recurso hídrico de la C1, mediante el método ILCD 2011 Midpoint+ V1.11	15
Figura 5. Resultados de los impactos normalizados de la fabricación de las cinco CSP, de las categorías CC, THCN, THC, MP y Ac, aplicando la metodología ILCD 2011 Midpoint+ V1.11/Normalización EC -JRC Global, mediante el software SimaPro 9.2.0.2.....	16
Figura 6. Resultados de los impactos normalizados de la fabricación de las cinco CSP, de las categorías EAD, EA, US, ARH y ARMFR, aplicando la metodología ILCD 2011 Midpoint+ V1.11/Normalización EC -JRC Global, mediante el software SimaPro 9.2.0.2.....	17
Figura 7. Demanda de Energía Acumulada o Energía primaria por CSP (MJ/cm ²), aplicando la metodología Cumulative Energy Demand versión 1.11, mediante el software SimaPro 9.2.0.2.....	26
Figura 8. Resultados del consumo de energía primaria por capa que compone las diferentes CSP, aplicando la metodología Cumulative Energy Demand versión 1.11, mediante el software SimaPro 9.2.0.2	27
Figura 9. Comparación de la Demanda Energía Acumulada (DEA) de la cuna a la puerta para diferentes CSP reportados en la literatura vs las CSP evaluadas en este estudio mediante la metodología Cumulative Energy Demand del Software SimaPro 9.2.0.2.	31

RESUMEN

En este trabajo se presenta el impacto ambiental generado por 1 cm² de área activa de cinco Celdas Solares de Perovskita (CSP) con una vida útil proyectada a 5 años, mediante la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), en la cual se contempla las fases de la cuna a la puerta sin considerar, el sistema de montaje, transporte y tratamiento de residuos ya que es una tecnología aún probada en laboratorio. Una de las celdas fue elaborada en Colombia y presenta una configuración Positiva – Intrínseca – Negativa (PIN), mientras que las cuatro celdas restantes, son tomadas de otros estudios internacionales de ACV de CSP y se les calculó el impacto ambiental bajo un contexto local o global en su defecto, dichas celdas presentan una configuración NIP y el uso de distintos materiales y procesos en la elaboración de las mismas. Además de las categorías de impacto ambiental seleccionadas para la evaluación, se definió un indicador de energía. A sí mismo, se hizo una evaluación comparativa de las emisiones Gases Efecto Invernadero (GEI) reportados en la literatura científica de celdas solares comerciales de primera, segunda y tercera generación teniendo como unidad funcional 1 kWh. Por último, se hizo un análisis de sensibilidad de los impactos ambientales relevantes identificadas en el estudio, en función de la variación de la vida útil. Como resultado se halló que la celda elaborada en Colombia genera los menores impactos ambientales de las cinco celdas evaluadas mediante el ACV, debido a su menor requerimiento energético reportado para la síntesis de la CTH, CET y CED, y a la menor cantidad materiales contaminantes usados en la elaboración de la celda, en comparación con los utilizados en las cuatro celdas tomadas de la literatura. En el caso de la CED se obtuvo un menor impacto para la celda colombiana debido al uso de ITO en vez de FTO, para la CET debido al uso de plata en vez de oro, por último, para la CTH debido al método de disposición usado (precipitación química) para la sustancia que lo compone (NiO_x). El indicador energético permitió establecer, además, que bajo un contexto colombiano y global se utiliza una mayor cantidad de energía en los procesos en nuestro país. A partir del análisis de sensibilidad se concluyó que las CSP evaluadas podrían tener competitividad ambiental en comparación con las celdas solares comerciales en términos de emisiones de GEI, si se aumenta la vida útil por encima de los 10 años. Por otro lado, la evaluación entre las cinco celdas permitió establecer que se pueden disminuir los impactos de la celda colombiana, cambiando algunos materiales como la plata, cambiando la técnica de disposición (*spin-coating*) y reduciendo el gasto energético en algunos procesos (GB) entre otros. Finalmente, aunque el estudio de impacto ambiental mediante el ACV ofrece un panorama de la competitividad ambiental de este tipo de tecnología, aún quedan por responder a futuro, las limitaciones actuales que se presentan debido al acceso a la información como lo, métodos de medición de entradas y salidas y fases aún no contempladas debido al punto de desarrollo en cual se encuentra esta tecnología y las herramientas disponibles.

Palabras claves: Análisis de Ciclo de Vida, Celda Solar de Perovskita, Impacto Ambiental, Meso-superestructurada.

ABSTRACT

This paper presents the environmental impact generated by 1 cm² of active area of five different Perovskite Solar Cells (PSC) with a projected useful life of 5 years, through the Life Cycle Analysis (LCA) tool, considering the phases from the cradle to gate without considering the assembly, transport and waste treatment system since it is a technology still tested in the laboratory. One of the cells was elaborated in Colombia and presents a Positive – Intrinsic – Negative (PIN) architecture, while the remaining 4 cells are taken from other international LCA studies of CSP, whose inventory was modified and the environmental impact was calculated under a local or global context in each case, these cells present a NIP configuration. In addition to the selected environmental impact categories, an energy indicator was defined. At the same time, a comparative evaluation of the Greenhouse Gas (GHG) emissions reported in the scientific literature of first, second and third generation commercial solar cells was made, having 1 kWh as a functional unit. Last, a sensitivity analysis of the relevant environmental impacts in the study was identified based on the variation of the useful life. As a result, it was found that the cell manufactured in Colombia generates the lowest environmental impacts of the 5 cells through LCA, due to its lower reported energy requirement for the synthesis of CTH, CET and CED, and the lower amount of polluting materials used. in the elaboration of the cell, in comparison with those used in the four 4 taken from the literature. In the case of the CED, a lower impact was obtained for the Colombian cell due to the use of ITO instead of FTO, for the CET due to the use of silver instead of gold, and finally, for the CTH due to the disposal method used (chemical precipitation) for the substance that integrate it (NiO_x). The energy indicator also made it possible to establish that, in a Colombian and global context, a greater amount of energy is used in the processes in our country. Since the sensitivity analysis, it was concluded that the CSP evaluated could have environmental competitiveness compared to commercial solar cells in terms of GHG emissions, if the useful life is increased above 10 years. On the other hand, the evaluation among the five cells made it possible to establish that the impacts of the Colombian cell can be reduced, changing some materials such as silver, changing the disposal technique (*spin-coating*) and reducing energy expenditure in some processes (GB) among others. Finally, although the environmental impact study through LCA offers an overview of the environmental competitiveness of this type of technology, the current limitations that arise due to access to information such as measurement methods of inputs and outputs and phases not yet contemplated due to the development stage of this technology and the tools available.

Keywords: Environmental Impact, Life Cycle Analysis, Meso-superstructured Perovskite Solar Cell.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de las diferentes fuentes de energía son claves para el bienestar social y el impulso económico ya que se requiere para el desarrollo de múltiples actividades (Pan et al., 2020). No obstante, el uso de estas fuentes de energía, contribuyen con el 76 % de las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI). Para el año 2020, la generación de calor y electricidad fueron los principales contribuyentes con un 36 % de las emisiones totales, debido a que su principal fuente fue la energía térmica, la cual representó el 70 % de la generación de electricidad global (Friedrich et al., 2020; International Energy Agency [IEA], 2021). Como solución a estas emisiones se ha planteado la transición energética mediante el uso de fuentes de energías renovables, ya que disminuyen los GEI y la dependencia a fuentes térmicas (Ferreira et al., 2018; Inglesi-Lotz & Dogan, 2018).

La energía solar fotovoltaica, actualmente es la fuente de energía renovable que podría ayudar a satisfacer la demanda de electricidad de una manera confiable, accesible, y ambientalmente sostenible a nivel mundial (You et al., 2018). La emisión de la huella de carbono de los sistemas fotovoltaicos oscila en promedio entre 14 y 73 g CO₂-eq/kWh, el cual es menor al generado por el uso combustibles fósiles como el petróleo (742 g CO₂-eq/kWh) (Amponsah et al., 2014; Asdrubali et al., 2015; Tawalbeh et al., 2021)

Las Celdas Solares de Perovskita (CSP) hacen parte de la tercera generación de la tecnología fotovoltaica y se caracterizan por su eficiencia de conversión de energía, facilidad de fabricación y bajo costo. Estas celdas contienen un compuesto de perovskita que está basado en haluros orgánicos e inorgánicos mixtos descritos por la fórmula ABX₃, en el cual X es un anión y A y B son cationes de diferentes tamaños. Las CSP reportan eficiencias en la conversión de energía para celdas que utilizan un solo semiconductor (unión única) de 25.5 % y de 28 %, cuando se utiliza celdas en tándem (múltiples uniones con diferentes semiconductores) con el silicio (Muteri et al., 2020; Yoo et al., 2021; Zhang et al., 2017).

La estructura convencional de las celdas fotovoltaicas de perovskita consiste en un sustrato de vidrio recubierto de óxido de estaño dopado con flúor conocido por sus siglas en inglés como FTO u óxido de estaño dopado con indio el cual se conoce por sus siglas como ITO, el cual tiene como función recoger los electrones y se le conoce como Capa de Electrodo Delantero (CED), por otro lado tiene una Capa de Transporte de Electrones (CTE), una Capa de Perovskita (PER), una Capa de Transporte de Huecos (CTH) y una Capa de Electrodo Trasero (CET); existe otro tipo de estructura en la cual se intercambia la posición de la capa de CTE y CTH y se le denomina estructura invertida (Hussain et al., 2018; Lee et al., 2018; Song et al., 2016).

También existen dos arquitecturas de celdas solares de perovskita denominadas como regular (NIP) siglas usadas en inglés para denotar Negativo – Intrínseco – Positivo, e invertida (PIN),

las cuales pueden ser mesoporosas o planas (Agobi et al., 2019; Torabi et al., 2019). La arquitectura tipo NIP es la más usada debido a su fácil procesamiento en las primeras etapas de investigación sobre las CSP y actualmente reportan la mayor eficiencia de conversión de energía (Lemercier et al., 2021). No obstante, la arquitectura PIN tradicional y meso - superestructurada, la cual se caracteriza porque se deposita la capa CTH primero que la capa CTE, ha logrado entre otros avances, procesamientos a bajas temperaturas, bajo costo operativo y comportamiento de histéresis (cambio de las propiedades fotovoltaicas bajo estimulación externa) insignificante con eficiencias de hasta un 18 % (Haider et al., 2020; Hussain et al., 2018; Sun et al., 2021).

A pesar de los avances en la eficiencia de conversión de energía y bajo costo de manufactura, aún está el desafío de lograr que este tipo de celdas tengan una vida útil mayor y presenten una buena estabilidad y eficiencia al operar al aire libre en diferentes condiciones ambientales, si se compara con respecto a las celdas solares comerciales, que oscilan entre los 20 y 30 años (Ghosh & Yadav, 2021; Ndzibah et al., 2021). La vida útil reportada de las CSP hasta el momento es corta, algunos autores han planteado una vida útil mayor, bajo un enfoque conservador, con valores entre 1 y 5 años, ya que se supone que este parámetro se puede aumentar sin grandes fluctuaciones en el consumo de energía y materiales requeridos debido al rápido desarrollo de la tecnología que la podría llevar a ser usada de manera comercial (Gong et al., 2015; Zhang et al., 2015; Khalifa et al., 2020). Dadas estas perspectivas, es necesario abordar el impacto ambiental que podrían ocasionar las CSP, teniendo en cuenta que se siguen planteando diferentes prototipos con perovskita y que la mayoría de los materiales usados en la fabricación son potencialmente tóxicos, costosos y a menudo raros, como lo son los metales pesados y los solventes orgánicos (Hailegnaw et al., 2015; Urbina, 2020).

Materiales como el haluro de plomo, son de gran preocupación debido a su participación activa en la capa de perovskita (Hailegnaw et al., 2015). Otros materiales planteados para reemplazar el plomo (Pb), en la capa absorbente de perovskita incluyen: estaño, antimonio, bismuto, indio, plata, germanio y tellurium. Sin embargo, estas sustancias generan un mayor impacto ambiental, como es el caso del estaño el cual puede potenciarlos entre 7 y 8 veces más que el Pb, en categorías de toxicidad humana y acidificación terrestre sumado al alto requerimiento energético (Jokar et al., 2019; Kadro & HagCEDdt, 2017; Schileo & Grancini, 2021).

La capa de electrodo delantero, la cual puede estar compuesta por FTO o ITO, presenta generalmente el más alto consumo de electricidad en la fabricación de la CSP y los mayores impactos negativos debido a la liberación de gases contaminantes en su producción, tales como el dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) y el uso de sustancias escasas como el indio (Krebs-moberg et al., 2021, Tian et al., 2021; Binek et al., 2016;).

Los solventes utilizados en la síntesis de la CSP, también son de gran relevancia ambiental, y entre ellos se desacan el N, N-dimetilformamida (DMF), tolueno, clorobenceno y el eter dietílico. Algunos de los cuales se catalogan como las sustancias que generan mayor impacto ambiental por masa en los estudios de ACV debido a su toxicidad, ya que si llegan a cuerpos hídricos afectan de manera severa los organismos acuáticos (Kim et al., 2018; Zhang et al., 2020). Por último, el electrodo superior que se utiliza en una CSP suele ser de metal en configuraciones estándares, los más usados son: plata (Ag), aluminio (Al), cobre (Cu) y oro (Au) (Djurišić et al., 2017). Se ha concluido que el uso de metales como Au y Ag, conducen a un aumento significativo en los costos e impactos ambientales, debido a la escasez de los recursos, procesos de extracción y refinamiento, en los cuales se utilizan químicos contaminantes y se da vertimiento de estos (Assi et al., 2021).

Dadas las implicaciones ambientales que ocasionan los materiales y procesos usados en la fabricación y uso de las CSP antes mencionadas, se deduce la importancia y responsabilidad frente al uso de esta nueva tecnología, especialmente, si se plantea como una solución a futuro, por lo cual se deben evaluar de manera exhaustiva, los efectos ambientales que ocasiona una vez desarrollada una arquitectura prometedora. Una herramienta de gestión ambiental que puede evaluar el impacto ambiental de las CSP, es el denominado Análisis de Ciclo de Vida (ACV), ya que permite cuantificar, analizar y comparar el impacto ambiental que se ocasiona en un producto, actividad o proyecto definido en todas sus fases (Sarialtin et al., 2021).

Espinosa et al. (2015) realizaron el primer ACV de CSP, en donde compararon los impactos ambientales de dos CSP, una se fabricó mediante el método de deposición al vapor y la otra con recubrimiento por rotación, reportando emisiones de 5,48 y 5,24 kg CO₂ equivalente para generar 1 kWh respectivamente, siendo un valor más bajo que los reportados posteriormente por Serrano-Lujan et al. (2015), cuando evaluaron las dos celdas anteriores con respecto a una celda con arquitectura Au/Spiro-OMeTAD/tin – P + TiO₂/TiO₂/FTO. La cual emitió 10,6 Kg CO₂ por kWh.

Gong et al. (2015) realizó un ACV comparativo de la cuna a la tumba entre dos módulos solares de perovskita con diferentes CTE, uno con dióxido de titanio (TiO₂) y otra con óxido de zinc (ZnO) y como contactos posteriores Au y Ag y contacto frontal FTO e ITO respectivamente, siendo el primer estudio en introducir la etapa de eliminación en su límite de sistema y comparar con otras celdas solares comerciales, hallando valores de emisión entre 24 y 32 gCO₂equivalente por kWh para una vida útil de 5 años. Celik et al. (2016) a diferencia de los anteriores estudios reportaron un ACV bajo un enfoque diferente, el cual consistió en calcular el impacto ambiental de un módulo de perovskita bajo tres estructuras diferentes y métodos de deposición de perovskita de co-evaporación y pulverización que fueran escalables comercialmente. Se halló que, para estas configuraciones, la emisión está entre los 120 y 180 gCO₂equivalente por kWh. De otro lado, Zhang et al. (2017), realizaron estudios de ACV de la cuna a la tumba de cinco CSP con una misma arquitectura, pero con diferente

capa de perovskita, hallando que para generar 1 kWh de electricidad en los ciclos de vida de las celdas solares MAPbI₃, FAPbI₃, MAPbI₂Cl, MASnI_{3-x}Br_x y CsPbBr₃ son 2,63, 3,18, 3,56, 6,75 y 6,78 kg CO₂equivalente respectivamente. Alberola-Borràs et al. (2018), realizaron también, un ACV comparativo de cuatro celdas de perovskita con la misma arquitectura (FTO/TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/Spiro- OMeTAD/Au) pero con cuatro diferentes métodos de ensamblaje para la capa de perovskita de haluro híbrido, reportando que se emitían entre 36 y 49 gCO₂ equivalente por 1 cm² de superficie activa. En el caso de Sur América, Guerrero et al. (2021) reportaron un ACV para una CSP con arquitectura NIP y una configuración de celda FTO/TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/ Spiro – Ometad/Au. En esta última, se evaluó el desempeño energético a partir del inventario de ciclo de vida recopilado, dando como resultado un tiempo de recuperación de energía entre 0,97 y 1,74 años y un retorno de la inversión de energía de 3 años cuando se considera una vida útil de 4,2 años.

1.1. Planteamiento del Problema

Los estudios presentados anteriormente permiten entender la importancia y la responsabilidad que conllevaría el uso de la tecnología emergente de CSP, si se plantea como una opción a usar a escala comercial. Es por esto que los prototipos tecnológicos fotovoltaicos de perovskita se deben someter a una evaluación de impacto ambiental, con el fin de poder clasificar su viabilidad en términos ambientales. En la actualidad en la literatura científica se encuentran diversos estudios de ACV sobre esta tecnología, también se han desarrollado algunas comparaciones con respecto a los paneles de silicio tradicionales y de perovskita usando como punto de referencia el área o la producción de energía y teniendo como categoría de impacto ambiental referente los GEI (Gong et al., 2015; Ibn-Mohammed et al., 2017; Maranghi et al., 2019; Muteri et al., 2020). No obstante, los resultados de los impactos ambientales difieren entre sí para cada tipo de celda estudiada, ya que se ven influenciados por los materiales de fabricación, tecnologías usadas, ubicación geográfica, factores ambientales y demás consideraciones tomadas. En el caso de Colombia se han realizado algunos estudios sobre CSP en temas de optimización de la estabilidad y eficiencia de conversión por medio de las modificaciones en los materiales, estructura y propiedades químicas y físicas (Bustos et al., 2018; Montana et al., 2018; Rozo et al., 2008; Noguera et al., 2018). Sin embargo, hasta la fecha no se ha llevado a cabo una evaluación de los impactos ambientales que causa la fabricación de los diferentes prototipos desarrollados a escala de laboratorio bajo condiciones locales, lo cual como se mencionó anteriormente, es necesario estimar, ya que no pueden ser utilizados o extrapolados los resultados de los impactos ambientales calculados de otros estudios para las CSP desarrolladas en el país. Es por esto que se estableció la necesidad de estimar dichos impactos productos de la elaboración de un prototipo de CSP estudiado y fabricado en Colombia mediante el ACV. Para este trabajo se seleccionó la investigación de Ramírez et al. (2019), los cuales desarrollaron un prototipo de CSP con el objetivo de dar solución a los problemas de escalabilidad que presenta dicha tecnología mediante la implementación de una arquitectura de celda solar meso-

superestructurada de PIN. Dicha evaluación ambiental buscó identificar su competitividad ambiental, bajo las condiciones específicas del país y haciendo un comparativo con respecto a otras CSP reportadas en la literatura las cuales diferían en la arquitectura, dichas celdas se modelaron también como si fueran fabricadas en el país. Por otro lado, con el fin de establecer su competitividad con respecto a las celdas comerciales de primera y segunda generación mediante un comparativo en términos de emisiones de GEI. La importancia de esta comparación es que dichas celdas constituyen la mayoría de los sistemas solares instalados tanto a nivel comercial como residencial a nivel mundial (Tsang et al., 2016), a su vez que se ha demostrado que la misma línea de producción que se usa para este tipo de celdas comerciales podría modificarse y utilizarse para CSP, lo cual indica que los costos de producción podrían disminuir, esta reducción de precio lograría que la transición de uso de esta tecnología sea más rápida sumado a la alta eficiencia de conversión de energía que viene en crecimiento (Stasiulionis, 2015). Por último, se comparó los resultados de otros estudios de ACV desarrollados en otros países sin modificar las condiciones y se estableció como variaban los impactos ambientales dado el lugar geográfico, la eficiencia del módulo, vida útil, arquitectura y procesos de manufactura entre otros. Aunque aún se carece de masa crítica y una base de datos sólida, se establece una base que busca determinar la sostenibilidad ambiental de un prototipo de CSP colombiano, teniendo como elemento comparativo la arquitectura de otras CSP y las celdas fotovoltaicas comerciales de mayor uso para la generación de energía eléctrica en el país.

1.2. **Objetivo General**

Comparar los impactos ambientales ocasionados por un prototipo fotovoltaico de celda solar de perovskita desarrollado en Colombia con respecto a otras arquitecturas de CSP y celdas fotovoltaicas de primera y segunda generación.

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar el prototipo fotovoltaico de perovskita y las diferentes arquitecturas de perovskita seleccionadas de la literatura, en términos de su estructura, materiales usados, métodos, procesos y residuos generados en la extracción y fabricación.
- Analizar por medio de la herramienta de ACV los impactos ambientales generados por el prototipo fotovoltaico de perovskita, y las diferentes arquitecturas de perovskita y celdas solares de primera y segunda generación, tomadas de la literatura por medio de la herramienta de ACV.
- Establecer oportunidades de mejora en términos de modificación de materiales y procesos que permitan reducir el impacto ambiental del prototipo fotovoltaico de perovskita desarrollado en Colombia.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

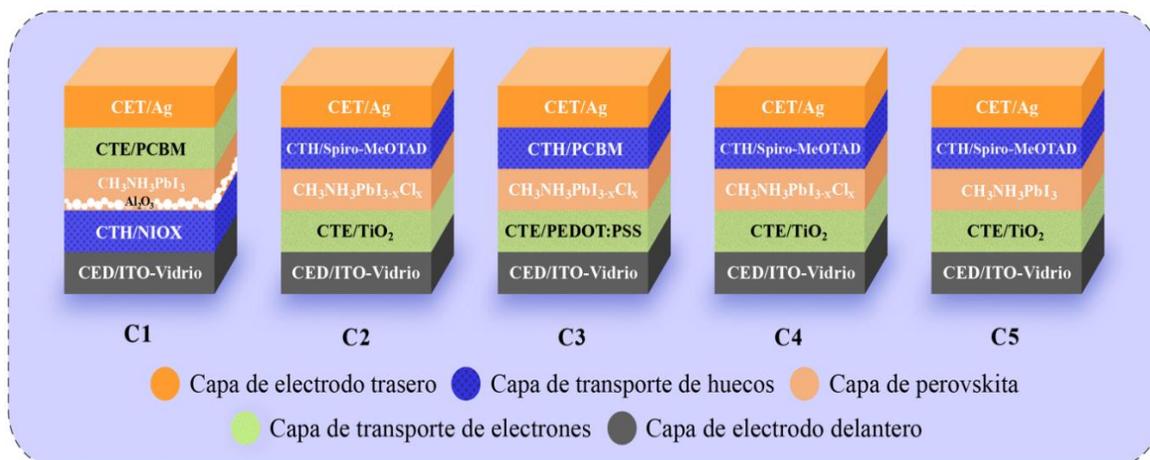
En este estudio se aplica el ACV para evaluar los impactos ambientales de cinco celdas solares de diferente arquitectura, llevándose de acuerdo con las directrices de la ISO 14040 – 14044 y las establecidas por la Agencia Internacional de Energía (AIE) para los ACV fotovoltaicos (Frischknecht et al., 2020; Fthenakis et al., 2011).

