



Comparación de los impactos ambientales de baterías AA alcalinas y recargables a partir del análisis de ciclo de vida

Rojas Zamora, U., Hernández Fydrych, V. C. y Navarrete López, A. M. (2026).
Comparación de los impactos ambientales de baterías AA alcalinas y recargables a partir
del análisis de ciclo de vida [*Postprint*]. CIENCIA *ergo-sum*, 33.

<https://doi.org/10.30878/ces.v33n0a59>

Sección: Ciencia Exactas y Aplicadas

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Esta versión del artículo es una “versión final del autor” que fue aceptada por un proceso de **evaluación por pares ciegos**. Este documento diferirá en formato respecto a la “versión del editor”, la cual se someterá a un proceso de corrección de estilo y de diseño editorial. De ninguna forma se modificará el contenido. Todas las ideas que se presentan son responsabilidad del autor.

Comparación de los impactos ambientales de baterías AA alcalinas y recargables a partir del análisis de ciclo de vida

Comparison of the Environmental Impacts of Alkaline and Rechargeable AA Batteries Based on Life Cycle Analysis

Ulises Rojas Zamora, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México

Correo electrónico: urz@azc.uam.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-5092>

Vianka Celina Hernández Fydrych, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México

Correo electrónico: vchf@azc.uam.mx

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2241-7022>

Alejandra Montserrat Navarrete López,¹ Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México

Correo electrónico: amnl@azc.uam.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2219-1739>

Recepción: 12 de marzo de 2025

Aprobación: 19 de septiembre de 2025

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo determinar los impactos ambientales producidos por el uso y disposición final de baterías alcalinas AA y recargables de ion litio, usando la herramienta de análisis de ciclo de vida, a partir de la metodología ReCiPe. Para ambos grupos de baterías las categorías de mayor relevancia fueron toxicidad en humanos y ecotoxicidad. Las baterías recargables presentaron menores impactos en 17 de 18 categorías evaluadas, con valores 2.5 veces menores en calentamiento global, agotamiento de ozono troposférico y eutrofización. Para las baterías de ion litio se observó una tendencia a la disminución en los impactos de $55.76 \pm 24.35\%$ con el incremento en el número de recargas, colocando a las baterías de ion litio como una alternativa más sostenible.

PALABRAS CLAVE: análisis de ciclo de vida, baterías alcalinas, baterías recargables de ion litio AA, sostenibilidad.

ABSTRACT

This study aimed to assess the environmental impacts associated with the use and end-of-life of AA alkaline and rechargeable lithium-ion batteries, employing Life Cycle Assessment with the ReCiPe methodology. For both battery types, the most significant impact categories were human toxicity and ecotoxicity. Rechargeable batteries exhibited lower impacts in 17 of 18 evaluated categories, showing reductions up to 2.5-fold in global warming, tropospheric ozone depletion, and eutrophication. For

¹ Autor para correspondencia.

lithium-ion batteries, a decreasing trend in impacts was observed, averaging $55.76 \pm 24.35\%$ as the number of recharging cycles increased. These findings highlight lithium-ion batteries as a more sustainable alternative, particularly when multiple recharge cycles are considered in their overall life cycle performance.

KEYWORDS: life cycle assessment, alkaline batteries, AA lithium-ion rechargeable batteries, sustainability

INTRODUCCIÓN

Las celdas electroquímicas, comúnmente denominadas pilas, son dispositivos que convierten la energía química a energía eléctrica mediante reacciones redox espontáneas (Thompson et al., 2020). Dada la alta demanda de estos productos, el mercado ofrece tanto pilas primarias como secundarias. Las pilas primarias, también conocidas como pilas alcalinas tienen una vida útil corta, pues las reacciones electroquímicas que ocurren en su interior no son reversibles, por lo tanto, son desechables. En contraste, las pilas secundarias son recargables, siendo que las reacciones son reversibles mediante la aplicación de corriente eléctrica externa, lo que extiende su ciclo de vida y permite múltiples usos (Dolega et al., 2020; Zachary et al., 2022).

Un ejemplo destacado de pilas secundarias son las de ion-litio, estas pilas ofrecen una eficiencia superior en términos de densidad energética y durabilidad. Se estima que una sola pila de ion-litio puede reemplazar hasta 300 pilas alcalinas, reduciendo así la demanda de pilas desechables (Gómez, 2021). Además, su proceso de fabricación incorpora prácticas que minimizan el uso de compuestos contaminantes, por ende, reduce las emisiones de dióxido de carbono (CO_2). No obstante, ambos tipos de pilas contienen aproximadamente un 30% de materiales tóxicos, incluyendo metales pesados como mercurio, plomo, zinc, níquel, litio, cromo y cadmio (Gavilán, Rojas y Barrera, 2009; Thompson et al., 2020), los cuales representan un riesgo ambiental significativo al final de la vida útil de las pilas, especialmente cuando son dispuestas en rellenos sanitarios, donde pueden liberar contaminantes al suelo y acuíferos (Chen y Lee, 2023).

En México, el volumen anual de pilas desechadas asciende a 450 millones de unidades, de las cuales se estima que el 40% son de origen ilegal o falsificadas, que no cumplen con los estándares establecidos por la NOM-052-SEMARNAT-1993 (LGPGIR, 2023). Esta

situación es alarmante, ya que dichas pilas exceden los límites permitidos de contaminantes peligrosos, lo que podría aumentar el daño ambiental si se liberan al medio ambiente.