2.1. Definición de Objetivos y Alcance

El objetivo de este estudio fue evaluar los impactos ambientales ocasionados por un prototipo de celda solar de perovskita con una arquitectura PIN – mesosuperestructurada elaborado por Ramirez et al. (2019) en Colombia, y compararlos con respecto a los generados por cuatro celdas solares de perovskita disponibles en la literatura (ver Figura 1), mediante el uso de la herramienta de ACV, con el fin de identificar cuáles son los procesos, rutas de fabricación y materiales que generan mayor o menor impacto ambiental en la elaboración de esta tecnología emergente. Los inventarios y las rutas de fabricación se encuentran detallados en la información suplementaria de los artículos que se indican en la nota de la Figura 1. Por último, se comparó con otras celdas solares comerciales de primera y de segunda generación, teniendo como comparativo las emisiones de GEI originadas en la producción de 1 kWh.

Figura 1

Esquemas de la estructura de las celdas solares de perovskita evaluadas mediante el ACV, diferenciada por composición de capa y arquitectura



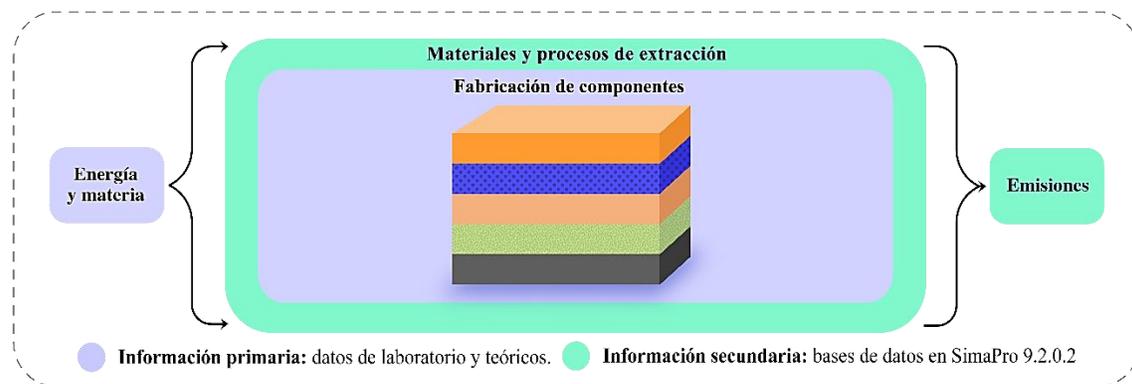
Nota: En la figura se presenta los materiales principales que componen las capas de las celdas solares de perovskita evaluadas mediante el ACV. C1 es adaptado de Ramírez (2019, p.195).

En el caso de C2 y C3 las figuras se adaptaron de Espinosa (2015, p.304). Por último, C4 y C5 se adaptó de Alberola (2018, p.170).

Para la evaluación y comparación de las celdas solares entre sí, se estableció el enfoque de la cuna hasta la puerta, se determinó este límite, debido a que la fase de operación, fin de vida útil y el balance del sistema conocido por su sigla en inglés como BOS, el cual comprende los sistemas de montaje, inversores y demás instalaciones eléctricas para las celdas solares de perovskita, aún no se tiene suficiente información detallada de CSP bajo un contexto local (Colombia) y a nivel de Latinoamérica, lo cual genera una incertidumbre alta para la comparación si se tienen en cuenta, debido a que este tipo de tecnología solo se ha probado a escala de laboratorio, por lo cual se tendría que utilizar información secundaria de celdas solares de primera y segunda generación para la fase de operación y fin de vida útil y el BOS, lo cual no sería un estimado propio de esta tecnología emergente (Ramamurthy et al., 2021). Por último, se tuvo en cuenta el uso de la Glove Box (GB) por separado en algunas celdas, ya que se tenía su inventario detallado. El detalle del límite del estudio se presenta en la Figura 2.

Figura 2

Límite del sistema general para las celdas solares de perovskita evaluadas en el estudio, enfocado de la cuna a la puerta



Nota: En la figura se muestra cómo se distribuyen las fuentes de información entre las fases de recolección de materiales y manufactura de la celda.

La unidad funcional de este estudio se definió como 1 cm² de área activa para la generación de CSP. El uso de esta unidad permite evitar los errores que se ocasionan cuando se toma 1 kWh como una unidad funcional, ya que existen varios factores que afectan la producción de electricidad para una celda fotovoltaica como lo es la variación de la irradiación normal directa la cual cambia según la localización geográfica, la eficiencia del módulo según los materiales y los métodos de procesamiento entre otros (Gong et al., 2015). No obstante, para el estudio, es importante considerar la unidad funcional de generación eléctrica (1 kWh), ya

que es la función o producto de las celdas solares e indica el grado de sostenibilidad de producción de energía dado el impacto ambiental generado. Para realizar la conversión de la unidad funcional de área a generación eléctrica se utilizó la ecuación (1) (Celik et al., 2016; Stasiulionis, 2015) y se fijaron algunos valores como lo son la insolación específica, el índice de rendimiento y la vida útil (ver Tabla S1). En el caso de la eficiencia se tomó el valor reportado por los autores (ver Tabla S4).

$$Impact_{kWh} = \frac{Impact_{cm^2}}{I \times n \times PR \times LT} \quad (1)$$

Donde:

I : Constante de insolación (kWh /cm² – año).

n : Eficiencia del módulo (%).

PR : Relación de rendimiento del módulo (%).

LT : Vida útil de la tecnología fotovoltaica (año).

$Impact_{cm^2}$: impacto por 1 cm² de área de módulo.

$Impact_{kWh}$: impacto por 1 kWh de electricidad generada.

El inventario recopilado de los materiales usados para la fabricación de las celdas solares está dado con base en lo requerido para 1 cm² y la producción de 1 kWh considerando una vida útil de 5 años. Los parámetros tales como la relación del rendimiento del módulo y la insolación, se establecieron iguales para todas las celdas con el fin de que el análisis pudiera ser comparativo entre diferentes tecnologías, por lo cual se tomó el valor promedio reportado por la literatura, exceptuando la eficiencia (Celik et al., 2016; Gong et al., 2015; Stasiulionis, 2015; Zhang et al., 2015, 2017)

El componente de extracción de materiales, fabricación de componentes y disposición incluyen todos los procesos utilizados para obtenerlos, transformarlos y fabricarlos en materiales útiles. La fase de montaje comprende los datos que se derivan de los experimentos realizados en laboratorio para fabricar los componentes de las celdas solares y de las celdas reportadas en la literatura. En el caso de las emisiones generadas en la fabricación del prototipo de celda solar de perovskita, se consideraron los desechos de solventes producto del proceso fabricación mediante el revestimiento por rotación, teniendo en cuenta que la literatura reporta que el 90 % del material se desperdicia al usar este método de fabricación y el 10 % mediante el método de evaporación térmica (Espinosa et al., 2015; Gong et al., 2015). Para este estudio no se consideraron el tratamiento de los residuos de solventes.

Con referencia al transporte, actualmente no existen plantas de fabricación fotovoltaica de perovskita en Colombia ni a nivel mundial, ya que solo se fabrican a escala de laboratorio

(Zhang et al., 2022). A partir de lo anterior, no se tuvo en cuenta el lugar de manufactura ni las distancias de transporte en las fases estudiadas. Al no incluir los impactos ambientales asociados al transporte, se pudo realizar un análisis comparativo, al asumir que las celdas solares tienen impacto de transporte similares (Zhang et al., 2017). En la literatura se reporta que la suposición de no considerar el transporte para sistemas fotovoltaicos orgánicos es factible, ya que las emisiones relacionadas con el transporte en la producción de este tipo de celdas son insignificantes, puesto que la mayoría de los materiales se pueden sintetizar química y localmente (Yue et al., 2012).

Para este estudio no se tuvo en cuenta la rodamina 101, la cual se deposita en la parte superior de CTE de C1, ya que no se pudo obtener la información primaria de la elaboración del producto o secundaria mediante base de datos y literatura científica, dicha sustancia contribuyen con menos del cinco por ciento de la masa, autores como Krebs-moberg et al, (2021), indican que se puede eliminar del inventario debido a que su contribución en la carga ambiental es baja; sin embargo, se debe investigar en el futuro con el fin de estimar el impacto total de esta celda.

No se tuvo en cuenta la fase de operación ya que se ha reportado que las celdas solares de las tres generaciones producen emisiones al medio ambiente cercanas a 0, excepto cuando se presenta la descomposición de los materiales en la encapsulación, escenario que no se consideró (Gong et al., 2015). La fase de desmontaje no se tuvo en cuenta ya que las CSP es una tecnología que aún se prueba en laboratorio por lo cual no se tiene información primaria de esta fase para el prototipo fotovoltaico de perovskita.

2.2. Inventario del Ciclo de Vida

El inventario de ciclo de vida de este estudio comprendió las emisiones contaminantes y consumos de recursos naturales adicionados durante el ciclo de vida, contemplando desde la extracción de la materia prima, fabricación de componentes de la celda solar hasta las emisiones durante el proceso de manufactura de la celda. Se consideraron las rutas de fabricación de las celdas solares en la cual se tiene la preparación de materiales para la síntesis química de algunas sustancias, requerimientos energéticos y de electricidad para la deposición de las capas que componen la celda solar.

En el caso de prototipo fotovoltaico de perovskita desarrollado por Ramírez et al. (2019), la mayoría de los datos se proporcionaron de manera directa por parte del laboratorio en el cual se midieron según la unidad funcional establecida (ver información suplementaria S2). Debido a que la información de la síntesis de algunas sustancias necesarias para la fabricación, no se tenía disponible, se optó por tomar dicha información de la literatura científica y la base de datos Ecoinvent 3.6 (Celik et al., 2016; Glogic, 2019; Gong et al., 2015; Itten & Stucki, 2017; Jiang et al., 2015; Leccisi & Fthenakis, 2021; Monteiro et al.,

2017; Stasiulionis, 2015; Tian et al., 2021). Los supuestos planteados anteriormente pueden no representar en su totalidad los procedimientos de fabricación, pero permiten obtener resultados conservadores y establecer un panorama de los impactos ambientales que se generan en la fabricación para este prototipo de CSP. Algunos datos del inventario no estaban disponibles en la base de datos de *Ecoinvent* o no se informaron en los inventarios recopilados de las celdas solares de estudio, para algunos compuestos necesarios para la fabricación de las CSP, por lo cual fue necesario realizar algunas adaptaciones, en caso de que no estuvieran, se creó el inventario siguiendo los procedimientos establecidos por la base de datos *Ecoinvent*, el cual consistió en definir el tipo de modelo a usar, para este estudio se seleccionó para la evaluación del inventario de CSP, la modelación en sistema y no como procesos unitarios, lo cual permitió realizar un análisis detallado que contuviera toda la serie de procesos unitarios del objeto de estudio, en este caso el detalle del impacto de capa de manera individual, las cuales constituyen la celda (sistema de proceso). Además, se seleccionó el modelo de asignación, corte por clasificación (*Allocation, cut-off by classification*) para sistemas, el cual permitió hallar la influencia de cada insumo y emisión asignada al producto de referencia (CSP), se deben tener en cuenta las incertidumbres que se generan al utilizar un modelo en los resultados presentados (Ecoinvent,2022).

El consumo de energía necesario en cada paso para la preparación de las celdas solares de perovskita, se calcularon y modelaron a partir de la producción de baja tensión en Colombia (datos tomados de la base de datos Ecoinvent), con el fin de que el análisis fuera comparativo. En el caso del prototipo se obtuvieron en cuenta los principales tipos de energía utilizadas en estos procesos, tal y como lo plantea Stasiulionis, (2015): la electricidad utilizada en los procesos de ultrasonido, ozonificación, recubrimiento por rotación, el calor utilizado durante el secado y el calentamiento.

Para el cálculo de la energía requerida se tomó la potencia promedio eléctrica del equipo según lo descrito por el fabricante, basado en la corriente y el voltaje del equipo. Una vez se calculó la potencia nominal, se multiplicó por el tiempo de uso del equipo para cualquier proceso y operación en la fabricación de la CSP dando como resultado la energía consumida. Con el fin de no sobredimensionar la cantidad de energía requerida dado la potencia nominal, se usó la metodología establecida por García-Valverde et al. (2010), en el cual en los cálculos incluye el factor del uso del equipo del laboratorio, ya que durante el uso del equipo para CSP de 1 cm², no se utilizan a su máxima capacidad (ver Tabla S2).

Los inventarios de ciclo de vida de la extracción de materiales para la producción del prototipo de celda solar de perovskita estudiado, se construyeron con base a los requisitos presentados en la tabla S3 en la información suplementaria.

2.3. Evaluación ambiental – Selección de Categorías de Impacto

La evaluación del ciclo de vida de las celdas solares de perovskita se llevó a cabo utilizando el software SimaPro 9.2.0.2. Los impactos ambientales desde la cuna a la puerta se calcularon y compararon bajo las directrices establecidas para la evaluación de ciclo de vida de tecnologías fotovoltaicas y teniendo en cuenta los métodos más usados en la literatura para ACV de celdas perovskita con el cual se van a comparar (Alberola et al., 2018; Espinosa et al., 2015; Frischknecht et al., 2016, 2020; Zhang et al., 2015, 2017). Por lo cual se seleccionó el método Internacional Life Cycle Data System (ILCD), la versión utilizada de este en el software, es el ILCD 2011 Midpoint + V1.11, debido a que calcula las categorías de impacto ambiental bajo un enfoque de política ambiental y permite investigar más a detalle los indicadores de toxicidad humana (Okoroafor et al., 2022). Dicha versión tiene 16 impactos que se pueden calcular, según lo reportado por la literatura se seleccionaron 10 categorías de impacto ambiental: Cambio Climático (CC), Toxicidad Humana Cancerígena (THC), Toxicidad Humana No Cancerígena (THNC), Material Particulado (MP), Acidificación (Ac), Eutrofización de Agua Dulce (EAD), Ecotoxicidad en el Agua (EA), Uso del Suelo (US), Agotamiento de los Recursos Hídricos (ARH), Agotamiento de Recursos Minerales, Fósiles y Renovables (ARMFR). Por último, el factor de normalización implementado es el EC – JRC Global, este permite cuantificar bajo un enfoque estándar ya que recopila estadísticas internacionales sobre emisiones y recurso extraídos a nivel global y no europeo a diferencia del EU27 2010, esta selección de utilizar un método global y no específico se debe a que actualmente no existe desarrollado un método bajo el contexto de Sur América o América Latina, por lo cual la selección del método recomendado para energías fotovoltaicas bajo un contexto global se considera justificable, por otro lado, se recomienda utilizar este método si no se tiene certeza en toda la información y hay suposiciones en algunos flujos de materia y energía, por lo cual se debe utilizar el factor de normalización más alto, el cual es el global en nuestro caso. Además, se agregó el indicador de energía, Demanda de Energía Acumulada (DEA) para detallar la contribución de energía. Los detalles sobre las categorías usadas en este estudio se presentan en la Tabla S4.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

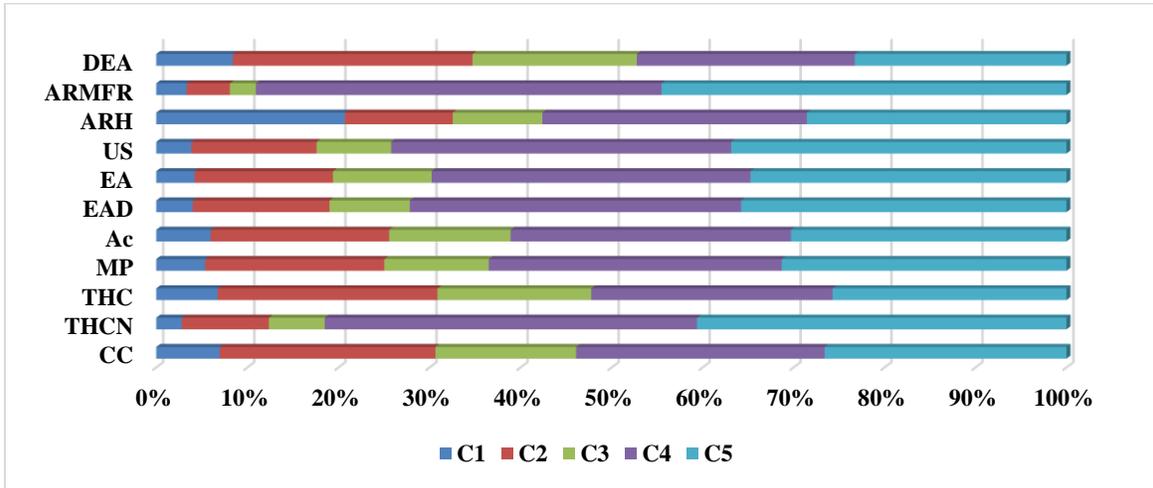
3.1. Impacto Ambiental de las Celdas Solares de Perovskita

En la Figura 3, se presentan los resultados de los impactos ambientales relativos en términos de porcentaje de las cinco CSP presentadas anteriormente en la Figura 1, mediante la combinación de opciones de modelado consideradas en la sección 2 y los factores de caracterización del método seleccionado. Con el fin de que los valores fueron comparables se consideró el impacto total para cada celda y no para cada capa que la constituye con el fin de identificar cuáles son los impactos más significativos y compararlos entre sí, sin ser

específicos en cual capa aporta mayor impacto, dicho análisis se presenta posteriormente en la Figura 5 y Figura 6.

Figura 3

Resultados de los impactos ambientales que compara los perfiles ambientales de las celdas solares de perovskita de estudio. El cálculo se realizó con el método ILCD Midpoint+ V1.11



Nota: Caracterización del perfil ambiental de las celdas C1, C2, C3, C4 y C5 calculado con el método ILCD 2011, para las categorías de Cambio Climático (CC), Toxicidad Humana Cancerígena (THC), Toxicidad Humana No Cancerígena (THCN), Material Particulado (MP), Acidificación (Ac), Eutrofización de Agua Dulce (EAD), Ecotoxicidad en el Agua (EA), Uso del Suelo (US), Agotamiento de los Recursos Hídricos (ARH), Agotamiento de Recursos Minerales, Fósiles y Renovables (ARMFR). Los resultados de la figura se presentan con mayor detalle en la **Tabla S5** de la información suplementaria.

Los resultados mostraron que la celda solar que generó menor impacto ambiental en todas las categorías evaluadas, excepto en el ARH es la celda C1, Contrariamente C4 y C5, son las celdas que dominaron en todas las categorías de impacto ambiental, seguidas de C2 y C3. Este resultado en la celda C1, se debió al menor requerimiento energético para los procesos de síntesis, secado, sinterizado de sustancias y procesos de disposición de las capas que la componen, resultado que se verificó con el valor de DEA, el cual indica que es la celda que utilizó menor cantidad de energía primaria a lo largo de su fabricación, tanto en los usos directos como indirectos, esto en gran parte a que los procesos que se usaron no requirieron temperaturas mayores a 110 °C en la síntesis de la celda. Como es el caso de la capa CTH compuesta por óxido de níquel (NiO_x), en la cual utilizaron el método de disposición por precipitación química, reportado por Ciro et al. (2017), dicho método, utiliza bajas temperaturas para la síntesis, el cual está por debajo de los 100 °C, valor parecido a los reportados cuando se utilizan materiales alternativos orgánicos tales como la Spiro-MeOTAD, PCBM, P3HT, PTAA, PEDOT:PSS, Poly-TPD y EH44, los cuales presentan temperaturas de procesamiento bajas, pero son más costosos e inestables que los inorgánicos

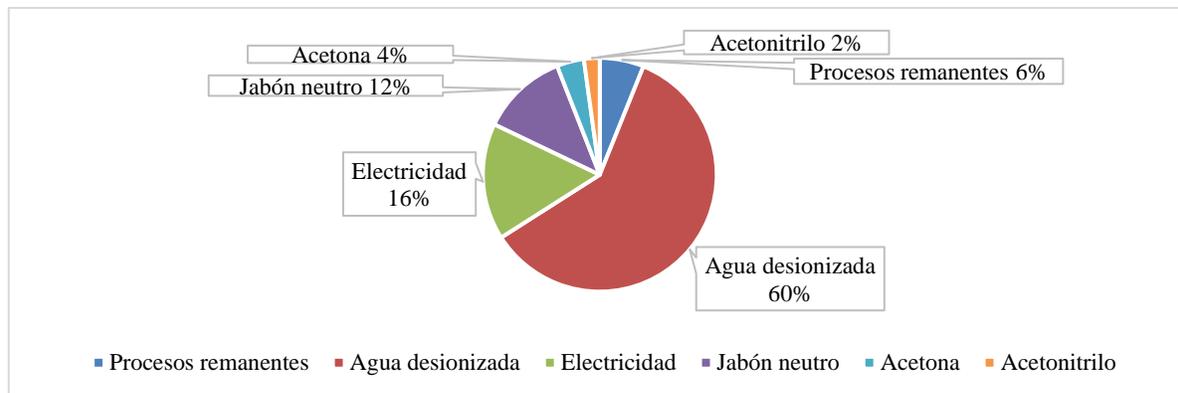
(Dong et al., 2015; Jin et al., 2021; Wang et al., 2021; You et al., 2014), tales como: óxido de cobre (CuO_x), óxido de cobre (Cu_2O), sulfuro de cobre (CuS), yoduro de cobre (CuI), tiocianato de cobre (I) (CuSCN), cromito de cobre (II) (CuCrO_2), óxido de cobre y galio (CuGaO_2), sulfuro de indio y cobre (CuInS_2), sulfato cuproso ($\text{Cu}_2\text{BaSnS}_4$), óxido de cobalto (II) (CoO_x), óxido de molibdeno (MoO_x), disulfuro de molibdeno (MoS_2), Sulfuro de plomo (II) (PbS), óxido de cromo (CrO_x) y NiO_x depositados mediante otro proceso (Arumugam et al., 2021; Leccisi & Fthenakis, 2020). Estos últimos materiales, en la mayoría de los casos requieren temperaturas superiores a 100°C para la preparación y síntesis, llegando a valores inclusive por encima de los 500°C , lo cual ha sido un limitante técnico y económico (Chi et al., 2018; Liu et al., 2017; Ouyang et al., 2021; Papadas et al., 2018; Singh et al., 2019; Zuo & Ding, 2015). En el caso de las celdas C2, C4 y C5, estas utilizaron como CTH, la Spiro-MeoTAD y para la celda C3, el PCBM.

En el caso del impacto ambiental donde la celda C1 es mayor a C3 en la categoría de ARH, se le atribuyó dicho resultado al uso de ciertas sustancias y uso de energía (ver

Figura 4). En este sentido se observó que la mayor contribución se debe al uso de agua desionizada, esto se debe a que C1 utiliza una mayor cantidad de agua en el lavado de los sustratos para la fabricación de la capa CTH a comparación de las otras CSP evaluadas, siendo el método de precipitación química usada en la capa de NiO_x , la capa de electrodo frontal recubierta por ITO y para la síntesis de la capa mesoporosa de óxido de aluminio (Al_2O_3) el proceso principal que requiere agua desionizada. En el caso de las otras celdas, la mayor contribución en este impacto se debe al gasto energético, para C2 y C3 (>90 %) y para las C4 y C5, se le atribuye al vidrio recubierto que se utiliza en la capa de electrodo delantera con un promedio del 65 %.

Figura 4.

Contribución de la materia y energía en la categoría de impacto ambiental de Agotamiento del Recurso hídrico de la C1, mediante el método ILCD 2011 Midpoint+ V1.11.