Con el objetivo de evaluar de manera sistemática los impactos ambientales derivados del ciclo de vida de las pilas y otros productos, se recurre al Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una metodología estandarizada que abarca desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto (Haya, 2016). Esta herramienta analítica proporciona una evaluación integral de los efectos potenciales sobre la salud humana y el medio ambiente, lo cual permite identificar oportunidades de mejora orientadas hacia una gestión más sostenible (Finnveden y Potting, 2014). El ACV se encuentra normado por la UNE-EN ISO 14040:2006, la cual establece los principios, la estructura metodológica y los requisitos generales para su implementación. Las fases esenciales del ACV comprenden:

- a) Definición de los objetivos y alcances: En esta etapa se especifica el producto, la unidad funcional, y los límites del sistema, abarcando desde la extracción de materias primas hasta el final de vida del producto, incluyendo manufactura, distribución, uso, reciclaje y gestión de los residuos.
- b) Inventario de Ciclo de Vida (ICV): Se realiza un balance detallado de materia y energía, registrando el consumo de recursos, emisiones atmosféricas, generación de residuos y otros flujos ambientales asociados a cada etapa del ciclo de vida.
- c) Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV): A los resultados arrojados del AICV se les clasifican en categorías de impacto ambiental, que varían según la metodología empleada y las áreas de interés. Generalmente, estas categorías se agrupan en tres principales áreas: Salud humana, calidad del ecosistema y agotamiento de recursos (Tabla 1).
- d) Interpretación de los resultados: Se analizan los resultados para identificar los factores de mayor influencia en el impacto ambiental y se proponen mejoras cualitativas y cuantitativas, tales como modificaciones en el diseño del producto, optimización de procesos y estrategias de gestión de residuos.

Tabla 1
Categorías de impacto en el análisis de inventario de ciclo de vida

Categoría A: De impacto básicas	Categoría B: De impacto específicas	Categoría C Otras de alto impacto
● Agotamiento de recursos abióticos ● Impacto del uso de suelo ● Cambio climático ● Agotamiento del ozono estratosférico ● Toxicidad en humanos ● Ecotoxicidad ○ Ecotoxicidad acuática en aguas dulces ○ Ecotoxicidad en agua marina ○ Ecotoxicidad terrestre ● Formación de fotooxidantes ● Acidificación ● Eutroficación	● Impacto del uso de suelo ○ Pérdida de la función de soporte de vida ○ Pérdida de la biodiversidad ● Ecotoxicidad ○ Ecotoxicidad en sedimentos de agua dulce ○ Ecotoxicidad en sedimentos marinos ● Impacto de la radiación ionizante ● Olor ● Ruido ● Calor residual (aumento de la temperatura del agua) ● Accidentes	● Agotamiento de recursos bióticos ● Desección ● Malos olores en agua

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos a partir del ACV permiten identificar oportunidades de mejora en el diseño y gestión del producto. La inclusión de información detallada en el ACV incrementa la capacidad para optimizar el producto, lo que, en consecuencia, reduce su impacto ambiental. No obstante, es esencial reconocer que el ACV no se limita a facilitar decisiones orientadas a la mejora ambiental, sino que también abarca los ámbitos social y económico (Haya, 2016).

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio fue evaluar los impactos ambientales asociados al uso y disposición final de dos tipos de baterías en formato AA, alcalinas de un solo uso y recargables de ion litio, mediante el Análisis de Ciclo de Vida.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un análisis comparativo de los impactos ambientales asociados al uso y disposición final de baterías alcalinas AA de un solo uso y baterías recargables de ion-litio. La Figura 1 presenta las principales entradas y salidas consideradas en cada una de las etapas del estudio, conforme a la metodología del ACV.

Las baterías alcalinas de un solo uso incluidas en el estudio corresponden a la presentación AA, las cuales representan un mayor consumo en el mercado tanto a nivel doméstico como

industrial, siendo desechadas tras agotarse su capacidad de carga, sin posibilidad de reutilización. En contraste, se analizaron baterías recargables de ion-litio, las cuales pueden ser sometidas a múltiples ciclos de carga-descarga durante su vida útil, representando así una alternativa potencialmente más sostenible desde el punto de vista ambiental.

Figura 1
Flujos de entradas y salidas en las etapas a evaluar durante el análisis



Fuente: Elaboración propia

1.1. Definición de Unidad Funcional

Para efectuar una comparación objetiva de los impactos ambientales generados por diferentes alternativas de productos o servicios, es fundamental establecer una Unidad Funcional (UF). Esta unidad corresponde a una descripción cuantificada del rendimiento de la función principal del producto estudiado (Haya, 2016). Si bien en muchos estudios de ACV la UF se expresa como una masa equivalente, por ejemplo, 1 kg del producto, en este estudio se consideró la función primordial de las baterías, que radica en el suministro de energía eléctrica, por lo tanto, se definió como unidad funcional la entrega de 1 kWh de energía, valor que permite equiparar de forma directa el desempeño ambiental entre baterías de diferente tecnología.

1.2. Características generales de las baterías y del cargador

Para el desarrollo del estudio se llevó a cabo una caracterización técnica de baterías alcalinas y recargables de ion-litio. Los datos se obtuvieron a partir de fuentes electrónicas específicas

y a partir de la información contenida en los empaques de baterías y cargadores adquiridos en el mercado. Adicionalmente, la masa de los dispositivos y de los empaques fue determinada en el laboratorio.

Los resultados de la caracterización presentados en el Cuadro 1, indican diferencias sustanciales en parámetros clave como la masa, el voltaje nominal y la capacidad de corriente (amperaje) entre ambos tipos de baterías. En el caso de las baterías recargables, se consideraron las especificaciones del dispositivo de carga, dado que este influye de manera directa en el balance energético global y, por ende, en los impactos ambientales del sistema evaluado.

Cuadro 1
Características de las pilas alcalinas y de ion litio consideradas para el estudio

Tipo de batería	Diámetro (mm)	Largo (mm)	Masa (g)	Voltaje (V)	Amperaje (mA)	Capacidad nominal (mAh)	Fuente
Alcalina	14	50	23.0	1.5	1600	2200	Ortez y Parada (2008) y laboratorio
Ion-litio			24.3	3.7	150	2200	Steren (2024) y laboratorio

Fuente: Elaboración propia.

De forma similar, se determinaron las características del cargador utilizado para la recarga de las baterías de ion-litio, este correspondió con un cargador universal de la marca Steren con capacidad para recargar cuatro baterías. Estas se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2
Características del cargador necesario para la recarga de las baterías de ion-litio

Capacidad (# baterías)	Masa (g)	Potencia (W)	Tiempo para recarga (h)	Eficiencia de recarga (%)
4	70.3	8.0	7.0	70.0

Fuente: Elaboración propia.