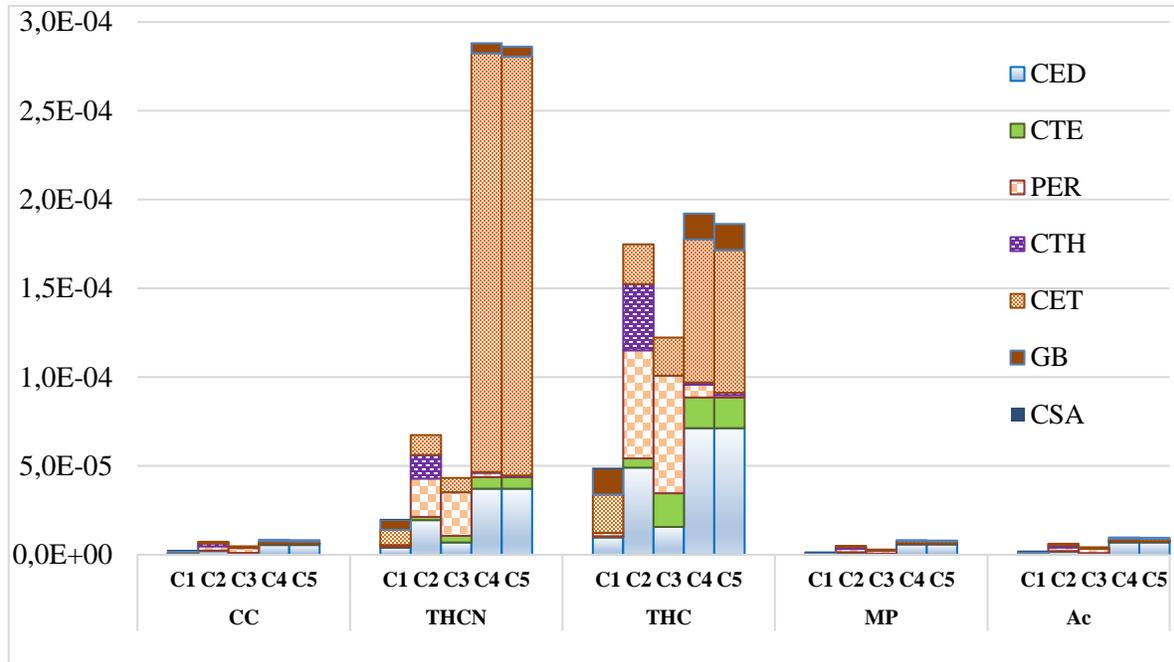


Fuente: Elaboración propia

La Figura 5 y Figura 6, muestran las puntuaciones de impactos ambientales normalizados por cm^2 de área activa, diferenciado por capa para la generación de las cinco CSP, con el fin de identificar donde se genera el mayor impacto ambiental. El resultado indicó que la categoría de Ecotoxicidad de Agua dulce (EA) y de la Toxicidad Humana Cancerígena (THC) y No Cancerígena (THNC) son las que contribuyeron en mayor grado entre todas las categorías, resultados que se ajustan con lo reportado por Maranghi et al. (2019), Monteiro et al. (2017) y Detnatthawut & Varabuntoonvit, (2022). Las contribuciones en estas categorías de impacto se distribuyen por capa (ver Figura 5 y Figura 6). Debido a que la contribución en las categorías de CC, MP, Ac, EAD, US, ARH y ARMFR eran muy bajas, no se tuvieron en cuenta a la hora del análisis, por lo que sólo se emplearon sólo las de impacto.

Figura 5

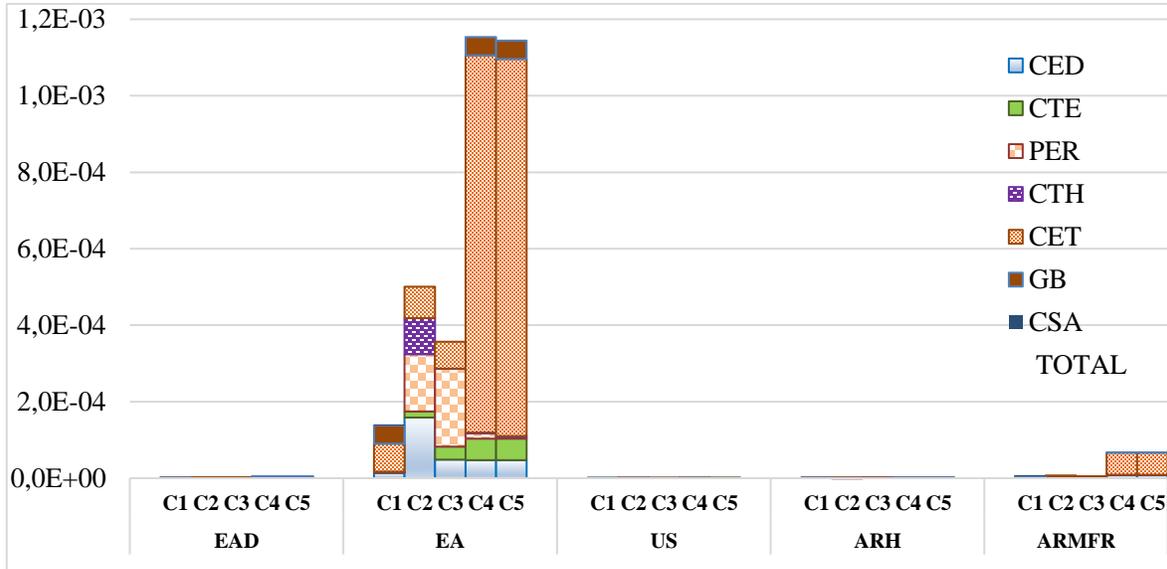
Resultados de los impactos normalizados de la fabricación de las cinco CSP, de las categorías CC, THCN, THC, MP y Ac, aplicando la metodología ILCD 2011 Midpoint+ V1.11/Normalización EC - JRC Global, mediante el software SimaPro 9.2.0.2



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6

Resultados de los impactos normalizados de la fabricación de las cinco CSP, de las categorías EAD, EA, US, ARH y ARMFR, aplicando la metodología ILCD 2011 Midpoint+ V1.11/Normalización EC-JRC Global, mediante el software SimaPro 9.2.0.2



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los análisis y resultados de las principales categorías:

3.1.1. *Impacto Ambiental de la Ecotoxicidad en el Agua Dulce.*

Para las celdas C1, C4 y C5, la capa con mayor contribución en la categoría EA es la CET, como se observa en la figura 6, las cuales están compuestas por plata (C1) y oro (C4 y C5), minerales que se les atribuye un alto impacto ambiental debido a los procesos asociados en la extracción, purificación, drenaje de sustancias químicas tóxicas como el cianuro, arsénico, sulfuros, antimonio y mercurio en diferentes procesos, facetas reactivas y solubilidad del material entre otros. Dichas sustancias al interactuar con organismos afectan su salud, debido a la propiedades genotóxicas de los iones de la plata y el oro, los cuales generan inhibición de enzimas, afectaciones en la membrana biológica, daño en el ADN, alteraciones metabólicas, problemas en la reproducción sexual y bioacumulación (Akpalu & Normanyo, 2017; Falanga et al., 2020; Kolesnikov et al., 2020; Zoomi et al., 2020). Siendo el electrodo compuesto por oro el más significativo, con una contribución en esta categoría para la celda C4 y C5 del 83,2 y 83,9 % respectivamente, en donde para ambas la energía primaria usada para la CET fue de $1,39E^{-01}$ MJ, de la cual el oro requirió el 62 % del total para ambas. En el caso de la celda C1, la CET contribuyó con un 52,8 % en esta categoría, en donde el uso de la electricidad aportó el 93% y la plata el 1,26 %, siendo un valor bajo comparado con el calculado con el oro. No obstante, el uso de la energía primaria en esta capa es de $1,43E^{-01}$ MJ, el cual es cercano a los reportados en las otras CET de las demás celdas evaluadas, esto se debe a que se utilizan el mismo método de disposición, el cual es la evaporación térmica. Estos resultados concuerdan con los presentados por Gong et al. (2015), en donde al comparar el impacto ambiental de dos módulos solares de perovskita con diferentes capas de electrodo trasero, uno compuesto por oro y otro por plata, se determinó que el cátodo de

oro era el mayor contribuyente en todas las categorías de impacto ambiental, con una contribución específica del 93 % en la categoría de ecotoxicidad de agua dulce, mientras que la plata solo contribuyó con un 52 %.

De la misma manera, Ibn-Mohammed et al.(2017) compararon dos módulos solares de perovskita con diferente arquitectura y métodos de disposición; un módulo presentaba un cátodo de oro y el otro de cobre, dando como resultado que aunque la cantidad usado de oro era baja, este contribuía con un 82 % en la categoría de ecotoxicidad de agua dulce, indicando que era el mayor contribuyente en todas las categorías de impacto ambiental evaluadas, mientras que el cátodo del cobre no contribuyó de manera significativa en los impactos ambientales del módulo. Farjana et al. (2019), respalda estos resultados, al evaluar el impacto ambiental de la etapa de producción del oro, plata, plomo, zinc y cobre, en el cual determinaron que el oro y la plata generan los mayores impactos ambientales, siendo en el oro el mayor, presentando valores en la categoría de ecotoxicidad de agua dulce de 2,84 kg Peq mientras que en la plata $4,80E^{-02}$ kg Peq.

Por último, para esta categoría evaluada en las cinco celdas de estudio, el mayor impacto se debió al alto consumo energético para las celdas C1, C2 y C3, y se distribuyó en la producción, síntesis y disposición de la CET (ver Tabla 1). Por otro lado, para las celdas C4 y C5 se obtuvo una mayor contribución debido al uso del metal oro en la CET, en segunda posición al consumo energético. Para todas las celdas evaluadas las sustancias químicas utilizadas en la manufactura de las capas, tuvieron la menor contribución, con un valor por debajo del 5 % del impacto total de la categoría normalizada.

Tabla 1

Resultados de la contribución por procesos más influyentes en términos de porcentaje en la categoría de ecotoxicidad en el agua dulce (normalizado), para las cinco CSP de estudio. Solo se muestran los resultados con un porcentaje de impacto superior al 0,5 %.

Proceso	C1	C2	C3	C4	C5
Electricidad baja tensión {Co} (%)	93	94,5	98,1	13,1	12,5
Metal usado en el cátodo de electrodo trasero (%)	1,26	2,37	0,0139	83,2	83,9
Indio (%)	1,72	-	0,66	-	-
Acetonitrilo (%)	0,571	-	-	-	-
Nitrógeno (%)	-	2,64	0,64	-	-
Vidrio plano sin recubrimiento (%)	-	-	-	2,82	2,84
Procesos remanentes (%)	3,45	0,49	0,59	0,88	0,76

Nota: Solo se muestran los resultados con un porcentaje de impacto superior o igual al 0,5 %.

En el caso de las celdas C2 y C3, aunque utilizaron como capa de electrodo la plata y el aluminio respectivamente. La síntesis de la capa de perovskita de ambas celdas contribuye

en mayor medida, las cuales difieren en su método de disposición, siendo una a vapor y la otro mediante recubrimiento por rotación respectivamente; dichos métodos presentan mayores requerimientos energéticos que los requeridos por las demás capas. No obstante, se presentó un menor impacto ambiental en la celda C3, debido al uso del aluminio como cátodo y no la plata.

3.1.2. *Impacto Ambiental de la Toxicidad Humana Cancerígena.*

En el caso de la categoría de impacto ambiental de THC, se observa en la Figura 5, que las celdas C4, C5, C2 y C3, presentaron los mayores impactos. Para las cuales se hallaron valores cercanos entre sí de $1,92 \text{ E}^{-04}$, $1,86 \text{ E}^{-04}$, $1,75 \text{ E}^{-04}$ y $1,22 \text{ E}^{-04}$ CTUh respectivamente. A diferencia de la celda C1, la cual presenta el valor más bajo de CTUh por cm^2 en esta categoría. El alto impacto generado por C4 y C5, se generó en la CET, con un aporte del 41,8 % y 43,1% respectivamente, de los cuales, el oro contribuyó con el 91,9 % y 90,2% respectivamente, estos resultados se asocian con los procesos de extracción y manufactura de este metal indicado anteriormente, el cual hace parte de una industria que genera consecuencias en el medio ambiente y la salud humana, debido al gran uso de elementos potencialmente tóxicos, tales como arsénico, cromo, cobre, níquel, cadmio, plomo, mercurio y zinc (As, Cr, Cu, Ni, Cd, Pb, Hg y Zn), respectivamente, de los cuales los cuatro primeros son altamente cancerígenos en caso de ser ingeridos, inhalados y absorbidos dérmicamente en los procesos de extracción y manufactura (Chen et al., 2022).

En segundo lugar, la contribución para las celda C4 y C5 en este categoría, se encuentra en la CED, la cual su aportante es el vidrio revestido con FTO con un porcentaje del 37,1% y 38,3% respectivamente, esto debido al uso del vidrio plano sin recubrimiento el cual aporta el 83,0% y 82,8% respectivamente, dado a que los procesos de extracción y manufactura de este material, utilizan sustancias como el Cr, Cr^{+6} , Hg y Zn, los cuales se emiten a la matriz agua, suelo y aire y son cancerígenos si se tienen contacto.

En el caso de la celda C2, la capa que más contribuye en esta categoría, es la de perovskita (34,8 %) de la cual la electricidad aporta el 70,69 % y el restante debido al uso de nitrógeno líquido (29,31 %), en segundo lugar, la CED revestido con FTO (28,1%).

Se observa que el uso de la capa de vidrio revestida de ITO usada en las celdas C1 y C3, aportó un menor impacto ambiental en esta categoría, con valores del 20% y 12,8% respectivamente, a comparación que cuando se utiliza la capa de vidrio revestido de FTO en las celdas C2, C4 y C5 en las cuales este contribuyó, con el 28,1, 37,1 y 38,3% respectivamente. Al comparar los resultados con los reportados en la literatura, estos difieren, al no ser la capa de ITO la que generó mayor impacto debido al consumo energético que requieren en la fabricación de la CSP, materiales y procesos de síntesis (Binek et al., 2016; Tian et al., 2021).

Al evaluar de manera detallada, se encuentra que las celdas C1 y C3, solo requieren $1,43 \text{ E}^{-01}$ y $3,88 \text{ E}^{-01}$ MJ respectivamente para la síntesis de la CED, a diferencia de la celda C2, la cual demanda $5,25 \text{ E}^{-01}$ MJ. En el caso de las celdas C4 y C5, aunque el requerimiento energético era más bajo con valores de $1,67 \text{ E}^{-01}$ MJ y $1,59 \text{ E}^{-01}$ MJ respectivamente, la cantidad de vidrio usada en esta capa fue superior a la demandada en las demás capas, con un valor $3,4 \text{ E}^{-02}$ kg por 1 cm^2 el cual se le atribuyó el 83% del impacto en la categoría para la CED de estas celdas, mientras que en C1, C2 y C3 solo utilizaron para esta capa $1,54 \text{ E}^{-04}$ kg de vidrio por 1 cm^2 de celda en la CED. No obstante, hay que tener en cuenta que el ITO al contener In, tiene una alta demanda en otras aplicaciones electrónicas y a que es un material escaso en el mundo, por lo cual no puede ser una base segura para la producción de electricidad fotovoltaica; además, de causar daños pulmonares, neumonía intersticial, y carcinogenicidad si se exponen a concentraciones superiores a $3 \mu\text{g L}^{-1}$ (Schileo & Grancini, 2021).

Con respecto a la categoría THC, una preocupación latente que cuestiona la implementación de CSP, es si el uso de las sales solubles de plomo (II), contribuyen en esta categoría de manera significativa debido a su toxicidad y los riesgos asociados para la salud humana y su impacto en el medio ambiente (Babayigit et al., 2016; Balali-Mood et al., 2021). Se halló que para las cinco celdas en esta categoría la contribución del plomo era muy baja e insignificante, reportando para las celdas C4 y C5, valores de $8,14 \text{ E}^{-8} \%$ y $8,15 \text{ E}^{-4} \%$ respectivamente. Se observa en este caso, que el uso de la síntesis de dicho compuesto influyó, generando un mayor impacto en esta categoría cuando se utiliza el cloruro del plomo en comparación que cuando se utiliza el yoduro de plomo (usado en la celda C5). Para este estudio, ambas celdas modelaron el consumo energético que requieren para la deposición de la perovskita mediante recubrimiento por rotación. No obstante, el inventario de los materiales para la síntesis no fue presentada por el autor, por lo que en este estudio se modelaron a partir de Espinosa et al. (2015) para la celda C4 y en el caso de C5, en esta se utilizó el inventario reportado por Gong et al. (2015).

En cuanto a la capa de perovskita de estas celdas (C4 y C5), el único contribuyente significativo es el uso de nitrógeno líquido con un promedio del 1,43% el cual se consume en la GB, donde se sintetiza dicha capa de perovskita. Para el caso de las celdas C1, C2 y C3 la contribución del Pb en la categoría THC es de $2,77 \text{ E}^{-1} \%$, $2,26 \text{ E}^{-7} \%$ y $1,72 \text{ E}^{-7} \%$ respectivamente. Aunque la celda C1, presenta mayor aporte, sigue siendo no significativo en el impacto negativo que pueda ocasionar, del mismo modo se presenta para la ecotoxicidad de agua dulce. Este resultado confirma lo reportado por la literatura, en la cual se ha determinado que el uso de Pb en la perovskita no es la principal preocupación en términos de impactos ambientales y de salud humana, generando contribuciones bajas en comparación al requerimiento energético necesario para la fabricación de dichas celdas, el uso de solventes tóxicos y elementos sustitutos propuestos tales como el estaño, indio, germanio y bismuto

entre otros (Jokar et al., 2019; Kadro & Hagfeldt, 2017; Schileo & Grancini, 2021; Zhang et al., 2015).

3.1.3. *Impacto Ambiental de la Toxicidad Humana No Cancerígena.*

En el caso de la categoría THNC, aunque presentó la misma tendencia que la reportada para la categoría THC, aumenta considerablemente los impactos en C4 y C5, con valores de $2,88 \text{ E}^{-04}$ y $2,86 \text{ E}^{-04}$ respectivamente, lo cual equivale a un crecimiento del 150% si se compara con el reportado en la categoría THC para estas celdas. El aumento en la categoría THNC se le atribuyó al uso del oro en la CET con un aporte del 80,8% y 81,4% respectivamente, en segundo lugar, al uso del vidrio en la CED con un valor promedio del 11,1% para ambas celdas, y por último al uso de electricidad para todas las capas con un valor promedio del 6%. Las demás sustancias y/o procesos aportaron menos del 1%.

Al evaluar las sustancias que contribuyeron en esta categoría, se encuentra que las principales son: zinc, arsénico, mercurio, bario, plomo, talio y plata, sustancias que se encuentran reportadas en la agencia para el registro de sustancias tóxicas y enfermedades (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 2022). Las cuales contribuyeron para ambas celdas en promedio con porcentajes de 64,24; 13,48; 7,33; 6,25; 5,15 y 1,09 respectivamente y por último un 0,74 % para sustancias remanentes, las cuales se utilizan en el proceso de extracción del oro e influyen negativamente en la salud humana si llegan a ingerir o inhalar en determinadas concentraciones, Anyimah-Ackah et al. (2022).

Estos últimos investigadores reportaron que las sustancias antes mencionadas son un riesgo para la salud si se tiene contacto con ellas por vías como ingestión, dérmica e inhalación, proceso que ocurre con los alimentos y líquidos, que se encuentran en áreas de extracción de oro, además de la contaminación del suelo, agua y el aire, demostrando que las personas que estaban en contacto con estos elementos contaminados son propensos a neuropatía sobre todo por el consumo de bario, nefrotoxicidad, enfermedades hematológicas, proteinuria, problemas en el sistema nervioso y endocrino entre otros. La magnitud de los efectos anteriores depende según la etapa de vida, por último, se indicó sobre el problema de bioacumulación de tóxicos reportados como la plata y el mercurio a largo plazo, elementos que se encuentran en el inventario de este estudio. El estudio de Chen et al. (2016) también reportó que el zinc es el más influyente en las enfermedades no cancerígenas para poblaciones expuestas o que estén en contacto como en las áreas mineras, seguido del plomo, plata y cobre.

En el caso de las celdas C2, C3 y C1 presentaron un impacto menor, con una unidad de factor menos, con valores de $6,74 \text{ E}^{-05}$, $4,32 \text{ E}^{-05}$ y $1,96 \text{ E}^{-05}$ respectivamente, encontrándose por debajo de los valores reportados para la categoría THC. En el caso de las celdas C2 y C3, la capa de perovskita es la que más influye en esta categoría con un aporte del 32,1% y 56,8%

respectivamente. Al evaluar la capa de perovskita para C2 se determinó que los principales contribuyentes son el uso de electricidad (74,7%) y el uso de nitrógeno usado en la GB (25,3%) para poder realizar la síntesis de la capa. En el caso de las sustancias utilizadas en los diferentes procesos de extracción y manufactura de los elementos que componen la capa, los principales contribuyentes son el zinc, arsénico, mercurio y plomo en el compartimiento agua y aire, con un 41,84%, 33,54%, 8,25% y 6,46% respectivamente del 100% de las sustancias usadas, el resto de sustancias tuvieron un impacto menor del 5,0%.

Para el caso de la celda C3, el uso de la electricidad contribuyó en la capa de perovskita con un 94,1% y el uso de nitrógeno líquido con un 5,89%. Las sustancias que aportaron en esta categoría para esta capa son el zinc (24,87%) y el arsénico (17,15%), el resto de sustancias generaron un impacto menor al 5,0%. Aunque la celda C2 tuvo mayor impacto en esta categoría, la capa de perovskita de C3, generó mayor impacto que la capa de perovskita de C2, dado a que tiene un mayor requerimiento de electricidad para la deposición de la capa, en la cual se utilizó el recubrimiento por rotación, mientras que la celda C2, uso la deposición de vapor la cual es más eficiente en términos de deposición de solución, ya que el método por recubrimiento por rotación desperdicia el 90% de la solución precursora, generando mayor cantidad de residuos contaminantes, a diferencia de la deposición a vapor la cual solo emite desperdicios del 10%.

Los resultados anteriores difieren con lo reportado por Espinosa et al. (2015) y Celik et al. (2016) en donde indicaron que el método por deposición a vapor tiene altos impactos ambientales en ecotoxicidad y cambio climático al compararse con el recubrimiento por rotación. No obstante, autores como Hauck et al. (2017) determinaron que los estudios anteriores no son determinantes en esta conclusión, ya que las emisiones deberían disminuir con el uso de procesos de producción de gran escala, en el cual el recubrimiento por rotación es el procesamiento menos eficiente de todos los disponibles actualmente.

Por otro lado, las capas que aportan en menor medida seguido de la capa de perovskita para la celda C2 es CED (28,9%), CTH (19,8%) y CET (16,5%). En el caso de la celda C3 la CET (18,6%), CED (16%) y la CTE (8,57%), siendo mayores los impactos ambientales de las CED, CTH y CET en C2 que los calculados para C3, de los cuales se determinó que el uso del FTO genera mayor toxicidad humana no cancerígena que el ITO para la CED, debido al mayor uso de electricidad y estaño en comparación con la CED de C3, además de que la CED de C2 utiliza zinc en el procesamiento de esta.

Aunque se ha demostrado que la capa de ITO puede causar mayor impacto ambiental en comparación con la capa de FTO en la categoría de toxicidad humana, debido a su gran consumo de energía y al uso del indio (Gong et al., 2015, Espinosa et al., 2015); autores como Zhang et al. (2022), indicaron que aun demostrando que el FTO tenía mejor desempeño ambiental en sus estudios, no era posible indicar que siempre se cumpla, ya que este puede requerir mayor cantidad de materiales de soporte y energía en algunos casos específicos,

como el reportado en la presente investigación en donde la CED revestido por FTO ocupaba el 52,4 % de la masa total de la celda, mientras que para las otras dos celdas con las cual se comparó y se revistió la CED con ITO, solo ocupaba en promedio el 20% de la masa total, indicando que el FTO requería mayor cantidad de materiales de soporte y energía para su fabricación, lo cual aumento su impacto ambiental.

Otros estudios soportan dicha afirmación, como Monteiro et al. (2017), en el cual consideraron diferentes CSP con diferentes CET, generando mayor impacto en esta categoría cuando se utiliza el FTO en vez del ITO, a causa de un mayor requerimiento energético, también indicaron que el uso del zinc en la manufactura de esta capa a diferencia del ITO, aumenta los impactos debido a su efecto en la salud humana. A su vez Maranghi et al. (2019), reportaron que el uso del zinc al tener contacto con el agua en la obtención de la materia prima y procesos para la manufactura de la CSP para esta capa donde se utiliza FTO, aumenta la carga ambiental en la categoría de toxicidad, siendo mayor en la categoría de toxicidad humana no cancerígena.

Por otro lado, los resultados indicaron que la Spiro-MeoTAD como CTH de la celda C2 genera mayor impacto que el PCBM de la CTH de la celda C3, debido en gran parte a un mayor requerimiento energético (76,8%), al uso nitrógeno para la síntesis de la capa (20,6 %) y en menor medida al monoclorobenceno (0,25%) entre otras sustancias, mientras que la CTH de C3, solo contribuye en esta categoría con un 0,07% del cual los procesos del requerimiento energético (62,4%) y el calor de vapor generado o usado en el procesamiento de la capa (30,6%), son los principales generadores.

El alto impacto de la Spiro- MeoTAD con respecto al uso de los otros materiales que se pueden usar en la CTH, ha sido documentado. En este sentido, Monteiro et al. (2017) y Zhang et al. (2022), demostraron que el uso de la Spiro – MeoTAD como CTH era sumamente mayor en esta categoría, si se comparaba con otras sustancias que se pueden utilizar para esta capa tales como el PCBM, CuSCN y PEDOT: PSS, esto debido principalmente al uso de materiales tóxicos como el monoclorobenceno, que afecta el sistema nervioso central.

En el caso de la CET, C2 generó mayor impacto en esta categoría que en la celda C3, en parte por el cátodo que utiliza en esta capa, la cual es la plata, contribuyendo con un 27,5 %, mientras que el aluminio el cual es el cátodo usado en la celda C3 aporta solo con un 0,03 %. Para ambas celdas, el requerimiento energético es el mayor contribuyente con un 72,5% y 99,97 % para las celdas C2 y C3 respectivamente. Por otro lado, C2, presentó mayores emisiones de zinc y arsénico al agua, lo cual aumenta la toxicidad de esta celda con respecto a C3, este resultado concuerda con los reportados en la literatura por Espinosa et al. (2016), Zhang et al. (2017) y Zhang et al. (2022), indicando que se genera mayor impacto ambiental en la categoría THNC, la plata sobre el aluminio, esto se debe a que en la etapa de extracción utiliza más electricidad y materiales tóxicos, sin embargo, en algunas ocasiones, la diferencia no es muy significativa como se pueden ver en los resultados de estos estudios, esto se debe

a que la industria de la minería de aluminio, aunque no utiliza tantos materiales tóxicos como en la plata para la extracción, utiliza una gran cantidad de electricidad en la refinación y fundición, en donde además se dan la mayoría de las emisiones al medio ambiente (Farjana et al., 2019), por lo cual ambos metales se sugieren cómo cátodo a diferencia del oro.

Por último, en la celda C1, la capa con menor impacto en la categoría THNC de las 5 evaluadas es la CTH, el impacto en esta categoría se distribuye mayoritariamente en la CET (43,3%), seguido de la GB (28,8%), CED (20,8%) y por último la capa de perovskita (5,6%). Su bajo impacto en esta capa (CTH) con respecto a las demás celdas se debe a que su arquitectura presenta los materiales y procesos que contribuyen menos en comparación con las otras, ya que utiliza como CTH el óxido de níquel (NiO_x), que no requiere tanta energía para su síntesis como otros materiales usados en esta capa (ver sustentación teórica en la sección 3.1). Además, utiliza menos materiales tóxicos a la salud, emitiendo una contribución muy baja como es el caso del níquel, el cual contribuye apenas con el 0,75% cuando se emite al agua, lo mismo en el caso del arsénico, el cual tiene un aporte del 0,20% en este estudio. Las demás sustancias tóxicas consideradas para esta categoría están por debajo del 0,2%, que concuerda con los resultados reportados en la literatura en donde sugieren el uso de NiO_x o CuSCN , ya que al ser sustancias inorgánicas, reportan menos emisiones de contaminantes tóxicos, si se compara cuando se utiliza solventes orgánicos como los que contiene la Spiro-MeOTAD, la cual genera un mayor impacto ambiental, ya que al estar en contacto con la luz se acelera la oxidación química de estas sustancias tóxicas, las cuales contaminan la matriz agua y aire (Goetz et al., 2020).

En el caso de la CET, aunque en la celda C1 se utiliza plata al igual que en C2, esta presentó un impacto más bajo en la categoría de THNC, ya que utiliza un 15 % menos de material (plata) para la elaboración de esta capa, por lo cual generó menos emisiones de sustancias tóxicas en la extracción y manufactura de la celda. No obstante, la CET de C1 generó más impacto que la CET de C3, la cual utilizó aluminio, reportando un 6 % menos de impacto en esta categoría al compararse con la CET de la celda C1, resultado que se debe tener en cuenta si se quiere disminuir el impacto ambiental de C1 en esta categoría.

Para la GB, proceso en el que se generó mayor impacto en esta categoría, después de la CET de la celda C1, debido principalmente al alto requerimiento energético que exige la GB, con un valor de $0,0533 \text{ MJ/cm}^2$, el cual aporta el 97,1% del total en la categoría de THNC. Por otro lado, el uso del nitrógeno gaseoso con un 2,92 %, el cual es un gas tóxico que al emitirse al aire afecta la salud humana ya que contiene trazas de sustancias tales como el mercurio y zinc, el cual se corroboró en el inventario de emisiones arrojado por el software. Esta capa presenta impactos similares para las celdas C4 y C5 (ver resultados suplementarios) ya que se modelaron con la misma información. En el caso de las celdas C2 y C3, no se pudo obtener un desglose de cuanto impacto genera el uso de la GB, ya que está intrínseco en la elaboración de las capas, además para las celdas C1, C4 y C5, se modeló el uso de la GB con nitrógeno

gaseoso debido a que este es el estado en la que se consume, mientras los inventarios de las celdas C2 y C3 se realizó el inventario con nitrógeno líquido.

En el caso de la capa de perovskita en esta categoría, se halló para que la celda C1 se sintetiza con un menor requerimiento energético en comparación con las otras celdas, además, al revisar el inventario de las emisiones generadas de la cuna a la puerta que influyen en la categoría de THNC, se encontró que se emite menos sustancias tóxicas al aire y al agua tales como el arsénico, plomo, mercurio, y zinc en comparación con el hallado en las celdas C2, C3 y C4, excepto en esta última, en las emisiones de zinc al aire, esto también ocurre en el caso de C5; en el cual la celda C1 presenta mayores emisiones de plomo y mercurio al aire, en el agua, el arsénico y el zinc.

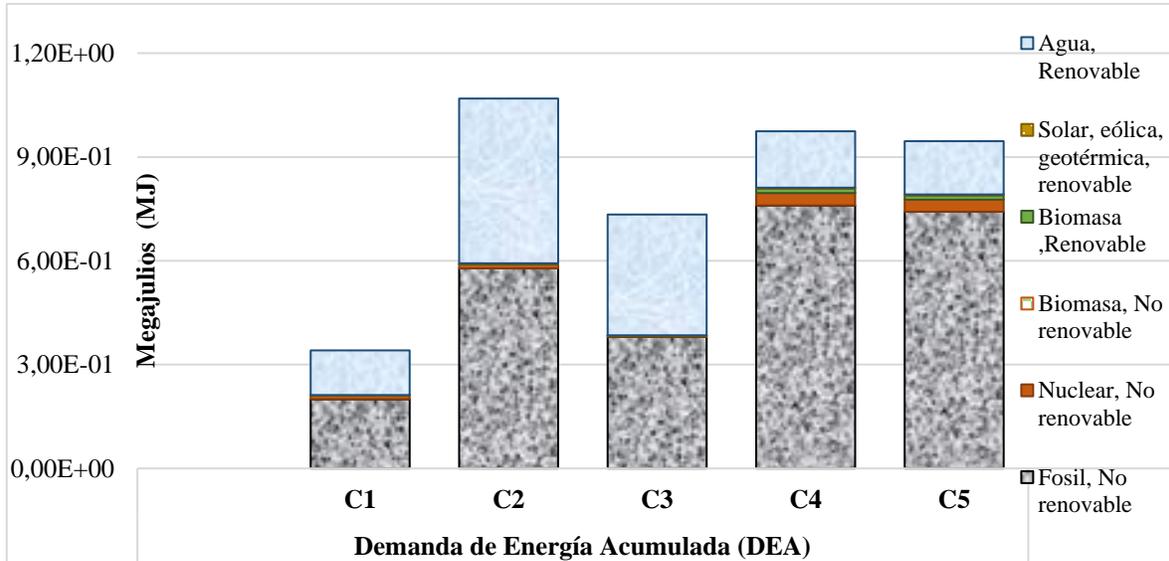
Otro factor relevante que permitió disminuir el impacto que contribuye la capa de perovskita de la celda C1 en la categoría de THNC, con respecto a las demás, es que no utilizó N, N-DiMetilFormamida (DMF), el cual es el solvente más empleado para la deposición de la capa de perovskita, dicho solvente es catalogado como una sustancia altamente tóxica, la cual al estar en contacto con organismos genera problemas en el sistema reproductivo (Vidal et al., 2021).

3.1.4. *Demanda de Energía Acumulada*

El consumo de energía primaria o Demanda de Energía Acumulada (DEA), sirve como un indicador energético de un producto, bien o servicio al representar la energía usada de manera directa e indirecta a través de su ciclo de vida, considerando tanto el uso de la energía renovable como la no renovable (Hischier et al., 2010, p.46). Para este estudio la energía consumida durante la extracción y manufactura de las diferentes CSP evaluadas se presenta en la Figura 7 y en la Tabla S 11 de la información suplementaria.

Figura 7

Demanda de Energía Acumulada o Energía primaria por CSP (MJ/cm²), aplicando la metodología Cumulative Energy Demand versión 1.11, mediante el software SimaPro 9.2.0.2



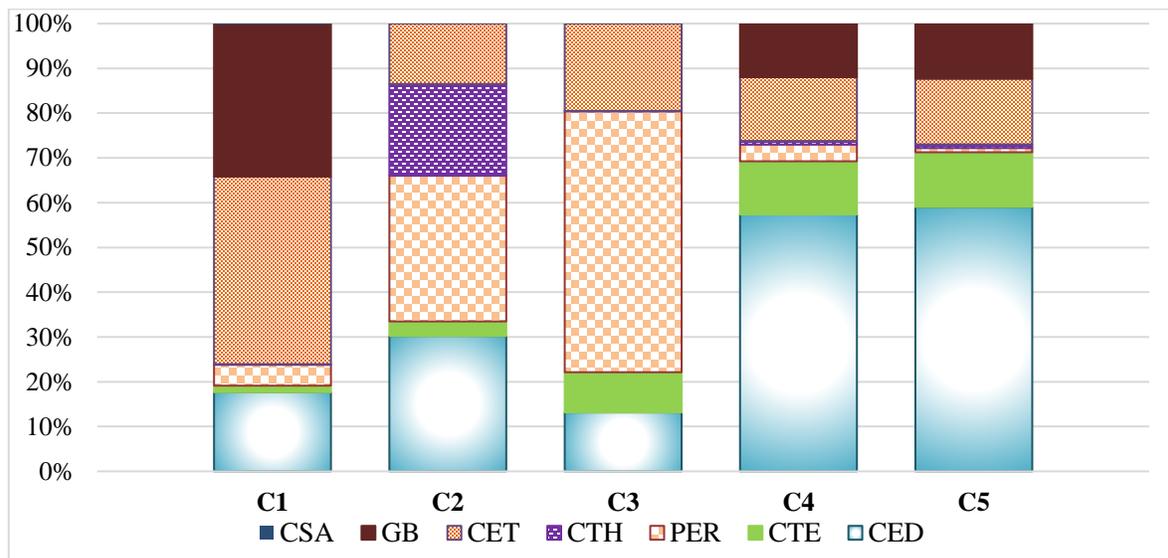
Como se observa en la figura anterior, C1 es la celda que requirió menos energía para la extracción de materiales y manufactura, seguida de las celdas C3, C5, C4 y C2 con valores de $3,41E^{-01}$, $7,34E^{-01}$, $9,46 E^{-01}$, $9,74E^{-01}$ y $1,07$ MJ respectivamente. Cabe resaltar que los resultados reportados de C4 y C5 difieren con los informados por Alberola et al, (2018), los cuales fueron de $0,66 \text{ MJ/cm}^2$ para ambas celdas, siendo menores que los hallados en este estudio, esto se le atribuye a las modificaciones y suposiciones realizadas para la adecuación comparativa entre celdas dado el contexto geográfico, en donde los flujos de producción tomado de Ecoinvent se refirieron solo a procedimientos de fabricación Globales {GLO}, resto del mundo {ROW} y si estaba disponible, Colombiano {CO}, sumado a la actualización de la herramienta SimaPro y metodologías implementadas en el tiempo.

Para todas las celdas la contribución más significativa se dio por el uso de fuentes fósiles no renovables en los diferentes procesos y materiales usados de la cuna a la puerta con un aporte del 58,6%, 54%, 51,8%, 78%, 78,4 % para las celdas C1, C2, C3, C4 y C5 respectivamente. En el caso de las fuentes de energías renovables, agua, la contribución porcentual fue del 37,8; 44,5; 47,6; 16,7 y 16,3 % para la C1, C2, C3, C4 y C5 respectivamente, las demás fuentes contribuyeron con menos del 5,0%.

Teniendo en cuenta las fuentes que contribuyen en la DEA en la fase contemplada de la cuna a la puerta, se presenta en la Figura 8, la DEA de las capas que constituyen la CSP de estudio a partir de estas.

Figura 8

Resultados del consumo de energía primaria por capa que compone las diferentes CSP, aplicando la metodología Cumulative Energy Demand versión 1.11, mediante el software SimaPro 9.2.0.2



Como se puede observar en la Figura 8 y la Tabla S12, la capa que demandó mayor energía primaria en la celda C1, es la CET, la cual se compone de un cátodo de plata. Su demanda es equivalente al 42,0 % del 100 % total de la energía primaria requerida desde la cuna a la puerta, esto difirió con las demás CSP, donde el requerimiento de energía primaria de esta capa contribuyó entre el 14% y 20 % del total. No obstante, se encuentra que la CET de C1 tienen valores similares y/o iguales con respecto al requerido en las celdas C2 y C3.

La CET de las celdas C4 y C5, presentan una DEA igual, al compararse con respecto a la CET de C1, C2 y C3, son un 3,0% menor, los valores hallados de DEA son: 0,143; 0,144; 0,143; 0,139 y 0,139 MJ/cm² para C1, C2, C3, C4 y C5 respectivamente. Esto difiere de los estudios presentados por Zhang et al. (2017), los cuales demostraron que el uso de plata o aluminio requieren menos DEA y causan menos impactos ambientales en comparación cuando se utiliza oro para la CET. Fajarna et al. (2016) indicaron lo mismo, al realizar el ciclo de vida de la cuna a la puerta del proceso de extracción y síntesis del oro y la plata, concluyendo que realizar este proceso con 1 kg de oro y plata requería $8.59E^{-03}$ MJ y $1.47E^{-05}$ MJ. No obstante, Maranghi et al. (2019), demostraría lo contrario al comparar el requerimiento de energía primaria entre las CSP con cátodos de metal de oro, MoOx-Al, C-paste, plata, aluminio y Pt glass por cm², obteniendo que la DEA podría ser mayor cuando se utiliza el cátodo de plata, Pt glass o aluminio en vez del oro, esto se puede generar según los métodos de síntesis que se utilicen para la deposición de la capa, la cantidad de materia y energía usada para la síntesis de la capa, la cual puede variar en ordenes de magnitudes o asemejarse entre celdas con diferentes arquitecturas, aun difiriendo en el material utilizado, por último, las suposiciones tomadas para el cálculo del indicador como lo es la tensión eléctrica tomada para el análisis (baja, media o alta).

Los resultados reportados por los autores, concuerdan con lo hallado en este estudio en donde se tuvo como flujo de entrada de electricidad (bajo voltaje) para C1, C2 y C3 el mismo valor de $2,16E^{-02}$ kWh por cada $1,50E^{-07}$, $1,50E^{-07}$ y $1,27E^{-07}$ kg de cátodo metálico respectivamente, a diferencia de C4 y C5 que tuvo como flujo de entrada de electricidad $7,94E^{-03}$ kWh por cada $1,16E^{-07}$ Kg de Au, el cual es un orden de magnitud más bajo que los demás cátodos y utiliza menos flujo materia de entrada por cm^2 . Estos resultados también se ven influenciados debido a los métodos de fabricación a escala de laboratorio ya que requieren más energía por unidades de área y menor cantidad de materia en comparación con otros métodos de fabricación a gran escala. Cabe aclarar que la cantidad total de energía primaria entre capas varía, por lo cual el porcentaje no es un indicador de que se utilice más o menos entre ellas, sino un indicador de la distribución de esta en las celdas.

Por otro lado, el uso de la GB en la celda C1 aporta el 34 % de la DEA de la celda, mientras que en las celdas C4 y C5 tan solo un 12%, cabe aclarar que el uso de este proceso, se modeló como si fuera independiente a las demás capas, aunque hace parte de los procesos de síntesis de otras capas, tales como: CTH, PER y CTE. A su vez, la GB de la celda C1 tienen el mismo valor de energía y materiales usados que en las celdas C4 y C5, por lo cual, aunque tiene mayor contribución la GB de la celda C1, al compararse con las otras capas, estas presentan el mismo valor de DEA que el reportado por C4 y C5. Con respecto a los resultados, esta contribución alta al usar la GB, se ha documentado en la literatura, García-Valverde et al. (2010) reportó que, al utilizar la GB para tener una atmósfera adecuada para la síntesis de las celdas orgánicas, se hallaba que era el proceso que requería mayor energía primaria, con un valor de $0,077$ MJ/cm², mientras que en nuestro estudio fue de $0,108$ MJ/cm². Otros estudios, demuestran que el uso de este equipo en el proceso de síntesis de baterías, consumen hasta el 29,4% de la energía total necesaria (Liu et al. 2021). En el caso de las celdas C2 y C3, las cuales tienen incorporado este proceso (GB) en la síntesis de las capas, por lo cual no se puede saber con certeza su influencia y la DEA puede variar al distribuir este proceso en las diferentes capas.

En el caso de la CED, las celdas C1 y C3, utilizaron el vidrio recubierto con ITO, el cual ocupó el 18 % y 13 % de la DEA respectivamente. Mientras que las celdas C2, C4 y C5, utilizaron para esta capa, el vidrio recubierto con FTO, el cual demandó un 31% para C2 y 58% en promedio para C4 y C5. Dado los resultados, se establece que el uso de vidrio recubierto con FTO como CED, es el material que tiene mayor demanda de energía primaria en comparación con el ITO para este estudio, esto debido en gran parte al uso de la electricidad en los procesos, la cantidad de vidrio que se utiliza y la demanda que requiere sustancias como el isopropanol, y la acetona. Resultados similares, han sido reportados por Maranghi et al. (2019), quienes armonizaron varios estudios de ciclo de vida de diferentes CSP, determinando que los procesos que más consumen más energía son la preparación el sustrato de vidrio FTO.

La DEA en la capa de perovskita de las cinco celdas evaluadas, fue mayor en las celdas C3, C2 y C4, las cuales tienen en común que utilizan como perovskita el cloruro de plomo de metilamonio (MAPbI_2Cl). En el caso de las celdas C2 y C3, es la capa con mayor contribución de energía primaria para ambas, con un aporte del 33% y 58 % respectivamente, mientras que para la capa de C4 solo aportó el 4%. La DEA en las tres celdas (C3, C2 y C4) se debe principalmente al uso de electricidad para la síntesis de la capa, en segundo lugar, por el uso del nitrógeno líquido, el cual se le atribuye al uso de la GB para el procesamiento de la perovskita. Cabe recalcar que para realizar el inventario de la capa de perovskita de C4 se utilizaron datos de Espinosa et al. (2015).

Para las capas de perovskita de las celdas C1 y C5 compuestas de yoduro de plomo de metilamonio (MAPbI_3), se obtuvo una DEA pequeña en comparación con las anteriores, con una contribución en este indicador menor al 5% del total de la energía primaria requerida. A pesar de que en nuestro estudio, las celdas que utilizaron como perovskita el MAPbI_2Cl , tienen un consumo mayor de energía primaria que el de las celdas que utilizaron MAPbI_3 , no se puede determinar que se deba al material, ya que investigaciones como las desarrolladas por Zhang et al. (2017), calcularon las DEA para 5 clases de capas de perovskita, determinando que la MAPbI_3 tiene mayor demanda de energía para producir 1 cm^2 en comparación con la de MAPbI_2Cl , reportando valores de $5.86\text{E}^{-01} \text{ MJ}$ y $6.30\text{E}^{-02} \text{ MJ}$ respectivamente.

Por último, la capa de perovskita de C2 y C3, tiene incorporado el proceso de la GB para la síntesis del material por lo cual los valores de electricidad son mayores, a diferencia de las celdas C1, C4 y C5 el cual se modela como un proceso independiente a la capa.

En el caso de la CTH, se tiene como resultado que solo en la celda C2, la DEA, fue del 20,0% del total, mientras que para las celdas C1, C3, C4 y C5, están por debajo del 1,0%, esto permite entender que el método de manufactura, variación del flujo y la materia en la síntesis de la capa influyen significativamente, ya que la celda C2, utilizó el mismo material que la CTH de C4 y C5, sin embargo, la celda C2 utilizó más energía para la síntesis de la CTH con un valor de $0,0434 \text{ kWh/cm}^2$ mientras que las celdas C4 y C5 utilizaron tan solo $0,0017 \text{ kWh/cm}^2$. Por último, la CTH de C2 utiliza nitrógeno líquido, el cual se le atribuye al uso de la GB para el procesamiento del material disposición de la capa, demandando más energía que la requerida en C4 y C5, las cuales en su inventario no reportaron el uso de este material o el requerimiento energético para este proceso.

Dichos resultados permitieron determinar que el uso del NiOx como CTH en la celda C1, es el material que demandó menos energía primaria en comparación con otros materiales como el PCBM y la Spiro- MeoTAD, siendo este último material como CTH, el que más demanda energía primaria, concordando con lo reportado en la literatura. Leccisi et al. (2021), realizó el ACV de dos CSP, para el cual planteó utilizar como CTH el NiOx y el CuSCN, en vez de la Spiro – MeoTAD, debido a que tiene un bajo rendimiento en la síntesis. De otro lado Urbina et al. (2020) llegaron a la misma conclusión, ya que al hacer una revisión de los

diferentes materiales y procesos que se pueden utilizar en la CTH, indicaron que hay una necesidad de reemplazar la Spiro – MeoTAD, debido a que su ruta de procesamiento es costoso y muy compleja, ya que contiene sustancias tóxicas y procesos de síntesis de estas que conllevan mayores gastos energéticos, por último, los autores sugieren el uso de otras capas como las de carbono o el uso de nanopartículas NiO.