1.3. Determinación del flujo de referencia

A partir de las características generales de ambos tipos de baterías presentadas en el Cuadro 1, se determinó el flujo de referencia, que corresponde con el número, # de unidades requeridas de cada tipo de batería para suministrar la energía correspondiente a la unidad

funcional, establecida en 1 kWh. El cálculo del flujo de referencia se realizó empleando la ecuación 1 en donde E representa la energía de la unidad funcional (Wh), CN la capacidad nominal (Ah), y V el voltaje nominal (V) de cada tipo de batería evaluada.

$$\# \text{ de baterías} = \frac{E}{CN \cdot V} \quad (1)$$

El flujo de referencia correspondiente a las baterías alcalinas y recargables de ion-litio se muestra en el Cuadro 3, junto con la masa total de baterías involucrada para cada caso. Los resultados muestran que, para satisfacer la demanda energética equivalente a la unidad funcional (1 kWh), se requiere un número significativamente mayor de baterías alcalinas (303.03 vs 122.85), así como una masa total más elevada (6.97 vs 2.95 kg), en comparación con las baterías recargables. Esta diferencia se atribuye principalmente al menor voltaje nominal de las baterías alcalinas.

Cuadro 3
Determinación del flujo de referencia de cada tipo de baterías

Tipo de batería	Flujo de referencia (# de baterías)	Masa total (kg)
Alcalina	303.03	6.97
Ion-litio	122.85	2.95

Fuente: Elaboración propia.

La diferencia considerable en el flujo de referencia entre ambos tipos de baterías es una variable clave que puede influir en la magnitud de los impactos ambientales estimados durante el análisis de ciclo de vida; pues un mayor flujo de referencia implica la integración de una cantidad proporcionalmente mayor de materiales en su estructura, lo cual se relaciona con una mayor extracción de materiales vírgenes de la naturaleza y, posiblemente, con mayores impactos.

1.4. Inventario de materiales y sustancias

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica para identificar los materiales y sustancias contenidos en ambos tipos de baterías, así como su porcentaje dentro de la estructura, lo que permitió conocer su composición. La información se presenta como material suplementario en la liga, doi: 10.17632/ybf2h2tm4j.1.

A partir de la composición se determinó la masa de cada componente en cada tipo de batería,

considerando para ello su porcentaje y la masa total obtenida a partir del flujo de referencia (Cuadro 3). Esta información es necesaria para evaluar los impactos específicos de cada alternativa, pues cada material presenta diferentes efectos en el ambiente, y estos son proporcionales a su masa.

El mismo procedimiento se llevó a cabo para determinar la masa de cada material en la estructura del cargador utilizado para la recarga de las baterías de ion-litio y los empaques de ambos tipos de baterías.

1.5. Casos de uso de las baterías

Tomando en cuenta que las baterías alcalinas están diseñadas para un solo uso y no permiten recargas, el único escenario posible para su análisis es la utilización única. En contraste, las baterías recargables de ion-litio pueden ser sometidas a múltiples ciclos de carga, con una vida útil estimada hasta de 400 recargas (Stereon, 2024).

Con el objetivo de evaluar la influencia del número de ciclos de uso sobre los impactos ambientales generados, en el presente estudio se consideraron diversos escenarios de utilización para las baterías recargables. Los escenarios considerados fueron: 10, 100, 200 y 400 ciclos de uso. Como se muestra en el Cuadro 4, el incremento en el número de recargas se traduce en una disminución proporcional tanto en la cantidad de baterías requeridas para suministrar 1 kWh de energía, como en la masa total asociada.

Cuadro 4
Características de los diferentes escenarios de recarga

	Número de recargas			
	10	100	200	400
Baterías necesarias	12.3	1.23	0.615	0.3075
Masa asociada (g)	295.2	29.52	14.76	7.38
Usos del cargador	30.75	123	123	123
Energía consumida (kWh)	2.24	8.95	8.95	8.95

Fuente: Elaboración propia.

Para el escenario de 10 recargas, se contemplaron aproximadamente 30.75 usos del cargador, considerando que en cada ciclo se recargan cuatro baterías simultáneamente, sin embargo, en los escenarios de 100, 200 y 400 recargas, el número de baterías requeridas es inferior a

cuatro; por lo que, en cada evento se carga únicamente el número necesario de unidades correspondientes a cada escenario, de tal manera que el número total de usos del cargador incrementa hasta alcanzar un valor de 123.

1.6. Etapa de fin de vida de las baterías

Como estudio de caso, se consideró que las baterías evaluadas en cada uno de los escenarios son utilizadas en viviendas ubicadas en la alcaldía Azcapotzalco, Ciudad de México (CDMX). Al finalizar su vida útil, se asume que estas son transportadas al sitio de disposición final en dos recorridos claramente diferenciados. El primero consiste en la recolección de los residuos de baterías en las viviendas para su transporte a la estación de transferencia de la misma alcaldía, usando para tal fin camiones de carga trasera con compactación, con una capacidad de 8 toneladas. En esta instalación, los residuos son transferidos a tractocamiones comúnmente conocido como transfer, con una capacidad volumétrica de 90 m³, los cuales los transportan al relleno sanitario situado en Cuautitlán Izcalli, Estado de México. Las especificaciones de cada trayecto se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5
Características de los trayectos y camiones usados para el transporte de los residuos al sitio de disposición final

Característica/trayecto	Recolección en fuente-estación de transferencia	Estación de transferencia - relleno sanitario
Distancia (km)	30.0	28.3
Transporte	Camión de carga trasera	Transfer
Capacidad de carga (ton)	8.0	74.7
Consumo de combustible (L/km)	0.22	0.38

Fuente: Elaboración propia.

1.7. Análisis de ciclo de vida

Los datos obtenidos en las secciones 2.1-2.6, fueron utilizados para evaluar los impactos ambientales producidos por el uso y disposición final de las baterías, a partir de la herramienta de ACV. El análisis se llevó a cabo utilizando el software SimaPro 9.3.0.3 y la base de datos Ecoinvent 3.7.1., considerando la unidad funcional previamente definida. Se utilizó el modelo de caracterización ReCiPe 2016 Midpoint (H) versión 1.05, el cual se

destaca por analizar un total de 18 categorías de impacto, entre las que se encuentran cambio climático, eutrofización de agua, y diversas categorías de toxicidad. La evaluación en categorías permite identificar cuáles son los medios mayormente afectados durante el ciclo de vida de algún producto, y cuáles son las etapas que presentan los impactos más altos.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1. Análisis de los impactos ambientales

Para llevar a cabo la determinación de los impactos ambientales producidos a partir del uso y disposición final de las baterías se consideraron los componentes y su proporción en las masas totales de baterías, cargador (para baterías de ion-litio), empaques y el consumo de energía eléctrica para la recarga de las baterías de ion-litio. Los resultados del ACV se muestran en el Cuadro 6.

Los resultados muestran que las baterías alcalinas presentan impactos más altos que las recargables de ion-litio en 17 de 18 categorías evaluadas, siendo la toxicidad cancerígena en humanos la única categoría en la que las baterías recargables presentan un mayor impacto.

Cuadro 6
Resultados del ACV para las baterías alcalinas AA y baterías recargables

Categoría	Unidad	Batería alcalina	Batería recargable (ciclos de recarga)			
			10	100	200	400
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	22.72	8.74	5.85	5.64	5.62
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	1.25E-05	4.41E-06	2.79E-06	2.70E-06	2.66E-06
Radiaciones ionizantes	kBq Co-60 eq	3.07	0.53	0.22	0.2	0.2
Formación de ozono, salud humana	kg NO _x eq	0.08	0.03	0.02	0.02	0.02
Formación de partículas finas	kg PM _{2.5} eq	0.08	0.03	0.02	0.02	0.02
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	kg NO _x eq	0.08	0.03	0.02	0.02	0.02
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	0.21	0.07	0.03	0.03	0.03
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.03	0.01	0	0	0
Eutrofización marina	kg N eq	0.002	0	0	0	0
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	1262.46	455.29	160.01	143.51	135.37

Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB	17.3	3.8	0.82	0.65	0.57
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	22.7	5.15	1.12	0.9	0.79
Toxicidad cancerígena en humanos	kg 1,4-DCB	5.45	7.07	4.81	4.69	4.63
Toxicidad no cancerígena en humanos	kg 1,4-DCB	380.49	100.89	17.22	12.9	10.78
Uso del suelo	m ² a cultivo eq	1.15	0.35	0.19	0.18	0.18
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	1.44	0.51	0.28	0.27	0.26
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	5.88	2.35	1.58	1.5	1.51
Consumo de agua	m ³	0.5	0.11	0.05	0.05	0.04

Fuente: Elaboración propia.

Nota: (CO₂: dióxido de carbono; CFC: clorofluorocarbonos; Co: cobalto; NO_x: óxidos de nitrógeno; PM 2.5: partículas contaminantes de 2.5 diámetros; SO₂: dióxido de azufre; P: fósforo; N: nitrógeno; DCB: diclorobenceno; Cu: cobre y oil; aceite).

Las diferencias entre ambos tipos de baterías fueron considerables. Por ejemplo, en categorías como radiación ionizante, ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad marina y consumo de agua, los efectos producidos por las baterías alcalinas fueron al menos tres veces mayores, y en otras como calentamiento global, agotamiento del ozono troposférico, formación de partículas finas, acidificación terrestre y eutrofización de agua dulce, los efectos fueron al menos 2.5 mayores.

Estos resultados indican que el uso de baterías alcalinas genera impactos ambientales considerablemente mayores en las diferentes esferas del ambiente. De manera general se puede inferir que las baterías alcalinas contribuyen mayormente a producir fenómenos globales como el calentamiento terrestre, debido a emisiones de gases de efecto invernadero producidas por el procesamiento de diferentes materiales involucrados en su estructura y por la degradación de sus componentes cuando son confinados en el relleno sanitario. Así mismo, las baterías alcalinas tienen un mayor efecto en la producción de compuestos orgánicos volátiles como los clorofluorocarbonos (CFC), que degradan el ozono estratosférico. Esta degradación aumenta la fracción de radiación ultravioleta de onda corta ($280 \text{ nm} \leq \lambda \leq 320 \text{ nm}$) que incide sobre la superficie terrestre, poniendo en riesgo a la salud humana, puesto que la exposición a este tipo de radiación aumenta la probabilidad de padecer cáncer de piel, ceguera y mutaciones (Gómez, 2021).

El uso de baterías alcalinas tiene también un mayor efecto en la emisión de partículas finas y gases precursores del ozono a la atmósfera, como los óxidos de nitrógeno (NO_x). El ozono troposférico es responsable de múltiples enfermedades respiratorias en humanos como bronquitis crónica o enfisema pulmonar, además de irritación ocular y de piel (NOM-052-SEMARNAT-1993).

Las baterías alcalinas exhibieron también un mayor impacto en factores que afectan la calidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres, generando mayores efectos de ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad marina y de agua dulce y eutrofización.

Generalmente, durante las diferentes etapas del ciclo de vida de las baterías se generan descargas de metales y nutrientes como nitrógeno y fósforo a los ecosistemas terrestres y acuáticos. Algunos de los metales tienen efectos de toxicidad, mientras que los nutrientes provocan el sobre crecimiento de organismos fotosintéticos, como diferentes especies de algas. A este fenómeno se le conoce como eutrofización, y es reconocido como uno de los fenómenos de contaminación de mayor impacto en la calidad de ecosistemas marinos y de agua dulce, que induce la reducción en el nivel de oxigenación del agua, limitando el crecimiento de peces y otros organismos aerobios (Valle-López et al., 2021).