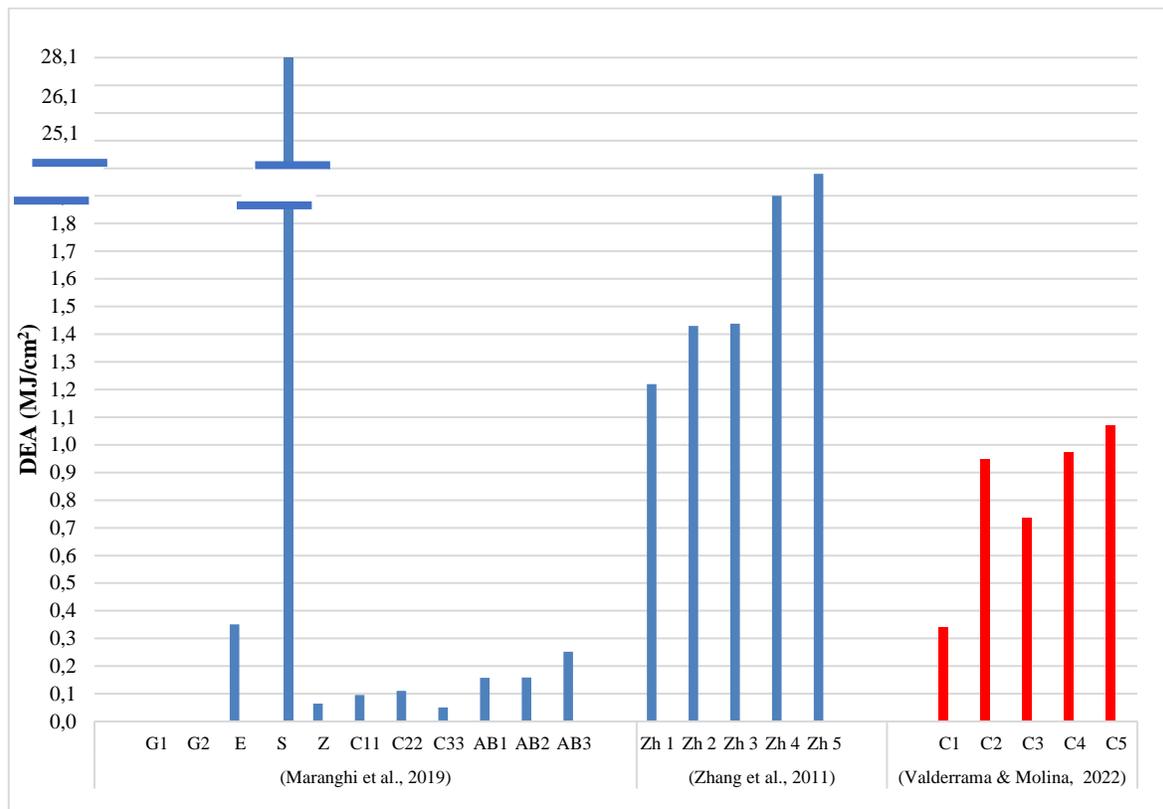
En el caso la DEA en la CTE, solo se presentaron impactos por encima del 5,0% para las celdas C3, C4 y C5 con una contribución porcentual de 9,0; 12,0; y 13,0, del total de la energía primaria requerida respectivamente. Se determinó que el uso del PCBM como CTE en C1, es el material que demanda menos energía primaria en este estudio, en comparación con el TiO₂ y PEDOT: PSS, los cuales fueron usados en las demás celdas como CTE. Aunque C2 utilizó el mismo material (TiO₂) del cual se constituye la CTE de las celdas C4 y C5, la energía de entrada utilizada para la síntesis de la CTE de C2 fue menor, con un valor de $3,5E^{-02}$ MJ/cm², mientras que para las celdas C4 y C5 se requirió $1,2E^{-01}$ MJ/cm² para esta capa, estos valores son altos si se compara con otros estudios, como el de Sarialtin et al. (2020) en el cual reportaron que la DEA de CTE constituido por TiO₂ fue de $2,244E^{-03}$ MJ/cm², al revisar el inventario y los resultados, se concluye que es debido a la mayor demanda de electricidad usada en los procesos de recubrimiento, secado y sinterizado entre otros, los cuales variaron entre la CTE de cada celda evaluada en este estudio y en el cual en C1 fueron menores los requerimientos de electricidad.

Un trabajo realizado por Leccisi & Fthenakis, (2020), demostró igualmente, que al hacer una comparación de las entradas de electricidad (kWh/m²) entre celdas informadas en estudios de ACV de CSP de unión simple, en donde la CTE con TiO₂ fue mayor que cuando se utilizó el PEDOT: PSS. No obstante, en algunos casos el uso de TiO₂ demandó menos energía primaria; de otro lado Gong et al. (2015), reportó un consumo de energía de electricidad directa de 1,64 kWh/m², mientras que Espinosa et al. (2015) indicó que la DEA fue de 99 kWh/m² para la deposición de la CTE, demostrando que los resultados en este indicador dependerán en gran medida del método utilizado para la disposición de la CTE.

Por último, se tomaron los resultados hallados de la DEA y se compararon con otros estudios (ver Figura 9), permitiendo identificar como varían los perfiles ambientales según la demanda primaria de energía.

Figura 9

Comparación de la Demanda Energía Acumulada (DEA) de la cuna a la puerta para diferentes CSP reportados en la literatura vs las CSP evaluadas en este estudio mediante la metodología Cumulative Energy Demand del Software SimaPro 9.2.0.2.



Nota: Valderrama & Molina, (2022) es la presente investigación.

Estudios como el desarrollado por Zhang et al. (2017), calcularon la energía primaria requerida de la cuna a la tumba de CSP, donde detallaron como se distribuía la energía primaria usada en las fases de extracción de la materia prima y manufactura de 1 cm² de cinco tipos de CSP, teniendo como única diferencia entre estas, la capa absorbente de perovskita: CsPbBr₃, MAPbI₂Cl, MASnI_{3-x}Br_x, FAPbI₃, MAPbI₃, reportando valores de DEA de 1,22, 1,43, 1,438, 1,90 y 1,98 MJ respectivamente, siendo valores superiores al reportado para la celda C1 de este estudio. A su vez, dicha comparación arrojó análisis similares al identificar y corroborar que uno de los principales componentes que requieren más energía en las CSP, es el oro, usado como CET en las celdas C4 y C5 y el uso de FTO como CED usado en las celdas C3, C4 y C5.

En el caso de Maranghi et al. (2019), realizaron la armonización de los resultados de los estudios de ACV de CSP que tenían como unidad funcional 1 cm², al evaluar los resultados de la DEA y al compararlos con los reportados por este estudio, se halló que la celda C1, reporta los mayores requerimientos que los calculados por Gong et al. (2015), Zhang et al. (2015), Celik et al. (2016) y Alberola et al. (2018) al ser armonizados bajo las especificaciones establecidas por la investigación de Maranghi et al. (2019), los cuales modificaron el inventario, seleccionando los mismos supuestos en la fase de construcción.

Cabe aclarar que la unidad funcional de Celik et al. (2016) y Gong et al. (2015) era de 1 m^2 , por lo cual, con el fin de armonizar los datos, Maranghi et al. (2019), realizó un escalado lineal en términos de la energía y materia que se requieren para la fabricación de capas con un área menor, en este caso un $(1) \text{ cm}^2$; por lo cual sus resultados, tienen una alta incertidumbre ya que la variación de materia y energía que se requiere para fabricar 1 m^2 de CSP a 1 cm^2 no es lineal.

Por otro lado, las celdas C2, C4 y C5 presentadas en la Figura 9, son las mismas celdas evaluadas por Maranghi et al. (2019), las cuales se etiquetaron como E, AB1 y AB2 respectivamente, de estas se obtuvieron valores de energía primaria más altos en nuestro estudio, esto permitió identificar que la selección de la versión de la herramienta utilizada, la base de datos y el contexto geográfico influyen en los resultados. En el caso de nuestro estudio se consideraron todos los flujos de entrada y salida de materiales y producción promedio ubicados en Colombia y en caso de no tener información, se utilizó los flujos promedios de información Global o del Resto del mundo, a diferencia de Maranghi et al. (2019), el cual consideró todo los flujos en el espacio europeo y tomaba la información secundaria de procedimientos de fabricación específicos europeos, en caso de no que tuvieran acceso a esta información, utilizaron promedios de producción global. A su vez, para las celdas E, AB1 y AB2 la capa de vidrio recubierta de FTO son los mismos para todas las configuraciones en el estudio desarrollado por Maranghi et al. (2019), esto difiere con lo planteado en nuestro estudio, ya que se reportaron flujos diferentes de materia y energía según lo reportado en otros trabajos.

3.2. Evaluación comparativa con otras celdas solares.

Los impactos ambientales generados por la producción de 1 cm^2 de las cinco CSP reportados en la sección 3.1, permitieron hacer un comparativo entre éstas para la fase de la cuna a la puerta. No obstante, el objetivo principal de la energía fotovoltaica teniendo como eje la sostenibilidad energética, es la reducción del impacto total por unidad de electricidad generada. Con el fin de tener mayor claridad de cuáles son los impactos ambientales que puede ocasionar esta tecnología emergente, se comparó con otras celdas solares comerciales de primera generación y de segunda generación, tales como: silicio monocristalino (Mono - Si) y el silicio multicristalino (Multi - Si), Silicio amorfo (a - Si), telurio de cadmio (CdTe) y Cobre-Seleniuro-Indio (CSI) y de tercera generación tales como: celda solar sensibilizada por colorante (DSCC) y otras CSP, teniendo como comparativo las emisiones de GEI en la producción de 1 kWh . Como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2

Evaluación comparativa de las GEI con otras celdas solares de primera, segunda y tercera generación.

Referencia	Tipo de celda solar	Nomenclatura	Emisiones de GEI (g CO ₂ -eq/ kWh)
(Valderrama & Molina, 2022)	CSP	C1	158,67
		C2	526,21
		C3	459,50
		C4	819,35
		C5	937,98
(Peng et al. 2013)	Mono – Si	P1	29 - 45
	Multi - Si	P2	23 - 44
	a – Si	P3	18 - 50
	CdTe	P4	14 - 35
(Ludin et al. 2018)	Mono – Si	L1	29 - 671
	Multi - Si	L2	12.1 - 569
	a - Si	L3	8,1 - 57
	CdTe	L4	8,9 - 66
	CIS	L5	33 - 95
	DSSC	L6	9,8 - 35
	CSP	L7	56,65 – 497,2
(Wu et al. 2017)	Multi - Si	W1	12 – 60
(Zhang et al. 2017)	CSP	Z1	18,7 - 5867
		Z2	2553 - 6466

A partir de los resultados presentados en la Tabla 2 y al comparar con otros trabajos, se determinó que las emisiones de GEI de la cuna a la puerta, liberadas en la producción de 1 kWh de electricidad de las CSP de este estudio, son mayores en casi todos de los casos que las emitidas por otras celdas solares, siendo la celda C1 de este estudio, la celda con la emisión más baja. Estos resultados se deben en gran parte a que la fabricación de las CSP de estudio se realizó a escala de laboratorio, por lo cual el consumo energético no es muy eficiente a diferencia del que utilizaron las celdas comerciales de primera y segunda generación. Cabe resaltar, que la mayoría de estudios seleccionados de celdas solares de primera y segunda generación, comprendía además de las etapas de obtención de materia, suministro de energía y fabricación de la celda, el sistema de montaje, los cables, los inversores y todos los demás componentes necesarios para producir electricidad, el cual se denomina por su sigla en inglés como BOS. A su vez, cuantificaron lo emitido por el transporte, la construcción e instalación, incluyendo los cimientos y la estructura de soporte, fases que no se tuvieron en cuenta en nuestro estudio (Ludin et al., 2018; Peng et al., 2013; Wu et al., 2017), demostrando así que aún se debe disminuir significativamente las emisiones de GEI de las CSP de este estudio, ya que aun considerando el BOS en las celdas de primera y segunda generación y comparando con respecto a las CSP, siguen siendo más bajas las emisiones de GEI, teniendo en cuenta que estas etapas no fueron incorporadas en las evaluaciones ambientales de las CSP, las cuales pueden tener una participación considerable en el impacto ambiental (Ramamurthy Rao et al., 2021), por lo cual las CSP de este estudio

podrían estar subestimando los impactos ambientales asociados a los GEI y en específico en la categoría de calentamiento global.

Al revisar los valores informados en las revisiones presentadas en la Tabla 2, la tasa de emisión de GEI por kWh producido, varía significativamente de un estudio a otro, debido a la variación de factores, tales como los procesos y tecnologías de fabricación, año de fabricación, sistema de montaje y ubicación de instalación, irradiación de la zona, combinación energética de cada país para el suministro, vida útil de las tecnologías fotovoltaicas y métodos de estimación.

Por último, al evaluar las emisiones de GEI de la CSP se determinaron que la vida útil (LT) conocido por su sigla en inglés de la expresión Life Technology, la irradiación, la relación de calidad (PR) conocido por su sigla en inglés de la expresión Performance Ratio y la eficiencia de las celdas son claves en el aumento o disminución de las emisiones de GEI, lo cual se presentó también en otros estudios como el de Espinosa et al. (2011), los cuales reportaron que la emisión de GEI de un módulo de CSP, asumiendo un área activa del 67%, irradiación de 1700 kWh/m²/año, eficiencia del módulo del 2,0%, PR de 0,80 y una vida útil de 15 años, era de 56,65 g CO_{2-eq}/kWh, al variar su eficiencia a 3,0 % la emisión disminuyó a 37,77 g CO_{2-eq}/kWh. Por otro lado Celik et al. (2016) indicaron que las emisiones de desde la cuna hasta la puerta de dos dispositivos eran de 100 a 150 g CO_{2-eq}/kWh, modelado con una eficiencia del módulo del 15,0 %, PR de 0,75, vida útil de 15 años y 65% de superficie activa bajo irradiación solar de 1700 kWh/m²/año. Ramamurthy Rao et al. (2021) reportaron las emisiones de GEI teniendo en cuenta un ciclo de vida de la cuna a la tumba y el sistema BOS, era de 181 g CO_{2-eq}/kWh, teniendo en cuenta un PR de 0,85, vida útil de 3 años, eficiencia del módulo del 18,0 % e irradiación de 1513.5 kWh/m²/año.

Esta variación en los resultados demuestra la importancia de evaluar las CSP bajo condiciones locales donde se manufacture. Teniendo en cuenta las características para extracción de materia prima y fabricación de la celda en un país como Colombia. En este estudio se determinó que son mayores los impactos ambientales ocasionados en estas fases a diferencia de los que se generan en otros lugares (países) donde se han fabricado las CSP tomadas para comparación en este estudio y que se modificaron bajo condiciones locales (C2, C3, C4 y C5).

Así mismo, otros estudios han demostrado esto también, indicando que hay variación en el impacto según la zona geográfica, como es el caso de Leccisi et al. (2016), en el cual indicaron que las emisiones de GEI son generalmente más bajas cuando la fabricación de las celdas fotovoltaicas, tienen lugar en Europa en comparación con los EE. UU. y China, esto concuerda con lo informado por Miller, (2019), donde indicó que la ubicación geográfica modifica el aumento o disminución de las emisiones de GEI, al indicar que la fabricación china de módulos mc-Si emite aproximadamente un 25 % más de GEI que la fabricación europea, lo cual se puede asociar para otras tecnologías o generaciones. Debido a los pocos

estudios realizado en América latina aún no se puede determinar qué efecto genera modificar la zona de estudio en esta región en comparación con otras.

3.3. Análisis de sensibilidad

Considerando que este estudio de ACV, calculó el impacto ambiental a partir de la unidad funcional de generación eléctrica (1 kWh) reportado en la sección 3.2, mediante la conversión y escalonamiento de las variables: vida útil, eficiencia, irradiación, relación del rendimiento y el área de la CSP, parámetros que afectan de manera directa e indirecta en los resultados de las categorías de impacto ambiental evaluadas. Dado esta influencia, se planteó evaluar la variabilidad de los impactos ambientales al modificar la variable vida útil, sin modificar las demás (ver Tabla S1).

La selección de la variable vida útil se debe a que es la más influyente, puesto que repercute en la eficiencia de conversión y la relación del rendimiento, lo cual lo vuelve un determinante para que esta tecnología se utilice de manera comercial, ya que aún es incierto el valor de la vida útil a la cual puede llegar (Goetz et al., 2021; Thankappan & Thomas, 2018). A su vez, se estableció un comparativo con respecto a las celdas solares comerciales, al modelarse con una vida útil entre 1 a 20 años. Se tiene como ejemplo algunas investigaciones, las cuales han reportado la influencia de variar la vida útil en los resultados de impactos ambientales como Espinosa et al. (2015) los cuales realizaron un análisis de sensibilidad para un rango de vida útil entre 1 a 15 años para dos CSP, reportando con 1 año de vida útil en la categoría de cambio climático valores de 5.48 y 5.24 kg CO₂-eq/kWh, con una disminución al aumentar la vida útil a 15 años de 0.37 y 0.35 kg CO₂-eq/kWh respectivamente. Ibn-Mohammed et al. (2017) presentaron un análisis de sensibilidad de dos módulos de CSP con diferentes métodos de deposición, estableciendo un rango de vida útil entre 1 a 20 años, dando como resultado que las emisiones de GEI para un año estuvieron entre 200 y 285 g CO₂-eq/kWh, mientras que para 20 años eran menores a 25 g CO₂-eq/kWh para ambas celdas. Del mismo modo, Ramamurthy Rao et al. (2021) realizaron un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros a los que son sensibles las emisiones de GEI en una CSP, hallando que la vida útil de las celdas es el parámetro más sensible, ya que al aumentar la vida útil en la CSP de estudio, se disminuyó exponencialmente el impacto, concluyendo que para una vida útil 2 y 5 años se emitió en promedio 300 y 122 gCO₂-eq/kWh respectivamente.

En el caso de esta investigación, los resultados de sensibilidad se presentan en la Tabla 3, los cuales demostraron que los impactos ambientales más significativos presentados en la figura 5 y 6, son sensibles a la variación en la vida útil. Cuando este parámetro aumenta, se demostró que disminuye la cantidad de emisiones de GEI, THC y THNC por kWh producido durante su ciclo de vida, a causa de que se requiere la misma cantidad de materiales y energía para una generación eléctrica más prolongada, lo cual mejora su eficiencia y evita las emisiones contaminantes y gastos energéticos de su fabricación. Cabe resaltar que se deben verificar

otros parámetros como la radiación, PR y la eficiencia del panel. En general la celda C1 presenta los valores más bajos de emisiones de GEI, los cuales son iguales o menores a los reportados para las celdas solares comerciales como se observa en la Tabla 3, con valores de 79.34 y 52.89 gCO₂-eq/kWh cuando se tiene una vida útil de 10 a 15 años respectivamente. Con respecto a las categorías de impacto ambiental THNC y THC, la disminución en promedio es de un 50,0 % para las CSP con una vida útil de 10 años en la mayoría de los casos. Cuando se modela con una vida útil de 15 años, la disminución en promedio es de un 66,0 %, lo cual demuestra la importancia de aumentar la vida útil en las CSP en la disminución de los impactos ambientales.

Tabla 3

Análisis de sensibilidad para la categoría de impacto ambiental Cambio Climático (CC); Toxicidad Humana No Cancerígena y Cancerígena (THNC; THC), al utilizar como unidad funcional la producción de 1 kWh con una vida útil de 5,10 y 15 años.

Celda	Años	Categoría de impacto ambiental		
		CC (CO ₂ -eq/kWh)	THNC (CTUh/kWh)	THC (CTUh/kWh)
C1	5	158,67	3,20E ⁻⁰⁵	6.33E ⁻⁰⁶
	10	79,34	1,60E ⁻⁰⁵	3.16E ⁻⁰⁶
	15	52,89	1,07E ⁻⁰⁵	2.11E ⁻⁰⁶
C2	5	526,21	1,06E ⁻⁰⁴	2.21E ⁻⁰⁵
	10	263,10	5,32E ⁻⁰⁵	1.10E ⁻⁰⁵
	15	175,40	3,55E ⁻⁰⁵	7.36E ⁻⁰⁶
C3	5	459,50	9,14E ⁻⁰⁵	2.07E ⁻⁰⁵
	10	229,75	4,57E ⁻⁰⁵	1.03E ⁻⁰⁵
	15	153,17	3,05E ⁻⁰⁵	6.90E ⁻⁰⁶
C4	5	819,35	6,14E ⁻⁰⁴	3.28E ⁻⁰⁵
	10	409,68	3,07E ⁻⁰⁴	1.64E ⁻⁰⁵
	15	273,12	2,05E ⁻⁰⁴	1.09E ⁻⁰⁵
C5	5	937,98	7,17E ⁻⁰⁴	3.74E ⁻⁰⁵
	10	468,99	3,59E ⁻⁰⁴	1.87E ⁻⁰⁵
	15	312,66	2,39E ⁻⁰⁴	1.25E ⁻⁰⁵

4. CONCLUSIONES.

Teniendo en cuenta los resultados hallados, se concluye que la celda solar de perovskita desarrollada por Ramírez et al. (2019) denominada como C1, presentó los menores impactos ambientales evaluados en las fases de la cuna a la puerta de su ciclo de vida, al compararse con las arquitecturas de CSP desarrolladas en otras investigaciones denominadas como C2, C3, C4 y C5, las cuales se buscaron modelar bajo condiciones locales, considerando que los flujos de entrada y salida de la energía y la materia usada en las diferentes fases se realizaban en Colombia o en su defecto se establecían valores promedios mundiales y no específicos, teniendo como unidad funcional 1 cm^2 .

Los menores impactos ambientales hallados en la celda C1 en comparación con las celdas C2, C3, C4 y C5, se deben principalmente a la menor demanda de energía que se utiliza para la síntesis de las capas que la constituyen, seguido de una disminución en la cantidad del material y sustancias químicas tales como: plata, aluminio, acetona, vidrio, etanol e isopropanol entre otras, en especial por la no utilización de metales como el oro. Siendo estos materiales mencionados anteriormente, los que influyen mayormente en las categorías de ecotoxicidad de agua dulce, toxicidad humana cancerígena y no cancerígena y agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables.

Al comparar los impactos ambientales que generan las capas que constituyen las cinco celdas solares, se determina que la CET, es la que genera mayor impacto, principalmente cuando se utiliza el oro como cátodo de electrodo para esta capa, a diferencia de cuando se utiliza plata y aluminio, esto se asocia a los procesos y sustancias que se utilizan en la extracción y manufactura de estos metales, en donde el metal oro requiere mayor energía y utiliza mayor cantidad de sustancias contaminantes, siendo el principal contribuyente en cantidad de sustancias tóxicas emitidas por unidad funcional establecida.

Por otro lado, se determinó que el uso de plomo en las capas de perovskita de las cinco celdas evaluadas genera un impacto ambiental muy bajo e insignificante en las categorías evaluadas, en cambio, se encontró que sustancias como el nitrógeno líquido utilizado para la síntesis de esta capa, mediante la Glove Box (GB) tiene mayor influencia.

El cálculo de la demanda de la energía acumulada como indicador energético, permitió establecer que las capas que requieren mayor energía primaria son las CED, siendo mayor cuando se utiliza FTO que cuando se utiliza ITO, seguido de la CET, donde el cátodo de oro requiere más energía que la plata y el aluminio respectivamente. Por otro lado, se halla que la capa que demanda menos energía primaria en promedio de las cinco celdas es CTH. En el caso de la celda C1, la capa que requiere mayor demanda es la CET debido al uso de la plata como cátodo de electrodo. El cálculo de este indicador energético, nos permitió además concluir que las consideraciones tomadas y la zona geográfica influyen de manera significativa en los valores hallados, dando como resultado que se requiere mayor cantidad de energía por cm^2 bajo un contexto colombiano, que los reportados por los estudios tomados para comparar, los cuales fueron evaluados en otros países.

Para este estudio, además de comparar y establecer cuál de las cinco celdas genera mayor o menor impacto ambiental, los resultados permitieron establecer, que, aunque la celda C1 genera los menores impactos, se podrían reducir aún más, mediante la modificación del cátodo de electrodo de plata por aluminio, el cual se utiliza en la CET. Dicho material (Al) generó un 6 % menos de impactos en las categorías EA, THC y THNC cuando se comparó vs la plata. Cabe resaltar que el uso de cátodo de oro generó los mayores impactos ambientales y no es competitivo ambientalmente en general para cualquier celda según lo hallado y reportado en la literatura.

Del mismo modo, se pueden reducir los impactos con la correcta selección de la CED, lo cual va depender en gran parte a la cantidad de energía y materiales de soporte que requiera para la disposición de la capa con la sustancia con la cual se reviste (FTO ó ITO), ya que, aunque el ITO puede ser más contaminante como se reporta en la literatura, el FTO puede superarlo en caso de que se utilice una mayor cantidad de vidrio y demanda de energía según la arquitectura de la celda y lo hallado en este estudio.

En el caso de la capa de perovskita se observó que su impacto podría disminuirse sí y solo sí, se disminuye el uso del nitrógeno líquido y el requerimiento energético, lo cual en síntesis se le atribuye al uso de la Globe Box (GB), unidad donde se procesa la perovskita. Para el caso del plomo que contiene la perovskita, su impacto es mínimo y se deben centrar los esfuerzos en reducir los impactos ambientales que generan el uso de los solventes tóxicos como el N, N-DiMetilFormamida y las sustancias que contenga una alta cantidad de zinc, arsénico y mercurio, lo cual se puede realizar mediante la reducción de estas o la encapsulación correcta, estabilización y disposición correcta. Así mismo, la CTH de la C1, podría disminuir su impacto, si se reduce el uso del agua desionizada cuando se realiza el método de precipitación química para la producción del NiO_x.

Finalmente, se pueden reducir los impactos ambientales de la celda C1, si se utiliza un método de fabricación más sostenible ambientalmente, teniendo en cuenta que el usado (revestimiento por rotación o *spin-coating*) es el más contaminante de todos, debido a que el 90 % del material usado se desperdicia en la elaboración. Se podría plantear evaluar el ACV de esta celda usando diferentes técnicas de fabricación más eficientes tales como: método de deposición por inmersión o *dip-coating*, recubrimiento de la hoja o *Blade coating*, impresión de rollo a rollo o *roll to roll* y revestimiento por pulverización o *spray-coating* entre otros.

Por otro lado, al realizar la evaluación comparativa de GEI en términos de gCO_{2-eq}/ kWh entre las celdas C1, C2, C3, C4 y C5 y los resultados presentados en otras investigaciones de celdas solares de primera, segunda y tercera generación, en las cuales tenían diferentes consideraciones (ubicación geográfica, irradiación, vida útil, eficiencia, tecnología usada para la síntesis y fuentes de energía para la producción entre otros). Se determinó que las emisiones de C1, C2, C3, C4 y C5 de GEI, aún siguen siendo muy altas si se compara con

una tecnología comercial, concluyendo que este resultado se debe en gran parte a la corta vida útil y al consumo energético usado en la fabricación, el cual no es muy eficiente a diferencia del utilizado a escalas comerciales. No obstante, la celda C1, es la celda con la emisión más baja de las evaluadas de nuestro estudio, esto se ve influenciado por la eficiencia de la celda. Se determina que, si se aumenta su vida útil por encima de los 10 años, se disminuyen los impactos en la categoría de cambio climático a valores de emisiones de celdas solares comerciales y se reduce su impacto en categoría de impacto ambiental tales como THNC y THC en un 50 %.

Al analizar los resultados de la evaluación comparativa presentados en la tabla 2, se deduce que se podría dar lugar a que se esté subestimando los impactos ambientales de la celda C1, C2, C3, C4 y C5, ya que no se están considerando fases que sí se modelan en los estudios con los cuales se comparan y los cuales reportan en algunos casos menores emisiones. A su vez, la herramienta (software de ACV) seleccionada y metodología de evaluación de impacto ambiental implementada están expuestas actualizaciones anuales, lo cual influye en los resultados.

Por último, este estudio brinda un acercamiento sobre el ACV de CSP y permite ver un primer panorama de los impactos ambientales que puede ocasionar la fabricación de una celda solar de perovskita a escala de laboratorio en Colombia, a su vez permitió identificar cuales procesos y materiales utilizados en las capas que componen las celdas generan mayor o menor impacto, a partir de lo cual, en futuras investigaciones puede lograrse una reducción de estos, bajo el reemplazo de materiales o métodos de disposición ya identificados, lo cual podría posibilitar que las CSP sean más competitivas ambientalmente, además de técnica y económicamente. Todo esto, mediante la realización de un inventario detallado y el uso de las bases de datos y metodologías de impacto ambiental más avanzadas disponibles en el momento y la disminución de las incertidumbres y limitaciones metodológicas halladas, las cuales se pueden abordar a medida que se avance en el conocimiento del ciclo de vida de esta tecnología, tales como el acceso a información sobre la síntesis de sustancias químicas, el mejoramiento de las herramientas de medición de las entradas y salidas en los diferentes procesos y la adhesión de fases no evaluadas en el ciclo de vida, contemplando diferentes escenarios.

5. INFORMACIÓN DE SOPORTE.

El material complementario de esta tesis se encuentra al final de este documento y en el documento formato Excel titulado Información Suplementaria Tesis.

REFERENCIAS

Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR].(2022). Toxicological Profiles.

<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiledocs/index.html>

- Agobi, A. U., Hitler, L., Ahmed, S., Funmilayoe, O. O., Zafar, S.-U., Hamzatf, A. T., Amusan, O. O., Pigweh, A. I., Akakuru, O. U., & Adeleye, A. T. (2019). Perovskite photovoltaic nanostructured materials: device architectural design, challenges and recent progress. *Asian Journal of Green Chemistry*, 3(2), 153–168. <https://doi.org/10.22034/ajgc.2018.140157.1081>
- Alberola-Borràs, J. A., Vidal, R., Juárez-Pérez, E. J., Mas-Marzá, E., Guerrero, A., & Mora-Seró, I. (2018). Relative impacts of methylammonium lead triiodide perovskite solar cells based on life cycle assessment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 179(November 2017), 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.11.008>
- Amponsah, N. Y., Troldborg, M., Kington, B., Aalders, I., & Hough, R. L. (2014). Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 461–475. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.087>
- Anyimah-Ackah, E., Ofosu, I. W., Lutterodt, H. E., & Darko, G. (2022). Exposures and Health Risks Associated with Elements in Diets from a Gold Mining Area. *Biological Trace Element Research*, 200(4), 1518-1530. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02777-0>
- Arumugam, G. M., Karunakaran, S. K., Liu, C., Zhang, C., Guo, F., Wu, S., & Mai, Y. (2021). Inorganic hole transport layers in inverted perovskite solar cells: A review. *Nano Select*, 2(6), 1081–1116. <https://doi.org/10.1002/nano.202000200>
- Asdrubali, F., Baldinelli, G., D'Alessandro, F., & Scrucca, F. (2015). Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1113–1122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.082>
- Assi, A. A., Saleh, W. R., & Mohajerani, E. (2021). Effect of Metals (Au, Ag, and Ni) as Cathode Electrode on Perovskite Solar Cells. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 722(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/722/1/012019>
- Babayigit, A., Ethirajan, A., Muller, M., & Conings, B. (2016). Toxicity of organometal halide perovskite solar cells. *Nature Materials*, 15(3), 247–251. <https://doi.org/10.1038/nmat4572>
- Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in pharmacology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>

- Binek, A., Petrus, M. L., Huber, N., Bristow, H., Hu, Y., Bein, T., & Docampo, P. (2016). Recycling Perovskite Solar Cells to Avoid Lead Waste. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(20), 12881–12886. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b03767>
- Bustos Garnica, K. Y., Cardona, R., Landínez Téllez, D. A., Parra Vargas, C. A., & Roa-Rojas, J. (2018). Crystallographic, morphologic, electric, optical and magnetic analysis of the Dy₂BiFeO₆ novel material. *Ciencia en Desarrollo*, 9(1), 51-61. Retrieved October 14, 2022, from <https://acortar.link/3zL6k1>
- Celik, I., Song, Z., Cimaroli, A. J., Yan, Y., Heben, M. J., & Apul, D. (2016). Life Cycle Assessment (LCA) of perovskite PV cells projected from lab to fab. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.037>
- Chen, L., Wang, J., Guo, X., Wu, H., He, H., & Fang, L. (2022). Pollution characteristics and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around China's gold mines: a meta-analysis. *Environmental Geochemistry and Health*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01175-8>
- Chen, M., Ogunseitan, O. A., Wang, J., Cheekvn, H., Wang, B., & Chen, S. (2016). Evolution of electronic waste toxicity: Trends in innovation and regulation. *Environment International*, 89–90, 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.01.022>
- Chi, D., Huang, S., Zhang, M., Mu, S., Zhao, Y., Chen, Y., & You, J. (2018). Composition and Interface Engineering for Efficient and Thermally Stable Pb–Sn Mixed Low-Bandgap Perovskite Solar Cells. *Advanced Functional Materials*, 28(51), 2–7. <https://doi.org/10.1002/adfm.201804603>
- Ciro, J., Ramírez, D., Mejía Escobar, M. A., Montoya, J. F., Mesa, S., Betancur, R., & Jaramillo, F. (2017). Self-Functionalization behind a Solution-Processed NiO_x Film Used As Hole Transporting Layer for Efficient Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(14), 12348–12354. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b15975>
- Detnatthawut, D., & Varabuntoonvit, V. (2022). Life Cycle Assessment: Case Study of Perovskite Solar Cells [Doctoral dissertation, Kasetsart University]. DSpace JSPUI.
- Djurišić, A. B., Liu, F. Z., Tam, H. W., Wong, M. K., Ng, A., Surya, C., Chen, W., & He, Z. B. (2017). Perovskite solar cells - An overview of critical issues. *Progress in Quantum Electronics*, 53(June), 1–37. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2017.05.002>
- Dong, X., Fang, X., Lv, M., Lin, B., Zhang, S., Ding, J., & Yuan, N. (2015). Improvement of the humidity stability of organic-inorganic perovskite solar cells using ultrathin Al₂O₃ layers prepared by atomic layer deposition. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(10), 5360–5367. <https://doi.org/10.1039/c4ta06128d>

- Ekvall, T., Azapagic, A., Finnveden, G., Rydberg, T., Weidema, B. P., & Zamagni, A. (2016). Attributional and consequential LCA in the ILCD handbook. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(3), 293–296. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-1026-0>
- Ecoinvent (4 de enero de 2023). System Models. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/>
- Espinosa, N., García-Valverde, R., Urbina, A., & Krebs, F. C. (2011). A life cycle analysis of polymer solar cell modules prepared using roll-to-roll methods under ambient conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(5), 1293–1302. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.08.020>
- Espinosa, N., Serrano-Luján, L., Urbina, A., & Krebs, F. C. (2015). Solution and vapour deposited lead perovskite solar cells: Ecotoxicity from a life cycle assessment perspective. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 137, 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.02.013>
- Falanga, A., Siciliano, A., Vitiello, M., Franci, G., Del Genio, V., Galdiero, S., Guida, M., Carraturo, F., Fahmi, A., & Galdiero, E. (2020). Ecotoxicity evaluation of pristine and indolicidin-coated silver nanoparticles in aquatic and terrestrial ecosystem. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 8097–8108. <https://doi.org/10.2147/IJN.S260396>
- Farjana, S. H., Huda, N., & Mahmud, M. A. P. (2019). Life cycle analysis of copper-gold-lead-silver-zinc beneficiation process. *Science of the Total Environment*, 659, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.318>
- Ferreira, A., Kunh, S. S., Fagnani, K. C., De Souza, T. A., Tonezer, C., Dos Santos, G. R., & Coimbra-Araújo, C. H. (2018). Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(June 2017), 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>
- Friedrich, J., Ge, M., & Pickens, A. (2020). This Interactive Chart Shows Changes in the World's Top 10 Emitters. <https://www.wri.org/insights/interactive-chart-shows-changes-worlds-top-10-emitters4>
- Frischknecht, Rolf; Stolz, Philippe; Krebs, Luana; de Wild-Scholten, Mariska; Sinha, P. (2020). *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems 2020 Task 12 PV Sustainability*
- Frischknecht, R., Heath, G., Raugei, M., Sinha, P., & de Wild-Scholten, M. (2016). *Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity*. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States)

- Fthenakis, V., Frischknecht, R., Raugei, M., Kim, H. C., Alsema, E., Held, M., & de Wild-Scholten, M. (2011). Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity. Task, 12. International Energy Agency Photovoltaic Power systems Programme
- García-Valverde, R., Cherni, J. A., & Urbina, A. (2010). Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18(7), 535–558. <https://doi.org/10.1002/pip.967>
- Ghosh, S., & Yadav, R. (2021). Future of photovoltaic technologies: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47(February 2020), 101410. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101410>
- Glogic, E. (2020). Towards sustainable energy materials: broadening life cycle assessment for emerging technology development and resource-effective choices. UWSpace. <http://hdl.handle.net/10012/15687>
- Goetz, K. P., Taylor, A. D., Hofstetter, Y. J., & Vaynzof, Y. (2021). Sustainability in Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 13(1), 1–17. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c17269>
- Gong, J., Darling, S. B., & You, F. (2015). Perovskite photovoltaics: Life-cycle assessment of energy and environmental impacts. *Energy and Environmental Science*, 8(7), 1953–1968. <https://doi.org/10.1039/c5ee00615e>
- Guerrero, N. B. C., Martínez, W. O. H., Civit, B., & Perez, M. D. (2021). Energy performance of perovskite solar cell fabrication in Argentina. A life cycle assessment approach. *Solar Energy*, 230, 645-653. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.071>
- Haider, S. Z., Anwar, H., Manzoor, S., Ismail, A. G., & Wang, M. (2020). A theoretical study for high-performance inverted pin architecture perovskite solar cells with cuprous iodide as hole transport material. *Current Applied Physics*, 20(9), 1080–1089. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2020.06.022>
- Hailegnaw, B., Kirmayer, S., Edri, E., Hodes, G., & Cahen, D. (2015). Rain on methylammonium lead iodide based perovskites: Possible environmental effects of perovskite solar cells. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 6(9), 1543–1547. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.5b00504>
- Hauck, M., Ligthart, T., Schaap, M., Boukris, E., & Brouwer, D. (2017). Environmental benefits of reduced electricity use exceed impacts from lead use for perovskite based tandem solar cell. *Renewable Energy*, 111, 906–913. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.044>

- Hischier R., Weidema B., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Frischknecht R., Hellweg S., Humbert S., Jungbluth N., Köllner T., Loerincik Y., Margni M. and Nemecek T. (2010) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods.ecoinvent report No. 3, v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf
- Hussain, I., Tran, H. P., Jaksik, J., Moore, J., Islam, N., & Uddin, M. J. (2018). Functional materials, device architecture, and flexibility of perovskite solar cell. *Emergent Materials*, 1(3–4), 133–154. <https://doi.org/10.1007/s42247-018-0013-1>
- Ibn-Mohammed, T., Koh, S. C. L., Reaney, I. M., Acquaye, A., Schileo, G., Mustapha, K. B., & Greenough, R. (2017). Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(November 2015), 1321–1344. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.095>
- Inglesi-Lotz, R., & Dogan, E. (2018). The role of renewable versus non-renewable energy to the level of CO2 emissions a panel analysis of sub-Saharan Africa's Big 10 electricity generators. *Renewable Energy*, 123, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.041>
- International Energy Agency [IEA]. (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. In International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- Itten, R., & Stucki, M. (2017). Highly efficient 3rd generation multi-junction solar cells using silicon heterojunction and perovskite tandem: Prospective life cycle environmental impacts. *Energies*, 10(7), 841. <https://doi.org/10.3390/en10070841>
- Jiang, F., Choy, W. C. H., Li, X., Zhang, D., & Cheng, J. (2015). Post-treatment-free solution-processed non-stoichiometric NiOx nanoparticles for efficient hole-transport layers of organic optoelectronic devices. *Advanced Materials*, 27(18), 2930–2937. <https://doi.org/10.1002/adma.201405391>
- Jin, J., Yang, M., Deng, W., Xin, J., Tai, Q., Qian, J., Dong, B., Li, W., Wang, J., & Li, J. (2021). Highly efficient and stable carbon-based perovskite solar cells with the polymer hole transport layer. *Solar Energy*, 220(February), 491–497. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.081>
- Jokar, E., Chien, C. H., Tsai, C. M., Fathi, A., & Diau, E. W. G. (2019). Robust Tin-Based Perovskite Solar Cells with Hybrid Organic Cations to Attain Efficiency Approaching 10%. *Advanced Materials*, 31(2), 1–7. <https://doi.org/10.1002/adma.201804835>
- Kadro, J. M., & Hagfeldt, A. (2017). The End-of-Life of Perovskite PV. *Joule*, 1(1), 29–46.

<https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.013>

- Khalifa, S. A., Spatari, S., Fafarman, A. T., & Baxter, J. B. (2020). Environmental Sustainability of Mixed Cation Perovskite Materials in Photovoltaics Manufacturing. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(44), 16537–16548. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05619>
- Kim, D. H., Whitaker, J. B., Li, Z., van Hest, M. F. A. M., & Zhu, K. (2018). Outlook and Challenges of Perovskite Solar Cells toward Terawatt-Scale Photovoltaic Module Technology. *Joule*, 2(8), 1437–1451. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.011>
- Krebs-Moberg, M., Pitz, M., Dorsette, T. L., & Gheewala, S. H. (2021). Third generation of photovoltaic panels: A life cycle assessment. *Renewable Energy*, 164, 556-565. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.054>
- Kolesnikov, S. I., Tsepina, N. I., Sudina, L. V., Minnikova, T. V., Kazeev, K. S., & Akimenko, Y. V. (2020). Silver Ecotoxicity Estimation by the Soil State Biological Indicators. *Applied and Environmental Soil Science*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1207210>
- Leccisi, E., & Fthenakis, V. (2020). Life-cycle environmental impacts of single-junction and tandem perovskite PVs: a critical review and future perspectives. *Progress in Energy*, 2(3), 032002. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab7e84>
- Leccisi, E., & Fthenakis, V. (2021). Life cycle energy demand and carbon emissions of scalable single-junction and tandem perovskite PV. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(10), 1078–1092. <https://doi.org/10.1002/pip.3442>
- Leccisi, E., Raugei, M., & Fthenakis, V. (2016). The energy and environmental performance of ground-mounted photovoltaic systems - A timely update. *Energies*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/en9080622>
- Lee, J. W., Dai, Z., Han, T. H., Choi, C., Chang, S. Y., Lee, S. J., De Marco, N., Zhao, H., Sun, P., Huang, Y., & Yang, Y. (2018). 2D perovskite stabilized phase-pure formamidinium perovskite solar cells. *Nature Communications*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05454-4>
- Lemercier, T., Perrin, L., Berson, S., Flandin, L., & Planes, E. (2021). Innovative PIN-type perovskite solar cells with 17% efficiency: Processing and characterization. *Materials Advances*, 2(24), 7907–7921. <https://doi.org/10.1039/d1ma00819f>
- Liu, C., Li, W., Chen, J., Fan, J., Mai, Y., & Schropp, R. E. I. (2017). Ultra-thin MoO_x as cathode buffer layer for the improvement of all-inorganic CsPbIBr₂ perovskite solar cells. *Nano Energy*, 41(June), 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.08.048>

- Ludin, N. A., Mustafa, N. I., Hanafiah, M. M., Ibrahim, M. A., Asri Mat Teridi, M., Sepeai, S., Zaharim, A., & Sopian, K. (2018). Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96(July), 11–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.048>
- Mahmud, M. A. P., Huda, N., Farjana, S. H., & Lang, C. (2020). Life-cycle impact assessment of renewable electricity generation systems in the United States. *Renewable Energy*, 151, 1028–1045. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.090>
- Maranghi, S., Parisi, M. L., Basosi, R., & Sinicropi, A. (2019). Environmental profile of the manufacturing process of perovskite photovoltaics: Harmonization of life cycle assessment studies. *Energies*, 12(19), 3746. <https://doi.org/10.3390/en12193746>
- Miller, I. I. G. (2019). Modeling life cycle greenhouse gas emissions from photovoltaic and wind power generation, with and without energy storage (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Montana Q, N., Landínez Téllez, D.A, Martínez Buitrago, D., Ortiz Díaz, O., & Parra V., C. A.. (2018). Síntesis, análisis estructural, estabilidad química, estudio magnético y efecto percolativo eléctrico del compuesto $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta} / Sr_2GdSbO_6$. *Ciencia en Desarrollo*, 9(1), 33-40. Retrieved October 20, 2022, from <https://acortar.link/1Ok1A3>
- Monteiro Lunardi, M., Wing Yi Ho-Baillie, A., Alvarez-Gaitan, J. P., Moore, S., & Corkish, R. (2017). A life cycle assessment of perovskite/silicon tandem solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(8), 679–695. <https://doi.org/10.1002/pip.2877>
- Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., & Parisi, M. L. (2020). Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels. *Energies*, 13(1), 252. <https://doi.org/10.3390/en13010252>
- Ndzibah, E., Andrea Pinilla-De La Cruz, G. and Shamsuzzoha, A. (2021), "End of life analysis of solar photovoltaic panel: roadmap for developing economies", *International Journal of Energy Sector Management*, Vol. 16 No. 1, pp. 112-128. <https://doi.org/10.1108/IJESM-11-2020-0005>
- Noguera, O., Pinto, R., & Villarreal, J. (2018). La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricación de paneles solares. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/itec/v15n1/1692-1798-itec-15-01-00007.pdf>.
- Okoroafor, T., Maalouf, A., Oez, S., Babu, V., Wilk, B., & Resalati, S. (2022). Life cycle assessment of inkjet printed perovskite solar cells. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133665. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133665>

- Ouyang, D., Zheng, J., Huang, Z., Zhu, L., & Choy, W. C. H. (2021). An efficacious multifunction codoping strategy on a room-temperature solution-processed hole transport layer for realizing high-performance perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(1), 371–379. <https://doi.org/10.1039/d0ta05873d>
- Pan, X. X., Chen, M. L., Ying, L. M., & Zhang, F. F. (2020). An empirical study on energy utilization efficiency, economic development, and sustainable management. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(12), 12874–12881. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04787-x>
- Papadas, I. T., Ioakeimidis, A., Armatas, G. S., & Choulis, S. A. (2018). Low-Temperature Combustion Synthesis of a Spinel NiCo₂O₄ Hole Transport Layer for Perovskite Photovoltaics. *Advanced Science*, 5(5), 1–9. <https://doi.org/10.1002/advs.201701029>
- Peng, J., Lu, L., & Yang, H. (2013). Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 255–274. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.035>
- Ramamurthy Rao, H. K., Gemechu, E., Thakur, U., Shankar, K., & Kumar, A. (2021). Life cycle assessment of high-performance monocrystalline titanium dioxide nanorod-based perovskite solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230(July), 111288. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111288>
- Ramirez, D., Velilla, E., Montoya, J. F., & Jaramillo, F. (2019). Mitigating scalability issues of perovskite photovoltaic technology through a p-i-n meso-superstructured solar cell architecture. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 195(January), 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.03.014>
- Rozo, E. E., Fajardo, F., Landínez Téllez, D. A., Rodríguez, J. A., & Roa-Rojas, J. (2008). Estructura Electrónica y de Bandas de la Perovskita SnTiO₃. *Revista Colombiana de Física*, 40(1).
- Sarialtin, H., Geyer, R., & Zafer, C. (2020). Life cycle assessment of hole transport free planar–mesoscopic perovskite solar cells. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(2), 023502 <https://doi.org/10.1063/1.5129784>
- Serrano-Lujan, L., Espinosa, N., Larsen-Olsen, T. T., Abad, J., Urbina, A., & Krebs, F. C. (2015). Tin-and lead-based perovskite solar cells under scrutiny: an environmental perspective. *Advanced Energy Materials*, 5(20), 1501119. <https://doi.org/10.1002/aenm.201501119>
- Schileo, G., & Grancini, G. (2021). Lead or no lead? Availability, toxicity, sustainability and environmental impact of lead-free perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(1), 67–76. <https://doi.org/10.1039/d0tc04552g>