Cabe señalar que los metales presentes en las pilas alcalinas al ser ~~tan~~ químicamente estables no desaparecen del ambiente, sino que se bioacumulan (proceso por el cual la sustancia se acumula en el organismo debido a que la velocidad de ingreso de la sustancia en el organismo supera su capacidad para desecharla o degradarla) y se biomagnifican (proceso mediante el cual las sustancias se transportan de forma sucesiva a través de los eslabones de la cadena trófica); por lo tanto, a pesar de que las concentraciones de componentes tóxicos en las pilas es bajo, estos dos factores las vuelven potencialmente peligrosas (Valle-López et al., 2021).

2.2. Componentes de las baterías de mayor influencia en los impactos ambientales

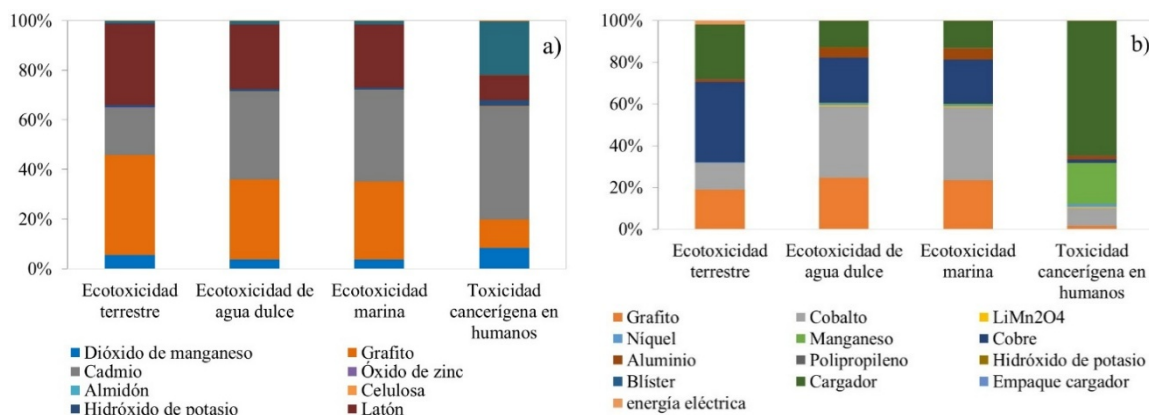
Los datos obtenidos mediante el análisis de ciclo de vida se normalizaron con el fin de hacer posible la comparación entre categorías y determinar cuáles presentaron los impactos más significativos. Los resultados indicaron que las cuatro categorías de mayor relevancia fueron: toxicidad carcinógena humana, ecotoxicidad de agua dulce,

ecotoxicidad marina y ecotoxicidad terrestre, representando el 95.2% y 97.44% del total de los impactos para las baterías alcalinas y de ion-litio, respectivamente. Esto concuerda con lo obtenido por Dolci et al. (2016), quienes reportan que entre las principales categorías de impacto en el uso de baterías se encuentran ecotoxicidad de agua dulce y toxicidad humana (carcinógena y no carcinógena), debido a la integración de metales y sustancias tóxicas en su estructura.

Para determinar qué elementos químicos, compuestos y/o materiales de las baterías generan los mayores efectos en cada una de las toxicidades, se llevó a cabo un análisis por componentes. Los resultados se presentan en las Gráficas 1a) y 1b). Para las baterías alcalinas, los componentes que producen los mayores efectos de toxicidad son el cadmio, latón, grafito y acero niquelado. El cadmio, Cd, es un metal de transición altamente tóxico; cuando es ingerido a través del agua o alimentos contaminados o bien, inhalado, se acumula entre el 5 y el 50% en los órganos blancos. La Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) lo clasifica dentro de la categoría B1 (carcinogénico) produciendo cáncer de pulmón, riñón y próstata (IARC, 2024). Se ha observado también que el Cd afecta el crecimiento, la diferenciación y la apoptosis celular, ya que este metal se une a las mitocondrias e inhibe los mecanismos básicos como lo es la fosforilación oxidativa. Aunado a esto, puede provocar toxicidad en sistemas como el esquelético, urinario, reproductor, cardiovascular, nervioso central y periférico y el respiratorio (Rafati et al., 2017; Genchi et al., 2020).

Gráfica 1

Componentes de las baterías que presentan los mayores impactos en las categorías de ecotoxicidad y toxicidad para a) baterías alcalinas, b) baterías recargables de ion-litio



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el latón, grafito y acero niquelado no se consideran materiales potencialmente tóxicos, sin embargo, el procesamiento para su obtención puede liberar al ambiente elementos altamente peligrosos como metales pesados, generando efectos indirectos de toxicidad, pues es sabido que la actividad industrial extractiva de minerales y transformación de los metales involucra factores de liberación de partículas de metales tóxicos al ambiente (Zachary et al., 2022; Dolci et al., 2016). Por ejemplo, los depósitos naturales de grafito contienen minerales de sulfuro de hierro como pirita y pirrotina. Durante el proceso de refinamiento, estas sales se pueden disolver en disoluciones acuosas ácidas, las cuales generan efectos ambientales graves si son vertidas en cuerpos de agua o en ecosistemas terrestres sin un tratamiento previo (Dolega et al., 2020). Así mismo, las aleaciones y materiales producidos a partir de las industrias extractivas y de transformación suelen contener impurezas de otros elementos que pueden presentar efectos tóxicos; como el latón, que en su composición puede contener bajas concentraciones de plomo (Patel et al., 2021).

En el caso de las baterías recargables, los efectos de ecotoxicidad terrestre, marina y de agua dulce estuvieron relacionados con el cobalto, el cobre, grafito y los componentes del cargador (polipropileno, acero inoxidable, cobre, silicio y hierro). El cobalto (Co), es reconocido por ser un elemento altamente peligroso, teniendo efectos ecotóxicos sobre diferentes especies como en la lenteja de agua (*Lemna minor*) y los mosquitos (*Chironomus tentans*), con concentraciones letales medias (CL50) de 90.1 a 157 000 μg -

Co/I (Stubblefield et al., 2020). Igualmente, la exposición prolongada a Co en humanos puede provocar miocardiopatías, neuropatía periférica, pérdida de visión y enfermedades respiratorias (Chen y Lee, 2023). La IARC clasifica al Co en el grupo 2B (posiblemente carcinógenos), pudiendo afectar órganos como el corazón, hígado, tiroides, riñón y causar fibrosis pulmonar (IARC, 2024).