- Singh, R., Singh, P. K., Bhattacharya, B., & Rhee, H. W. (2019). Review of current progress in inorganic hole-transport materials for perovskite solar cells. *Applied Materials Today*, 14, 175–200. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.12.011>
- Song, Z., Wathage, S. C., Phillips, A. B., & Heben, M. J. (2016). Pathways toward high-performance perovskite solar cells: review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications. *Journal of Photonics for Energy*, 6(2), 022001. <https://doi.org/10.1117/1.jpe.6.022001>
- Stasiulionis, J. (2015). Life cycle assessment of perovskite solar cells and comparison to silicon solar cells [Master's thesis, Chalmers University of Technology]. Chalmers Open Digital Repository
- Sun, N., Gao, W., Dong, H., Liu, Y., Liu, X., Wu, Z., Song, L., Ran, C., & Chen, Y. (2021). Architecture of pin Sn-based perovskite solar cells: characteristics, advances, and perspectives. *ACS Energy Letters*, 6(8), 2863–2875
- 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.
- Thankappan, A., & Thomas, S. (Eds.). (2018). Perovskite photovoltaics: basic to advanced concepts and implementation. Academic Press
- Tian, X., Stranks, S. D., & You, F. (2021). Life cycle assessment of recycling strategies for perovskite photovoltaic modules. *Nature Sustainability*, 4(9), 821–829. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00737-z>.
- Torabi, N., Behjat, A., Zhou, Y., Docampo, P., Stoddard, R. J., Hillhouse, H. W., & Ameri, T. (2019). Progress and challenges in perovskite photovoltaics from single-to multi-junction cells. *Materials Today Energy*, 12, 70-94. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2018.12.009>
- Tsang, M. P., Sonnemann, G. W., & Bassani, D. M. (2016). Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.024>
- Urbina, A. (2020). The balance between efficiency, stability and environmental impacts in perovskite solar cells: A review. *Journal of Physics: Energy*, 2(2), 022001. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ab5eee>
- Vidal, R., Alberola-Borràs, J. A., Sánchez-Pantoja, N., & Mora-Seró, I. (2021). Comparison of Perovskite Solar Cells with other Photovoltaics Technologies from the Point of View

- of Life Cycle Assessment. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(5), 2000088. <https://doi.org/10.1002/aesr.202000088>
- Wang, Q., Lin, Z., Su, J., Hu, Z., Chang, J., & Hao, Y. (2021). Recent progress of inorganic hole transport materials for efficient and stable perovskite solar cells. *Nano Select*, 2(6), 1055–1080. <https://doi.org/10.1002/nano.202000238>
- Wu, P., Ma, X., Ji, J., & Ma, Y. (2017). Review on Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emission Profit of Solar Photovoltaic Systems. *Energy Procedia*, 105, 1289–1294. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.460>
- Yoo, J. J., Seo, G., Chua, M. R., Park, T. G., Lu, Y., Rotermund, F., Kim, Y. K., Moon, C. S., Jeon, N. J., Correa-Baena, J. P., Bulović, V., Shin, S. S., Bawendi, M. G., & Seo, J. (2021). Efficient perovskite solar cells via improved carrier management. *Nature*, 590(7847), 587–593. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03285-w>
- You, H., Fang, H., Wang, X., & Fang, S. (2018). Environmental efficiency of photovoltaic power plants in China-A comparative study of different economic zones and plant types. *Sustainability (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/su10072551>
- You, J., Hong, Z., Yang, Y. M., Chen, Q., Cai, M., Song, T., & Chen, C. (2014). *Perovskite Solar Cells with High Efficiency and Flexibility*. Xx.
- Yue, D., Khatav, P., You, F., & Darling, S. B. (2012). Deciphering the uncertainties in life cycle energy and environmental analysis of organic photovoltaics. *Energy and Environmental Science*, 5(11), 9163–9172. <https://doi.org/10.1039/c2ee22597b>
- Zhang, H., Cheng, J., Lin, F., He, H., Mao, J., Wong, K. S., Jen, A. K. Y., & Choy, W. C. H. (2016). Pinhole-free and surface-nanostructured niox film by room-Temperature solution process for high-performance flexible perovskite solar cells with good stability and reproducibility. *ACS Nano*, 10(1), 1503–1511. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b07043>
- Zhang, J., Chang, N., Fagerholm, C., Qiu, M., Shuai, L., Egan, R., & Yuan, C. (2022). Techno-economic and environmental sustainability of industrial-scale productions of perovskite solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158(August 2021), 112146. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112146>
- Zhang, J., Gao, X., Deng, Y., Li, B., & Yuan, C. (2015). Life Cycle Assessment of Titania Perovskite Solar Cell Technology for Sustainable Design and Manufacturing. *ChemSusChem*, 8(22), 3882–3891. <https://doi.org/10.1002/cssc.201500848>
- Zhang, J., Gao, X., Deng, Y., Zha, Y., & Yuan, C. (2017). Comparison of life cycle environmental impacts of different perovskite solar cell systems. *Solar Energy Materials*

and Solar Cells, 166, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.03.008>

Zhang, M., Xin, D., Zheng, X., Chen, Q., & Zhang, W. H. (2020). Toward Greener Solution Processing of Perovskite Solar Cells. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(35), 13126–13138. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04289>

Zoomi, I., Kehri, H. K., Akhtar, O., Pandey, D., Srivastava, P., & Narayan, R. P. (2020). Ecotoxicity of Metallic Nanoparticles and Possible Strategies for Risk Assessment. In *Nanomaterials and Environmental Biotechnology* (pp. 41-53). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34544-0_3

Zuo, C., & Ding, L. (2015). Solution-processed Cu₂O and CuO as hole transport materials for efficient perovskite solar cells. *Small*, 11(41), 5528–5532. <https://doi.org/10.1002/sml.201501330>

Comparación de los impactos ambientales entre un nuevo prototipo fotovoltaico de perovskita desarrollado en Colombia y diferentes celdas solares mediante el análisis de ciclo de vida.

Camilo Andrés Valderrama Benítez^{a, *}, Francisco José Molina Pérez^{a, §},

^a Universidad de Antioquia, Facultad de ingeniería, Escuela ambiental, Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental (GAIA), Medellín, Colombia, 050010.

Email: * candres.valderrama@udea.edu.co, § francisco.molina@udea.edu.co.

Material suplementario.

La información de apoyo es un total de 19 páginas con 12 tablas.

Este documento incluye:

- Métodos suplementarios.
- Resultados complementarios.
- Referencia suplementaria.

Información Suplementaria S1: Metodología de Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida es un proceso objetivo que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, actividad o proceso, mediante la identificación de la energía, los materiales utilizados y las emisiones liberadas al medio ambiente, permitiendo así comparar y evaluar oportunidades para las mejoras ambientales, todo esto definido bajo las normas International Organization for Standardization (ISO), ISO 14040 e ISO 14044 (ISO 14040, 2006; ISO 14044 ,2006).

Las celdas solares de perovskita que se compararon entre sí, tienen las siguientes características:

El prototipo de Ramirez et al. (2019) consta de una arquitectura que contiene un vidrio revestido de Óxido de Estaño e Indio (ITO) como capa de electrodo delantero, una capa de Óxido de Níquel (NiO_x) como capa transportadora de agujeros/huecos, una capa de soporte mesoporosa de Óxido de Aluminio (Al_2O_3), una capa de perovskita (Halogenuro de plomo de metilamonio), una capa de PCBM recubierta de rodamina 101 como capa de transporte de electrones y finalmente, una capa de electrodos de plata como capa de electrodo trasero, dicha Celda Sola de Perovskita (CSP) la cual se denominó C1.

En el caso de Espinosa et al. (2015) se tomó el inventario que permitió la cuantificación y comparación de 2 rutas debido al método de disposición de la perovskita en términos de impactos ambiental, en donde la primera, realizó la disposición mediante evaporación y se denominó para este trabajo como C2, la segunda realizó la disposición mediante el recubrimiento por rotación denominada como C3.

La información de la cuarta y quinta CSP se tomó de Alberola et al. (2018), en donde se tomó la celda solar de perovskita de halogenuro de plomo de metilamonio como material absorbente con una receta de deposición estequiometria de cloruro de plomo (PbCl_2) y yoduro de metilamonio (MAI) determinada como dispositivo 1 y enunciada para nuestro caso como C4 y el dispositivo 2 compuesto con una capa absorbente de MAI y el yoduro de plomo (PbI_2) que para nuestro trabajo se denominó C5, para las demás capas que componen las celdas se seleccionaron capas comunes, como capa de electrodo delantero, vidrio revestido de Oxido de Estaño dopado con Flúor (FTO), como capa de transporte de electrones el óxido de titanio (TiO_2), como capa de transporte de agujeros la Spiro- MeoTAD y como capa de electrodo trasero se usó oro. Las especificaciones técnicas consideradas para las CSP se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla S1

Especificaciones de las celdas solares de perovskita de estudio

Variable	Unidad	C1	C2	C3	C4	C5
Constante de insolación	kWh /m ² – año			1700		
Eficiencia de la celda	%	15	15,4	11,5	11,4	9,7
Relación del rendimiento del módulo (PR)	%			75		

Vida útil (LT)	año	5				
Configuración		Mesoporosa	Plana	Plana	Plana	Plana
Arquitectura		PIN			NIP	

Se tomaron los parámetros: área activa, eficiencia de conversión, vida útil y PR, según lo reportado en la literatura (Celik et al., 2017; Krebs-moberg et al., 2021). En el caso de la vida útil se tomó el valor de 5 años, debido a que es la cantidad de años mínima que se requiere para que 1 cm² de las CSP produzca 1 kWh, esto se calculó como lo realizó Monteiro et al. (2017) :

$$A = \frac{\varepsilon}{I \times n \times PR \times LT} \quad (1)$$

Donde:

ε : energía requerida (1 kWh).

I : Constante de insolación (kWh /m² – año).

n : Eficiencia del módulo (%).

PR : Relación de rendimiento del módulo (%).

LT : Vida útil de la tecnología fotovoltaica (año).

A : Área (≤ 0.001 m²).

Información Suplementaria S2: Inventario de Ciclo de Vida

Para el inventario de la C1, la información primaria se suministró por parte del laboratorio CIDEMAT de la Universidad de Antioquia. Todo el proceso de producción se tomó de Ramirez et al. (2019), los cuales fabricaron celdas solares sobre sustratos de vidrio con películas de Oxido de Estaño dopado con Indio (ITO sustratos Naranja). Los sustratos fueron sometidos a un proceso de remoción selectiva de ITO mediante laser (P1) permitiendo fabricar dispositivos de áreas activas que van desde 0.09 hasta 2 cm². Para este trabajo se consideró el inventario de materiales y energía para fabricar celdas de 1 cm² de área activa. La fabricación de las celdas inicia con el lavado de los sustratos de ITO con jabón neutro e inmersión en un baño de ultrasonido secuencialmente en agua desionizada, acetona e isopropanol durante cinco minutos respectivamente para un total de 15 minutos. Luego, se realizó un tratamiento superficial con ozono ultravioleta durante 15 minutos a 100 °C. La capa transportadora de huecos (CTH) está constituida por nanopartículas de NiOx sintetizadas utilizando el método de precipitación química reportado por Ciro et al. (2017) y

Zhang et al. (2016). Las nanopartículas de NiO_x (5nm), se dispersaron en agua desionizada a una concentración de 23 mg/ml, y se sometieron secuencialmente a agitación mecánica de alta velocidad y ultrasonido durante 5 minutos para cada proceso. Por último, se depositaron películas de NiO_x mediante spin-coating a 3000 rpm durante 30 segundos. La capa de soporte mesoporosa de Al₂O₃ se deposita por spin-coating de una dispersión comercial de nanopartículas de alúmina (Aldrich). La dispersión se diluyó en isopropanol en una proporción en volumen de 1:5 y 1:3 para dar películas de 100 nm (en este estudio no se consideró esta sustancia en el inventario para esta capa). Las capas de Al₂O₃ se depositaron por spin-coating dinámico a 4000 rpm durante 30 s utilizando 100 µL de dispersión. Estas películas se secaron durante la noche en condiciones ambientales. Para obtener una capa de perovskita híbrida de 240 ± 10 nm, se depositó una solución precursora de Yoduro de plomo-metilamonio (CH₃NH₃PbI₃) a una concentración de 27% en peso. La solución se preparó a partir de un polvo de perovskita CH₃NH₃PbI₃ preparado previamente a partir de la mezcla de yoduro de metilamonio (Dyesol, código MS101000) y yoduro de plomo (PbI₂, Alfa Aesar, ref. 12724) en acetonitrilo. La tinta de perovskita CH₃NH₃PbI₃ se obtuvo dispersando el polvo en una mezcla de solventes de metilamina y acetonitrilo a una concentración de 27% en peso de sólidos. Las capas se depositan mediante spin-coating a 4000 rpm durante 30 s. Posteriormente, las películas se someten a tratamiento térmico a 100 °C durante 10 min. El PCBM (1-Material) se depositó mediante spin-coating dinámico de una solución de 20 mg/mL en clorobenceno (CB) a 2000 rpm durante 30 s. Posteriormente se realizó un tratamiento térmico a 65° durante 5 minutos. La rodamina 101 se depositó en la parte superior de la capa de PCBM mediante el recubrimiento por spin-coating dinámico de una solución de 0,5 mg/ml en etanol anhidro a 4000 rpm durante 30 segundos (No se tuvo en cuenta en el inventario). No obstante, para este estudio no se tuvo en cuenta, ya que no se contaba con información primaria ni secundaria de su elaboración. Finalmente, para completar la CSP, se evaporaron térmicamente al vacío (≈10⁻⁶ mbar) electrodos de plata de 80 nm a una tasa de deposición de alrededor de ≈ 0,1 nm/s.

En el caso de la energía requerida, no se pudieron hacer medidas directas sobre el consumo. No obstante, se calculó mediante la información suministrada por el fabricante de los equipos utilizados en el proceso de síntesis de la CSP, tales como la corriente y el voltaje. Por último, se tuvo en cuenta el tiempo de operación de los equipos y el factor de uso definido como el volumen de material de fabricación necesario para 1 cm², dividido por la capacidad máxima del equipo como se plantea por diversos autores (García-Valverde et al. 2010; Gong et al. 2015; Zhang et al. 2017). En la tabla S2, se establecen los valores tomados. La información primaria tiene el símbolo de superíndice (*), en el caso de que no se pudiera obtener esta información se utilizó información de la literatura, a continuación se presenta el superíndice a que investigación le corresponde : (García-Valverde et al., 2010)¹;(Zhang et al., 2017)²;(Alberola-Borràs et al., 2018)³.

Tabla S2

Equipo y uso de energía para la síntesis de la celda solar de perovskita de 1 cm² desarrollada por Ramirez et al. (2019)

Capa de deposición	Proceso - Método	Equipo	Voltaje (Voltios)	Corriente (Amperios)	Tiempo (min)	Factor de uso para 1 cm ² (%)	Energía (kWh)
Capa de electrodo delantero: ITO	Modelado laser	con 20W Triumph MOPA fiber laser	-	-	2	-	4,17E-05 [*]
	Ozonizado ultravioleta	OES -1000D – OZONE eliminatio system /novascan	220	5	15	0,19	5,20E-04 [*]
	Ultrasonido	1510 Branson	120	2	15	0,714	4,29E-04 [*]
Capa de transporte de agujeros: NiOx	Agitador magnético	Benchmark mixer	120	1,5	5	0,29	1,81E-06 ¹
	Ultrasonido	1510 Branson	120	2	30	0,029	3,46E-05 [*]
Capa de soporte: m – Al ₂ O ₃	Recubrimiento por centrifugación	Laurell :Model ws – 650 MZ – 8NPP 00	240	1	0,5	0,15	3,00E-06 ¹
	Recubrimiento por centrifugación	Laurell :Model ws – 650 MZ – 8NPP 00	240	1	0,5	0,15	3,00E-06 ¹
	Recubrimiento por centrifugación	Laurell :Model ws – 650 MZ – 8NPP 00	240	1	0,5	0,15	3,00E-06 ¹
Capa Perovskita absorbente:	Centrifuga	u-320 - Boeco	127	4	5	0,0253	1,07E-05 [*]
	Agitador magnético	Benchmark mixer	120	1,5	3	0,29	2,61E-05 ²
	Anhealed	Plancha	120	1	10	0,39	7,81E-05 ¹
Capa de transporte de electrones: PC60BM	Recubrimiento por centrifugación - dinámico	Laurell :Model ws – 650 MZ – 8NPP 00	240	1	0,5	0,15	3,00E-06 ¹
	recocido	Plancha	120	1	5	0,39	3,91E-05 ¹
Capa de electrodo trasero: Ag	Evaporación térmica al vacío	-	-	-	10	-	2,16E-02 ²
Glove Box	-	-	-	-	-	-	1,47E-03 ³

La **Tabla S3** presenta de manera detallada los materiales, requerimientos energéticos en los procesos, emisiones y desechos generados que permiten la fabricación del prototipo de celda solar de perovskita desarrollado en Colombia por Ramirez et al. (2019), denotada como C1. Con el fin de distinguir entre las variables, se presenta la información como lo realizó Espinosa et al. (2015), en donde cada dato está etiquetado en la primera columna con las siguientes letras:

I: Input (Entrada).

P: Proceso requerido.

W: Tratamiento de residuos.

E: Emisiones.

O: Material output (Material de salida).

Tabla S3

Inventario recopilado para el ACV de la cuna a la puerta de la C1 elaborado en el software SimaPro 9.2.0.2.

	Materiales y procesos para 1 cm ² de CSP	Cantidad	Unidad	Comentarios y referencias
	C1.1 Capa de Electrodo Delantero (ITO)	1	cm ²	Inventario para la celda solar desarrollada por el grupo CIDEMAT
I	Isopropanol {GLO} market for Cut-off, S	0.000267	kg	
I	Acetone, liquid {GLO} market for Cut-off, S	0.000267	kg	
I	Water, deionised, from tap water, at user {GLO} market for Cut-off, S	0.107	kg	
I	Soap {GLO} market for Cut-off, S	0.0000166	kg	
I	Indium Tin Oxide coated glass	0.0001	m ²	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.0000173100	kWh	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.00051985	kWh	

ANALISIS DE CICLO DE VIDA DE UNA CELDA SOLAR DE PEROVSKITA DESARROLLADA EN COLOMBIA

W	Heat, waste	0.000337	MJ	
W	Waste water	0.107	Kg	
O	Electrodo frontal – Vidrio recubierto de óxido de indio y estaño	0.0005	kg	
»A01	Indium Tin Oxide coated glass	1	m ²	(García-Valverde et al., 2010)
I	Indium {GLO} market for Cut-off, S	0.00230	kg	
I	Tin {GLO} market for Cut-off, S	0.0002	kg	
I	Flat glass, uncoated {GLO} market for Cut-off, S	1.54	kg	
I	Argon, liquid {GLO} market for Cut-off, S	0.124	kg	
I	Oxygen, liquid {RoW} market for Cut-off, S	0.0001	kg	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.225	kWh	
	C1.2 – Capa de Transporte de Huecos (NiO _x)	1	cm ²	Inventario para la celda solar desarrollada por el grupo CIDEMAT, Se sintetizo utilizando el método de (Ciro et al., 2017; H. Zhang et al., 2016)
»A02	NiO _x	0.000000368	kg	
I	Water, deionised, from tap water, at user {GLO} market for Cut-off, S	0.00001115	kg	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.00003	kWh	Spin - Coating
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.000625	kWh	Shaker
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.00003462	kWh	Ultrasound
E	NiO _x	0.000000350	kg	
O	Capa de Transporte de Huecos (NiO _x)	0.0000000184	kg	
w	Waste water	0.000011959	kg	
A02	NiO _x	1	g	Información CIDEMAT
I	Nickel nitrate hexahydrate	0.0045	kg	
I	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, S	0.001	kg	
I	Water, deionised, from tap water, at user {GLO} market for Cut-off, S	0.022	kg	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.0014062	kWh	Ultrasound
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.000625	kWh	Shaker

P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.0028125	kWh	Anhealed
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.0014062500	kWh	Anhealed
E	Nickel compounds	0.0005448	kg	
E	Sodium compounds, unspecified	0.002125	kg	
E	Waste water	0.022	kg	
C1.3 Capa de Soporte de Alúmina mesoporosa (Al₂O₃)		1	cm²	
I	Aluminium oxide {GLO} market for Cut-off, S	0.00000100386	kg	
I	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {GLO} tetrafluoroethane production Cut-off, S	0.000000592933	kg	
I	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, S	0.00000200772	kg	
I	Water, deionised, from tap water, at user {GLO} market for Cut-off, S	0.0000028181	kg	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.00003	kWh	
w	Heat, waste	0.000340	MJ	
w	Waste water	0.0000317271	kg	
O	Mesoporous layer of alumina- Al ₂ O ₃	0.0000000593	kg	
C1.4 Capa de Perovskita (MAPbI₃)		1	cm²	
»A03	Lead iodide (PbI ₂)	0.00000456	kg	
I	Methylamine {GLO} market for Cut-off, S	0.00000207	kg	
I	Acetonitrile {GLO} market for Cut-off, S	0.000077588	kg	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.00003	kWh	Spin - coating
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.000078125	kWh	anhealed
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.00000496	kWh	
W	Heat, waste	0.00398	MJ	
W	Waste, organic	0.000085696400000000	kg	
O	Capa de perovskita	0.0000001	kg	
»A04	MAI (CH ₃ NH ₃ I)	0.00000157	kg	
A03	Lead iodide (PbI ₂)	1	kg	(Gong et al., 2015)
I	Iodine {GLO} market for Cut-off, S	0.67	kg	
I	Potassium hydroxide {GLO} market for Cut-off, S	0.291	kg	
I	Lead {GLO} market for Cut-off, S	0.449	kg	

I	Nitric acid, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, S	0.729	kg	
P	Heat, from steam, in chemical industry {RoW} market for heat, from steam, in chemical industry Cut-off, S	13.5	MJ	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.133	kWh	
W	Waste water	0.160	kg	
O	Potassium nitrate {GLO} market for Cut-off, S	0.438	kg	
O	Nitric oxide {GLO} market for nitric oxide Cut-off, S	0.0434	kg	
A04	MAI (CH ₃ NH ₃ I)	1	kg	(Gong et al., 2015)
I	Hydrogen sulfide {GLO} market for Cut-off, S	0.139	kg	
I	Iodine {GLO} market for Cut-off, S	1.04	kg	
I	Methylamine {GLO} market for Cut-off, S	0.581	kg	
I	Ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene {GLO} market for Cut-off, S	7.31	kg	
I	Diethyl ether, without water, in 99.95% solution state {GLO} market for Cut-off, S	20.8	kg	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	9.24	kWh	
P	Heat, from steam, in chemical industry {RoW} steam production, as energy carrier, in chemical industry Cut-off, S	8.30	MJ	
W	Waste water	29.9	kg	
O	Sulfur {GLO} market for Cut-off, S	0.118	kg	
	C1.5 Capa de Transporte de Electrones (PCBM)	1	cm ²	
I	Monochlorobenzene {GLO} market for Cut-off, S	0.0000111	kg	
I	Ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene {GLO} market for Cut-off, S	0.00000789	kg	
»A05	PCBM	0.000000150	kg	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.00003	kWh	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.0000391	kWh	
W	Heat, waste	0.00000833	MJ	
W	Waste, organic	0.0000190	kg	
O	Capa de transporte de electrones	0.0000000652	kg	
A05	PCBM	1	kg	(García-Valverde et al., 2010)
I	Toluene, liquid {GLO} market for Cut-off, S	122.885	kg	

I	Oxygen, liquid {RoW} market for Cut-off, S	73.963	kg	
I	2-cyclopentone {GLO} market for Cut-off, S	0.850	kg	
I	Ammonia, liquid {RoW} market for Cut-off, S	0.788	kg	
I	Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {GLO} market for Cut-off, S	0.344	kg	
I	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RoW} market for Cut-off, S	0.218	kg	
I	Sulfur trioxide {GLO} market for Cut-off, S	0.479	kg	
I	Tap water {RoW} tap water production, conventional treatment Cut-off, S	6141.187	kg	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	252.44	kWh	
C1.6 Capa de Electrodo Trasero (Ag)		1	cm ²	
I	Silver {GLO} market for Cut-off, S	0.000000127	kg	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.0216	kWh	Espinosa, N., Serrano-Luján, L., Urbina, A., & Krebs, F. C. (2015).
O	Silver {GLO} market for Cut-off, S	0.0000001049	kg	
Glove Box		1	cm ²	(Alberola-Borràs et al., 2018)
I	Nitrogen, via cryogenic air separation, production mix, at plant, gaseous EU-27 S System - Copied from ELCD	0.0098	kg	
P	Electricity, low voltage {CO} market for electricity, low voltage Cut-off, S	0.0533	MJ	
E	Nitrogen, atmospheric	0.00980	kg	

Información Suplementaria S3: Evaluación de Impacto Ambiental

Los impactos ambientales estudiados mediante el ciclo de vida se calcularon utilizando la metodología sugerida por el International Life Cycle Data system (ILCD), el cual establece de manera estándar y con garantía en la calidad de datos y resultado del ACV desde su aplicación. Siendo uno de los métodos más recomendados para evaluar el impacto ambiental de sistemas de generación eléctrica fotovoltaica al ser utilizado por múltiples autores, ya que permite cubrir y considerar los insumos y emisiones generadas desde la extracción de la materia prima, fabricación, transporte y uso, es decir desde la cuna a la puerta o también conocido como punto medio (Alberola-Borràs et al., 2018; Blanco et al., 2020; Espinosa et al., 2015; Gong et al., 2015; Mahmud et al., 2020; Zhang et al., 2017). Debido a que no se tiene toda la cobertura de información que requiere un estudio de la cuna a la tumba y/o punto final y generar suposiciones sobre la fase de uso y de disposición final genera mayor

incertidumbre, para este estudio se trabaja con el método del punto medio y las categorías de impacto seleccionadas que se muestran en la tabla S4. Por último, a partir de los resultados de análisis de impacto ambiental de cada componente, la normalización y la ponderación se llevaron a cabo utilizando el conjunto de normalización de ponderación equivalente global recomendado por EC – JRC (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability [EC -JRC – IES], 2010). (JRC - IEA, 2010).

Teniendo en cuenta el manual del ILCD, el estudio de este ACV, se categoriza como situación A ya que se requiere realizar una comparación entre bienes y servicios, en este caso, se realiza entre diferentes Celdas Solares de Perovskita (CSP). A su vez, identificar los puntos débiles en términos de impacto ambiental de las CSP y proporcionar datos cuantitativos del ciclo de vida para la verificación de una tecnología en términos ambientales entre otros beneficios (EC – JRC -IES, 2010). El ACV se modeló como un modelo atribucional, ya que permite describir los flujos físicos ambientalmente relevantes de un ciclo de vida y los subsistemas que lo componen. Esto permitió que el enfoque de modelado de la entradas y salidas de los sistemas se le atribuyan a una unidad funcional de un sistema de productos o servicios. También, describe la cadena de suministros que la compone ya sea específica o promedio.

Por último, el manual del ILCD recomienda explícitamente el modelado atribucional para decisiones a nivel micro como es la situación A (p.82). Sin embargo, se ha estipulado que el ACV consecuente de usarse para las situaciones A y B ya que cuando se utiliza como un apoyo de decisión debe reflejar las consecuencias de la decisión (Ekvall et al. 2016). No obstante, estudios como el de Espinosa et al. (2015), indicaron que la base de datos Ecoinvent cuando se realizado bajo modelado consecuencial es más adecuada para los estudios B y no era completamente consistente con los estudios de la situación A y C1, por lo cual no se logró que los datos coincida con estas dos situaciones, dado esto se modeló bajo la situación A y atribucional.

La base de datos usada para este estudio fue Ecoinvent 3.6, en la cual se estableció que la asignación del método, es de corte por clasificación, el cual tiene un enfoque atribucional y permite definir las actividades de productos múltiples en actividades de un solo producto. Las reglas metodológicas para calcular la base de datos, son basadas en el enfoque de contenido reciclado o corte, en el cual se le designa la responsabilidad al productor, además, los subproductos de residuos deben ser tratados en caso de que no se le asigna a la actividad que produce los residuos, lo cual permite identificar para este estudio que actividad o proceso se vincula de manera negativa (Ecoinvent, 2022).

Tabla S4*Información sobre las categorías de impacto ambiental utilizadas para el estudio*

Categorías de impacto ambiental	Indicador	Unidad
Cambio climático	Potencial de calentamiento global calculando el forzamiento radiativo en un horizonte temporal de 100 años IPCC 2007	kg CO2 eq
Ecotoxicidad en agua dulce	Unidad Tóxica Comparativa para ecosistemas (CTUe) que expresa una estimación de la fracción de especies potencialmente afectadas (PAF) integrada en el tiempo y el volumen por unidad de masa de una sustancia química emitida (PAF m3 año/kg). Los grupos específicos de productos químicos requieren trabajos adicionales. USEtox (recomendado + provisional).	CTUe
Uso del suelo	Materia Orgánica del Suelo (MOS) basada en cambios en la MOS, medida en (kg C/m2/a). Impactos sobre la biodiversidad no cubiertos por el conjunto de datos. Mila i Canals et al. 2007.	kg C deficit
Toxicidad Humana (efectos del cancer)	Unidad Tóxica Comparativa para humanos (CTUh) que expresa el aumento estimado de morbilidad en la población humana total por unidad de masa de una sustancia química emitida (casos por kilogramo). Los grupos específicos de productos químicos requieren trabajos adicionales. USEtox (recomendado + provisional).	CTUh
Toxicidad Humana (Efectos cancerigenos)	Unidad Tóxica Comparativa para humanos (CTUh) que expresa el aumento estimado de morbilidad en la población humana total por unidad de masa de una sustancia química emitida (casos por kilogramo). Los grupos específicos de productos químicos requieren trabajos adicionales. USEtox (recomendado + provisional).	CTUh
Material particulado	Cuantificación del impacto de muerte prematura o invalidez que tienen las partículas/inorgánicos respiratorios en la población, en comparación con PM2.5. Incluye la evaluación de PM primarias (PM ₁₀ y PM _{2.5}) y secundarias (incluida la creación de PM secundarias debido a las emisiones de SO _x , NO _x y NH ₃) y CO. Rabl y Spadaro 2004.	kg PM2.5 eq
Acidificación	Exceso Acumulado (AE) que caracteriza el cambio en el exceso de carga crítica del área sensible en ecosistemas terrestres y principales de agua dulce, a los cuales se depositan sustancias acidificantes. Dependiente de un país europeo. Seppälä et al. 2006 y Posch et al. 2008.	molc H+ eq
Eutrofización de agua dulce	Expresión del grado en que los nutrientes emitidos llegan al compartimento final de agua dulce (fósforo considerado como factor limitante en agua dulce). validez europea. Factores de	kg P eq

Categorías de impacto ambiental	Indicador	Unidad
	caracterización promediados de factores de caracterización dependientes del país. Receta versión 1.05.	
Agotamiento de los recursos hídricos	Escasez de agua dulce: Cantidad de agua utilizada ajustada a la escasez. Ecoescasez suiza 2006.	m3 water eq
Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables	Escasez de recursos minerales con la escasez calculada como 'Base de reserva'. Se refiere a los recursos identificados que cumplen con los criterios físicos y químicos mínimos especificados relacionados con la práctica minera actual. La base de reservas puede abarcar aquellas partes de los recursos que tienen un potencial razonable para volverse económicamente disponibles dentro de los horizontes de planificación más allá de aquellos que asumen tecnología comprobada y economía actual. van Oers et al. 2002.	kg Sb eq
Demanda de energía acumulada	Método para calcular la Demanda de Energía Acumulada, basado en el método publicado por ecoinvent versión 2.0 y ampliado por PRÉ Consultants para materias primas disponibles en la base de datos SimaPro 7. El método se basa en valores caloríficos superiores (HHV).	MJ

Nota: La información presentada en la Tabla S4 se tomó de EC-JRC-IES. (2012).

RESULTADOS COMPLEMENTARIOS

Tabla S5

Impactos ambientales generados por la CSP de estudio sin normalizar.

Categoría de impacto	Unidad	C1	C2	C3	C4	C5
CC	kg CO ₂ eq	1,52E-02	5,17E-02	3,37E-02	5,95E-02	5,80E-02
THNC	CTUh	3,06E-09	1,04E-08	6,70E-09	4,47E-08	4,43E-08
THC	CTUh	6,05E-10	2,17E-09	1,52E-09	2,38E-09	2,31E-09
MP	kg PM2.5 eq	6,96E-06	2,55E-05	1,49E-05	4,17E-05	4,06E-05
Ac	molc H+ eq	1,06E-04	3,48E-04	2,37E-04	5,47E-04	5,38E-04
EAD	kg P eq	3,37E-06	1,27E-05	7,44E-06	3,07E-05	3,02E-05
EA	CTUe	5,17E-01	1,87E+00	1,33E+00	4,31E+00	4,28E+00
US	kg C deficit	7,50E-03	2,68E-02	1,60E-02	7,28E-02	7,19E-02
ARH	m3 water eq	2,95E-05	1,69E-05	1,40E-05	4,14E-05	4,07E-05
ARMFR	kg Sb eq	9,68E-07	1,38E-06	8,28E-07	1,29E-05	1,29E-05
DEC	MJ	3,42E-01	1,07E+00	7,33E-01	9,73E-01	9,46E-01

Tabla S6

Resultados de los impactos ambientales normalizados aplicando la metodología ILCD 2011 Midpoint+ V1.11/Normalización EC -JRC Global, evaluados mediante el ACV de la cuna a la puerta de C1

Categoría de impacto	Total	CED	CTH	CSA	PER	CTE	CET	GB
CC	2,15E-06	3,6E-07	3,1E-09	1,9E-09	8,6E-08	3,4E-08	9,2E-07	7,5E-07
THNC	1,97E-05	4,1E-06	3,6E-08	2,6E-08	1,1E-06	2,4E-07	8,5E-06	5,7E-06
THC	4,88E-05	9,8E-06	8,1E-08	1,9E-07	1,9E-06	6,0E-07	2,2E-05	1,5E-05
MP	1,37E-06	2,7E-07	3,0E-09	1,6E-09	7,7E-08	2,8E-08	5,4E-07	4,6E-07
Ac	1,89E-06	2,7E-07	4,8E-09	1,7E-09	7,5E-08	2,0E-08	8,2E-07	6,9E-07
EAD	5,16E-07	1,2E-07	8,2E-10	6,2E-10	2,4E-08	7,4E-09	2,1E-07	1,4E-07
EA	1,38E-04	1,4E-05	2,7E-07	1,6E-07	2,0E-06	6,6E-07	7,3E-05	4,8E-05
US	1,44E-09	3,4E-10	2,4E-12	1,8E-12	9,3E-11	3,8E-11	5,7E-10	3,9E-10
ARH	4,29E-07	3,4E-07	1,9E-10	1,4E-10	1,5E-08	6,6E-09	3,8E-08	3,1E-08
ARMFR	5,01E-06	3,3E-06	2,2E-09	5,4E-09	7,2E-07	1,3E-08	7,3E-07	2,1E-07

Tabla S7

Resultados de los impactos ambientales normalizados aplicando la metodología ILCD 2011 Midpoint+ V1.11/Normalización EC -JRC Global, evaluados mediante el ACV de la cuna a la puerta de C2

Categoría de impacto	Total	CED	CTE	PER	CTH	CET
CC	7,31E-06	2,09E-06	2,23E-07	2,44E-06	1,63E-06	9,27E-07
HTNC	6,74E-05	1,95E-05	1,83E-06	2,16E-05	1,34E-05	1,11E-05
THC	1,75E-04	4,91E-05	5,18E-06	6,09E-05	3,73E-05	2,23E-05
MP	5,02E-06	1,25E-06	1,52E-07	1,90E-06	1,17E-06	5,52E-07
Ac	6,20E-06	1,87E-06	1,97E-07	2,03E-06	1,28E-06	8,33E-07
EAD	1,94E-06	4,83E-07	5,37E-08	7,18E-07	4,36E-07	2,45E-07
EA	5,01E-04	1,59E-04	1,59E-05	1,50E-04	9,46E-05	8,20E-05
US	5,16E-09	1,51E-09	1,95E-10	1,75E-09	1,10E-09	6,04E-10
ARH	2,45E-07	8,84E-08	9,35E-09	1,11E-07	-7,91E-10	3,75E-08
ARMFR	7,15E-06	2,33E-06	4,14E-07	6,30E-07	4,36E-07	3,33E-06

Tabla S8

Resultados de los impactos ambientales normalizados aplicando la metodología ILCD 2011 Midpoint+ V1.11/Normalización EC -JRC Global, evaluados mediante el ACV de la cuna a la puerta de C3

Categoría de impacto	Total	CED	CTE	PER	CTH	CET
CC	4,76E-06	6,29E-07	4,22E-07	2,79E-06	4,69E-09	9,16E-07
HTNC	4,32E-05	6,92E-06	3,71E-06	2,46E-05	3,21E-08	8,04E-06
HTC	1,22E-04	1,57E-05	1,90E-05	6,62E-05	7,96E-08	2,14E-05
MP	2,93E-06	3,81E-07	2,48E-07	1,76E-06	3,17E-09	5,37E-07
Ac	4,22E-06	5,72E-07	3,76E-07	2,45E-06	3,20E-09	8,17E-07
EAD	1,14E-06	1,49E-07	9,65E-08	6,82E-07	8,57E-10	2,10E-07
EA	3,57E-04	4,86E-05	3,40E-05	2,04E-04	1,86E-07	7,01E-05
US	3,07E-09	4,32E-10	2,65E-10	1,80E-09	4,38E-12	5,70E-10
ARH	2,03E-07	2,86E-08	1,91E-08	1,17E-07	5,81E-10	3,77E-08
ARMFR	4,29E-06	3,06E-06	1,32E-07	8,19E-07	9,77E-10	2,79E-07

Tabla S9

Resultados de los impactos ambientales normalizados aplicando la metodología ILCD 2011 Midpoint+ V1.11/Normalización EC -JRC Global, evaluados mediante el ACV de la cuna a la puerta de C4

Categoría de impacto	Total	CED	CTE	PER	CTH	CET	GB
CC	8,42E-06	5,48E-06	7,38E-07	2,76E-07	5,02E-08	1,13E-06	7,48E-07
HTNC	2,88E-04	3,72E-05	6,48E-06	2,46E-06	5,08E-07	2,36E-04	5,67E-06
HTC	1,92E-04	7,13E-05	1,73E-05	7,20E-06	1,33E-06	8,03E-05	1,47E-05
MP	8,22E-06	5,80E-06	4,34E-07	2,55E-07	4,47E-08	1,24E-06	4,56E-07
Ac	9,75E-06	6,94E-06	6,57E-07	2,17E-07	3,90E-08	1,20E-06	6,93E-07
EAD	4,69E-06	9,78E-07	1,70E-07	9,48E-08	1,50E-08	3,29E-06	1,44E-07
EA	1,15E-03	4,72E-05	5,63E-05	1,37E-05	2,35E-06	9,86E-04	4,81E-05
US	1,40E-08	1,05E-08	4,61E-10	2,17E-10	5,15E-11	2,33E-09	3,90E-10
ARH	6,01E-07	5,08E-07	3,01E-08	1,31E-08	6,14E-09	1,29E-08	3,12E-08
ARMFR	6,70E-05	8,75E-06	2,43E-07	6,15E-08	8,18E-08	5,77E-05	2,05E-07

Tabla S 10

Resultados de los impactos ambientales normalizados aplicando la metodología ILCD 2011 Midpoint+ V1.11/Normalización EC -JRC Global, evaluados mediante el ACV de la cuna a la puerta de C5

Categoría de impacto	Total	CED	CTE	PER	CTH	CET	GB
CC	8,20E-06	5,48E-06	7,38E-07	5,76E-08	5,02E-08	1,13E-06	7,48E-07
HTNC	2,86E-04	3,72E-05	6,48E-06	5,11E-07	5,08E-07	2,36E-04	5,67E-06
HTC	1,86E-04	7,13E-05	1,73E-05	1,35E-06	1,33E-06	8,03E-05	1,47E-05
MP	8,00E-06	5,80E-06	4,34E-07	3,41E-08	4,47E-08	1,24E-06	4,56E-07
Ac	9,58E-06	6,94E-06	6,57E-07	5,11E-08	3,90E-08	1,20E-06	6,93E-07
EAD	4,61E-06	9,78E-07	1,70E-07	1,33E-08	1,50E-08	3,29E-06	1,44E-07
EA	1,14E-03	4,72E-05	5,63E-05	4,35E-06	2,35E-06	9,86E-04	4,81E-05
US	1,38E-08	1,05E-08	4,61E-10	3,66E-11	5,15E-11	2,33E-09	3,90E-10
ARH	5,91E-07	5,08E-07	3,01E-08	2,42E-09	6,14E-09	1,29E-08	3,12E-08
ARMFR	6,70E-05	8,75E-06	2,43E-07	2,66E-08	8,18E-08	5,77E-05	2,05E-07

Tabla S 11

Resultados de la Demandas de Energía Acumulada por CSP de estudio

Categoría de impacto	Unidad	C1	C2	C3	C4	C5
Total	MJ	3,4E-01	1,1E+00	7,3E-01	9,7E-01	9,5E-01
No renovable, fósil	MJ	2,0E-01	5,8E-01	3,8E-01	7,6E-01	7,4E-01
No renovable, nuclear	MJ	1,0E-02	1,2E-02	3,1E-03	3,6E-02	3,4E-02
No renovable, biomasa	MJ	6,8E-05	3,7E-06	1,2E-06	9,6E-05	9,5E-05
Renovable, biomasa	MJ	1,1E-03	2,4E-03	9,4E-04	1,2E-02	1,2E-02
Renovable, viento, solar, geotérmica	MJ	6,7E-04	2,1E-03	7,6E-04	3,1E-03	2,9E-03
Renovable, agua	MJ	1,3E-01	4,8E-01	3,5E-01	1,6E-01	1,5E-01

Tabla S12

Resultados de la Demanda de Energía Acumulada distribuida por capa para las CSP de estudio.

Celda	CED	CTE	PER	CTH	CET	GB	CSA	Total (MJ)
C1	6,0E-02	5,0E-03	1,6E-02	4,7E-04	1,4E-01	1,2E-01	2,6E-04	3,4E-01
C2	3,2E-01	3,5E-02	3,5E-01	2,2E-01	1,4E-01	0,0E+00	0,0E+00	1,1E+00
C3	9,6E-02	6,6E-02	4,3E-01	6,7E-04	1,4E-01	0,0E+00	0,0E+00	7,3E-01
C4	5,6E-01	1,2E-01	3,7E-02	7,7E-03	1,4E-01	1,2E-01	0,0E+00	9,7E-01
C5	5,6E-01	1,2E-01	9,0E-03	7,7E-03	1,4E-01	1,2E-01	0,0E+00	9,5E-01
Total (MJ)	1,6E+00	3,4E-01	8,4E-01	2,4E-01	7,1E-01	3,5E-01	2,6E-04	4,1E+00

REFERENCIAS

- Alberola-Borràs, J. A., Vidal, R., Juárez-Pérez, E. J., Mas-Marzá, E., Guerrero, A., & Mora-Seró, I. (2018). Relative impacts of methylammonium lead triiodide perovskite solar cells based on life cycle assessment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 179, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.11.008>
- Blanco, C. F., Cucurachi, S., Dimroth, F., Guinée, J. B., Peijnenburg, W. J. G. M., & Vijver, M. G. (2020). Environmental impacts of III–V/silicon photovoltaics: life cycle assessment and guidance for sustainable manufacturing. *Energy & Environmental Science*, 13(11), 4280–4290. <https://doi.org/10.1039/d0ee01039a>
- Ciro, J., Ramírez, D., Mejía Escobar, M. A., Montoya, J. F., Mesa, S., Betancur, R., & Jaramillo, F. (2017). Self-Functionalization behind a Solution-Processed NiOx Film Used As Hole Transporting Layer for Efficient Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(14), 12348–12354. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b15975>
- EC-JRC-IES.(2012). Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Database and Supporting Information. First edition. February

2012. EUR 25167. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2012. http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=140
- EC-JRC-IES.(2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook :general guide for life cycle assessment: Detailed guidance. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/38479>
- Ecoinvent (16 de agosto de 2022). System Models. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/>
- Espinosa, N., Serrano-Luján, L., Urbina, A., & Krebs, F. C. (2015). Solution and vapour deposited lead perovskite solar cells: Ecotoxicity from a life cycle assessment perspective. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 137, 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.02.013>
- García-Valverde, R., Cherni, J. A., & Urbina, A. (2010). Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18(7), 535–558. <https://doi.org/10.1002/pip.967>
- Gong, J., Darling, S. B., & You, F. (2015). Perovskite photovoltaics: Life-cycle assessment of energy and environmental impacts. *Energy and Environmental Science*, 8(7), 1953–1968. <https://doi.org/10.1039/c5ee00615e>
- Krebs-Moberg, M., Pitz, M., Dorsette, T. L., & Gheewala, S. H. (2021). Third generation of photovoltaic panels: A life cycle assessment. *Renewable Energy*, 164, 556-565. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.054>
- Mahmud, M. A. P., Huda, N., Farjana, S. H., & Lang, C. (2020). Life-cycle impact assessment of renewable electricity generation systems in the United States. *Renewable Energy*, 151, 1028–1045. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.090>
- Monteiro Lunardi, M., Wing Yi Ho-Baillie, A., Alvarez-Gaitan, J. P., Moore, S., & Corkish, R. (2017). A life cycle assessment of perovskite/silicon tandem solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(8), 679–695. <https://doi.org/10.1002/pip.2877>
- Ramirez, D., Velilla, E., Montoya, J. F., & Jaramillo, F. (2019). Mitigating scalability issues of perovskite photovoltaic technology through a p-i-n meso-superstructured solar cell architecture. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 195(January), 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.03.014>
- Zhang, H., Cheng, J., Lin, F., He, H., Mao, J., Wong, K. S., Jen, A. K. Y., & Choy, W. C. H. (2016). Pinhole-free and surface-nanostructured niox film by room-Temperature solution process for high-performance flexible perovskite solar cells with good stability

and reproducibility. ACS Nano, 10(1), 1503–1511.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.5b07043>

Zhang, J., Chang, N., Fagerholm, C., Qiu, M., Shuai, L., Egan, R., & Yuan, C. (2022). Techno-economic and environmental sustainability of industrial-scale productions of perovskite solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112146>

Zhang, J., Gao, X., Deng, Y., Zha, Y., & Yuan, C. (2017). Comparison of life cycle environmental impacts of different perovskite solar cell systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 166, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.03.008>