El grafito, el cobre y los componentes del cargador no exhiben niveles altos de toxicidad. Sin embargo, como se comentó anteriormente, los procesos extractivos y de transformación para su obtención pueden generar diferentes efectos ecotóxicos y de toxicidad en humanos. En este sentido, la inclusión de estos elementos en la estructura interna de las baterías recargables puede ser un factor en su efecto de toxicidad carcinógena en humanos (Cuadro 6).

2.3. Efecto del número de ciclos de recarga en los impactos ambientales y en la generación de residuos

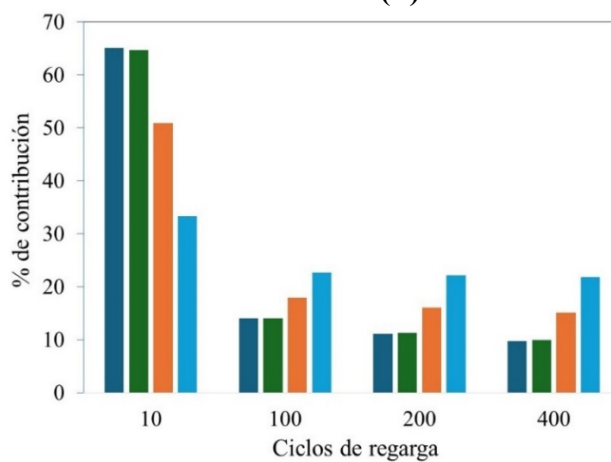
En el presente estudio se plantearon cuatro escenarios de uso de las baterías recargables, basados en el número de veces que son recargadas. El escenario más conservador consideró 10 ciclos de recarga, mientras que en el extremo opuesto se consideró el límite máximo de uso de las baterías recomendado por el fabricante, equivalente a 400 ciclos. En la Gráfica 2 se presenta el efecto del número de recargas en los impactos de las cuatro categorías más importantes descritas en la sección 2.2.

Es posible observar que con el incremento en el número de recargas se reducen considerablemente los impactos ambientales, teniéndose el mayor efecto cuando el número de recargas aumenta de 10 a 100, con una reducción promedio del $36.3 \pm 19.0\%$ en los impactos. Por otra parte, con el incremento a 200 y 400 ciclos, el efecto no es considerable, disminuyendo únicamente en un $2.5 \pm 1.9\%$ en promedio.

La información descrita indica que, desde la perspectiva ambiental, es recomendable someter las baterías de ion-litio al menos a 100 ciclos de recarga, con lo cual se logra una reducción en todos los impactos analizados con respecto al escenario de uso más conservador (cuadro 6). De esta forma, se puede inferir que con el incremento en el número de recargas se hace más visible la diferencia entre los impactos de las baterías alcalinas y de ion litio (gráfica 2).

Gráfica 2

Efecto del número de ciclos de recarga en las categorías de: ecotoxicidad de agua dulce (■), ecotoxicidad marina (■), ecotoxicidad terrestre (■) y toxicidad cancerígena en humanos (■)



Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar el número de ciclos de recarga se requiere una menor cantidad de baterías para proporcionar la energía del flujo de referencia, de tal forma que en el escenario de un solo uso se requieren 122.85 baterías para proporcionar 1 kWh, y cuando se consideran 400 ciclos de recarga únicamente se requieren 0.31 unidades de baterías. Este factor incide de forma directa en la masa total de residuos que se produce para cada escenario, la cual incluye las baterías mismas al fin de su vida, los empaques y el cargador. En este sentido, se evaluó el efecto del número de recargas sobre la producción de residuos, los resultados se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7
Masa de residuos producida en cada escenario

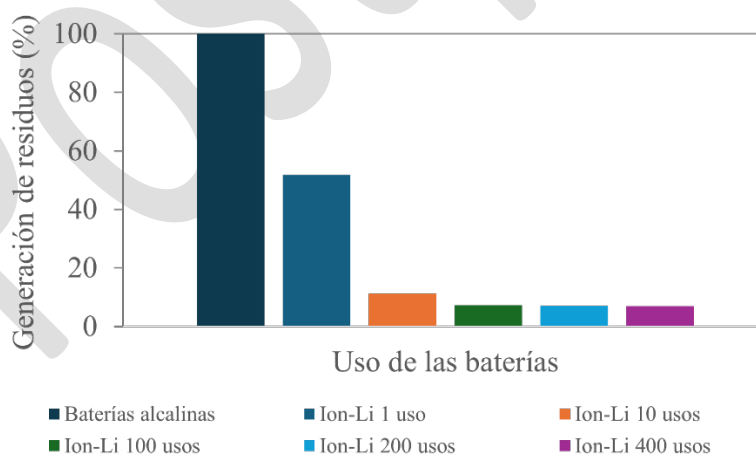
Categoría	Baterías alcalinas	Baterías ion-litio (ciclos de recarga)				
		1	10	100	200	400
Baterías (g)	6,969.0	2,952.0	295.2	29.5	14.8	7.4
<i>Empaque de baterías</i>						
Cartón (g)	303.0	123.0	12.3	1.2	0.6	0.3
Plástico	151.5	61.5	6.2	0.6	0.3	0.2
Cargador (g)	---	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3
<i>Empaque cargador</i>						
Papel (g)		1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Cartón (g)		4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
Plástico (g)		20.6	20.6	20.6	20.6	20.6
Masa total de residuos (g)	7,423.5	3,233.1	410.2	127.9	112.3	104.4

Fuente: Elaboración propia.

Para las baterías alcalinas, la masa total de residuos que se produce al término de su vida fue de 7.4 kg. Este valor fue considerablemente mayor a la masa de residuos producida por las baterías recargables, aun considerando un solo uso, que fue de 3.2 kg. Por otra parte, la producción total de residuos producida por las baterías de ion-litio disminuye proporcionalmente con el número de ciclos de recarga, alcanzando el mínimo en el escenario de 400 recargas, en el que se producen únicamente 0.104 kg (Cuadro 7).

Para analizar de una forma más eficiente la reducción en la producción de residuos que se obtiene con el uso de baterías recargables, se consideró como referencia la masa de residuos de las baterías alcalinas (100%). En la gráfica 3 se muestra que el escenario de un solo uso de las baterías recargables produce el 53% de los residuos asociados a las baterías alcalinas, lo cual se debe al menor número de unidades de baterías de ion-litio que se requieren para proporcionar la energía de la unidad funcional (1 kWh) (Cuadro 1). Esta diferencia se incrementa cuando aumenta el número de recargas, de tal forma que con 400 recargas se produce sólo el 6.97% de los residuos producidos con las baterías alcalinas, lo que acentúa los beneficios ambientales obtenidos cuando se incrementa el número de recargas de las baterías de ion-litio.

Gráfica 3
Generación porcentual de residuos tomando como referencia la masa total producida



Fuente: Elaboración propia.

2.4. Efectos ambientales en la etapa de fin de vida

Los impactos generados durante la etapa de fin de vida de las baterías también se evaluaron. Estos comprenden los efectos producidos por su recolección y transporte, desde la fuente en donde son usadas hasta el relleno sanitario, y por su disposición final en este sitio; los resultados de la caracterización de impactos se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7
Resultados de la evaluación de impactos ambientales en la etapa de fin de vida

Categoría de impacto	Unidad	Batería alcalina	Batería de ion-litio (10 recargas)	Batería de ion-litio (400 recargas)
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	6.92E-02	2.92E-03	7.37E-05
Formación de ozono troposférico	kg NO _x eq	2.97E-04	1.26E-05	3.17E-07
Formación de partículas finas	kg PM _{2.5} eq	8.72E-05	3.68E-06	9.29E-08
Formación de ozono	kg NO _x eq	3.04E-04	1.28E-05	3.24E-07
Eutroficación de agua dulce	kg P eq	1.43E-05	6.05E-07	1.53E-08
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	1.17E+00	4.95E-02	1.25E-03
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB	1.49E-03	6.30E-05	1.59E-06
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	2.61E-03	1.10E-04	2.78E-06
Toxicidad humana cancerígena	kg 1,4-DCB	3.09E-03	1.31E-04	3.30E-06
Agotamiento de recursos minerales	kg Cu eq	1.53E-04	6.47E-06	1.63E-07
Agotamiento de recursos fósiles	kg petróleo eq	2.35E-02	9.94E-04	2.51E-05
Consumo de agua	m ³	1.28E-04	5.41E-06	1.36E-07

Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos indican que los efectos producidos por las baterías alcalinas en la etapa de fin de vida son mayores que los de las baterías recargables en todas las categorías de estudio, con una diferencia promedio del 68.22%. Este efecto probablemente está relacionado con el hecho de que se requiere un mayor número de baterías alcalinas que recargables para suministrar 1 kWh (unidad funcional), lo cual se asocia de forma directa con una mayor masa de residuos que pueden generar efectos no deseados en el ambiente y en la salud humana cuando son dispuestos en el relleno sanitario. Cuando los dispositivos son confinados en el relleno sanitario, las condiciones de humedad y temperatura pueden provocar la degradación de la carcasa de las baterías, conduciendo a la liberación al ambiente de los electrolitos y metales pesados contenidos en su estructura interna. Posterior a su liberación, estos elementos se pueden percolar a través del suelo y llegar hasta los mantos acuíferos,

contaminando suministros de alimentos y de agua hasta hacerlos insalubres para el consumo humano y la vida silvestre (Kuchhal y Sharma, 2019).

Por otra parte, se volvió a observar una reducción en los impactos con el incremento en el número de recargas de las baterías de ion-litio durante la etapa de fin de vida. De esta forma, con el incremento de 10 a 400 recargas se reducen los impactos 36.96 veces, lo que indica que recargar las baterías el mayor número de veces posible, considerando las recomendaciones del fabricante, es un factor relevante en la reducción de los impactos ambientales producidos en las distintas etapas del ciclo de vida de las baterías de ion-litio.

PROSPECTIVA

En nuestros días, las baterías constituyen uno de los productos complementarios de mayor uso, siendo las del tipo AA uno de los más comunes en dispositivos electrónicos portátiles. Su uso masivo, ha despertado preocupación sobre los impactos ambientales que se pueden producir durante las diferentes etapas de su ciclo de vida. Esto se fundamenta en que, para su fabricación es necesaria la extracción y procesamiento de metales pesados y recursos no renovables, mientras que durante la etapa de uso de las baterías recargables AA se requiere de energía eléctrica, la cual en nuestro país es producida mayoritariamente a partir del consumo de combustibles fósiles. Así mismo, al término de su vida útil (etapa comúnmente conocida como fin de vida), las baterías rara vez son sometidas a un proceso de recuperación y reciclaje, por lo que su destino final más común es en rellenos sanitarios, donde las condiciones de humedad y temperatura pueden provocar la liberación de los componentes tóxicos contenidos en su estructura. De esta forma, se infiere que el uso y disposición final de baterías AA puede tener impactos significativos en el ambiente, por lo que su evaluación y cuantificación, a partir de un análisis objetivo resulta de alta relevancia para promover decisiones informadas en consumidores y fabricantes. En este sentido, el presente artículo contribuye a la difusión del conocimiento al determinar y comparar los impactos al ambiente y a la salud producidos por el uso de baterías alcalinas y recargables de ion-litio en presentación AA, contribuyendo a identificar cuál es la alternativa más conveniente

CONCLUSIONES

El presente estudio presenta la evaluación de los impactos ambientales producidos por el uso y disposición final de baterías alcalinas y recargables de ion-litio en presentación AA. Los

resultados indican que las baterías recargables generan impactos considerablemente menores que las baterías alcalinas en 17 de 18 categorías evaluadas, por lo que representan una alternativa más sostenible.

Los principales efectos ambientales en ambos tipos de baterías se observaron en las categorías de ecotoxicidad en ecosistemas terrestres, marinos y de agua fresca, así como toxicidad carcinógena en humanos. Esto se debe a que la estructura interna de las baterías está compuesta por algunos metales tóxicos, además que durante las etapas de extracción y transformación de otros materiales también se liberan materiales nocivos.

Es recomendable el uso de baterías recargables hasta agotar su vida útil. Esto permite reducir de forma considerable los impactos ambientales y la cantidad de residuos transportada a los sitios de disposición final. En concreto, recargar las baterías de ion-litio 400 veces genera una disminución promedio en los impactos del 56.7% con respecto al escenario en que sólo se recargan 10 veces, así como una reducción del 97.5% en la masa total de residuos transportados y confinados en el relleno sanitario.

Cabe resaltar que en este estudio no se consideraron las pilas alcalinas que entran de manera ilegal a nuestro país, es decir, pilas “piratas” pues no reportan la información necesaria para incluirlas en el análisis, pero intuimos que el efecto en la ecotoxicidad será mayor.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la M.C. Griselda González Cardoso de la Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Azcapotzalco por brindar a los autores el acceso al programa SIMAPRO para realizar el análisis de ciclo de vida. Así mismo, se agradece al Comité Editorial por la oportunidad de publicar este trabajo y a los árbitros por el valioso proceso de revisión, que contribuyó a mejorar la calidad del manuscrito.

REFERENCIAS

Chen, R. J., & Lee, V. R. (2023). Cobalt toxicity. *StatPearls Publishing*.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587403/>

Dolci, G., Tua, C., Grosso, M., & Rigamonti, L. (2016). Life cycle assessment of consumption choices: A comparison between disposable and rechargeable household

batteries. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1691–1705.

<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1134-5>

Dolega, P., Buchert, M., & Betz, J. (2020). *Environmental and socio-economic challenges in battery supply chains: Graphite and lithium*. (short study prepared within the framework of the BMBF joint project Fab4Lib; report). Öko-Institut e.V.

<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Graphite-Lithium-Env-Soc-Eco-Challenges.pdf>

Finnveden, G., & Potting, J. (2014). Life cycle assessment. In P. Wexler (Ed.), *Encyclopedia of Toxicology* (3rd ed., pp. 74-77). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00627-8>

Gavilán, G. A., Rojas, B. L., & Barrera, C. J. (2009). *Las pilas en México: Un diagnóstico ambiental*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/libros2009>

Genchi, G., Carocci, A., Graziantonio, L., Sinicropi, M. S., & Catalano, A. (2020). Nickel: Human health and environmental toxicology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 679. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030679>

Gómez, Z. F. (2021). *Situación actual de las baterías de ion-litio para almacenamiento de energía eléctrica* [Trabajo de fin de grado, Universidad de Jaén]. CREA: Colección de Recursos Educativos Abiertos. <https://crea.ujaen.es/handle/10953.1/14575>

Haya, L. E. (2016). *Análisis de ciclo de vida* [Tesis de maestría, EOI Escuela de Organización Industrial]. Savia. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

IARC (International Agency for Research on Cancer). (2024). *Aspartame, methyleugenol, and isoeugenol*. (Vol. 134). IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. <https://publications.iarc.who.int/627>

Kuchhal, P., & Sharma, U. C. (2019). *Environmental science and engineering. Vol. 5: Solid waste management*. Studium Press LLC.

International Organization for Standardization. (s.f.). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework* (2nd ed.).

<https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>

LPGGIR. (2023). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*.

Cámara de Diputados. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPGGIR.pdf>

Ortez, A., & Parada, K. R. (2008). *Propuesta para la gestión ambiental de pilas y baterías fuera de uso en El Salvador* [Trabajo de grado, Universidad del Salvador].

<https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/2620/>

Patel, V. K., Panara, K., & Acharya, R. (2021). Ayurveda intervention for brass-induced heavy metal toxicity: A report from the single-arm pilot study. *Journal of Ayurveda and Integrative Medicine*. <https://doi.org/10.1016/j.jaim.2021.06.020>

Rafati, R. M., Rafati, R. M., Kazemi, S., & Moghadamnia, A. A. (2017). Cadmium toxicity and treatment: An update. *Caspian Journal of Internal Medicine*, 8(3), 135-145.

<https://doi.org/10.22088/cjim.8.3.135>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). *NOM-053-SEMARNAT-2013: Procedimiento para determinar la toxicidad de un residuo peligroso para el ambiente*.

Steren. (2024, 16 de octubre). *Steren*.

https://www.steren.com.mx/?srsltid=AfmBOoofu_YiZtP9HEsbEgacm9zOSjASsu4FtvkSni sLY_XhODPpukPS

Stubblefield, W. A., Van Genderen, E. A., Cardwell, A. S., Heijerick, D. G., Janssen, C. J., & Schamphelaere, K. A. C. (2020). Acute and chronic toxicity of cobalt to freshwater organisms: Using a species sensitivity distribution approach to establish international water quality standards. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 39(4), 799-811.

<https://doi.org/10.1002/etc.4662>

Thompson, D. L., Hartley, J. M., Lambert, M. S., Shiref, M., Harper, G. D. J., Kendrick, E., Anderson, P., Ryder, K. S., Gaines, L., & Abbott, A. P. (2020). The importance of design in lithium-ion battery recycling: A critical review. *Green Chemistry*, 22, 7585.

<https://doi.org/10.1039/d0gc02745f>

Valle-López, F. L., Moreno-Sánchez, X. G., Irigoyen-Arredondo, M. S., Abitia-Cárdenas, L. A., Marín-Enríquez, E., & Ramírez-Pérez, J. S. (2021). Feeding habits of the spotted rose snapper, *Lutjanus gattatus* (Actinopterygii, Perciformes, Lutjanidae), in the central Gulf of California, BCS, Mexico. *Revista Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 51(1), 95-105.

Zachary, J., Baum, R. E., Bird, X. Y., & Jia, M. A. (2022). Lithium-ion battery recycling: Overview of techniques and trends. *ACS Energy Letters*, 7(2), 712-719.
<https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c02602>

CC BY-NC-ND

Postprint