

## Capítulo

# Seguridad y Defensa Sostenibles: Un Enfoque desde la Calorimetría y la Economía Circular

Camilo Ernesto Franco Urrea  
Estudiante, ESDEG

Myriam Andrea Escobar Alfonso  
Estudiante, ESDEG

**Resumen:** Esta revisión sistemática de literatura examina cómo las técnicas calorimétricas, como la microcalorimetría o el flujo de calor, permiten evaluar la estabilidad térmica y predecir la vida útil residual de propelentes mono-base, doble-base y modificados. Al integrarlas dentro de un marco de economía circular, se proponen estrategias proactivas que anticipan los procesos de degradación, mitigan riesgos de autoignición y extienden el uso seguro de las municiones. Este enfoque supera la logística inversa tradicionalmente usada en las Fuerzas Militares colombianas, al habilitar un monitoreo continuo o periódico, reducir costos operativos y minimizar el impacto ambiental. La revisión realizada contribuirá a promover la resiliencia logística y fortalecer la disponibilidad operativa, alineando las prácticas de seguridad y defensa con principios de sostenibilidad y regeneración de recursos.

**Palabras clave:** Calorimetría; Defensa; Economía Circular; Municiones; Propelentes.

**Camilo Ernesto Franco Urrea**

Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Magister en Dirección General, Universidad Metropolitana de Educación, Ciencia y Tecnología “UMECIT”, Panamá. Estudiante, ESDEG, Colombia. <https://orcid.org/0009-0007-6184-3844>. - Contacto: [camilo.francou@esdeg.edu.co](mailto:camilo.francou@esdeg.edu.co)

**Myriam Andrea Escobar Alfonso**

Contadora Publica, Universidad de la Salle, Colombia. Especialista en Logística, Escuela Almirante Padilla, Colombia. Estudiante, ESDEG, Colombia. <https://orcid.org/0009-0007-5023-4322>. - Contacto: [myriam.escobar@esdeg.edu.co](mailto:myriam.escobar@esdeg.edu.co)

## [T1] Introducción

La logística militar colombiana enfrenta un desafío ineludible: el envejecimiento y vencimiento del material reservado (Redacción El País, 2025). Los activos estratégicos requieren mecanismos que anticipen su degradación antes de comprometer la operatividad y la seguridad. Esta estrategia cobra relevancia especial, luego del hallazgo de municiones y armamento con fechas de caducidad superadas en el 2025, que motivó la orden presidencial de renovar el parque bélico del Ejército Nacional (Agencia EFE, 2025; Redacción Judicial El Espectador, 2025; SWI, 2025).

La calorimetría ofrece una ventana única para evaluar parámetros clave de degradación en municiones y materiales energéticos (MYME), al medir su estabilidad térmica, seguridad operativa y vida útil remanente (CNAD Ammunition Safety Group, 2004; Đokić et al., 2024; Ghosh et al., 2021; Núñez-Regueira et al., 2004; Svensson et al., 2009). Al integrar estas técnicas metrologías térmicas dentro de un marco de Economía Circular (EC), que incluye la medición de flujos de materiales e indicadores de sostenibilidad como tasas de recuperación y la eficiencia de reparación, se produce un sistema integrado capaz de gestionar recursos de forma circular y resiliente (Liggins, 2024; Núñez-Cacho Utrilla & Górecki, 2023). Este enfoque no solo mejora la trazabilidad de cada lote, sino que fortalece la capacidad de decisión estratégica, al conectar datos térmicos con métricas de desempeño ambiental y logístico (Đokić et al., 2024; Namir et al., 2021).

Para abordar esta cuestión, este capítulo se propone analizar el estado actual de la calorimetría como herramienta para evaluar la estabilidad de los materiales reservados, con enfoque en la seguridad y defensa de las Fuerzas Militares (FF.MM). Para ello, se realizó una revisión sistemática de la literatura bajo la metodología PRISMA 2020 (Chocobar Reyes & Barrera Medina, 2025; Page et al., 2021). Esta investigación adoptó un enfoque de revisión sistemática para recopilar información en las siguientes fuentes especializadas y bases de datos: Semantic Scholar, repositorios universitarios, DBpia, SciELO Brasil, MedCrave Online, páginas web localizadas con la IA Scholar de ChatPDF y Wiley. La

búsqueda se guio por la pregunta: ¿Qué estrategias fortalecen la calorimetría en la economía circular como eje base de la seguridad y defensa?. Se definieron palabras y frases clave como “calorimetr\*”, “heat Flow calorimetr\*”, “microcalorimetr\*”, “propellant\*”, “munition\*”, “shelf life”, “ageing”, “circular economy” y “reverse logistics”, y se construyó una ecuación de búsqueda estructurada, así: (calorimet\* OR “heat flow calorimetr\*” OR microcalorimetr\*) AND (propellant\* OR munition\*) AND (“shelf life” OR ageing) AND (“circular economy” OR “reverse logistics”).

El proceso de selección de artículos incluyó la identificación de 56 documentos, de los cuales 55 fueron únicos o no duplicados. Los criterios de inclusión fueron: estudios que aplican técnicas calorimétricas a MYME, que incorporan principios de economía circular al material reservado y que reportan indicadores de vida útil o métricas circulares. Mientras que los criterios de exclusión fueron: trabajos sobre explosivos no militares, sin método reproducible, sin aplicación a la seguridad de municiones, actas de congresos y libros. Al evaluar los 55 artículos, solo 9 de ellos cumplieron los criterios y fueron publicados en revistas de alta calidad, ubicadas en los cuartiles Q1 y Q2, para el análisis sistémico.

A continuación se abordará la obsolescencia y vencimiento de las MYME en la logística militar colombiana, así como los altos costos de la Logística Inversa (LI) tradicionalmente empleada en las FF.MM. Se propondrá un enfoque circular y calorimétrico que, mediante técnicas calorimétricas como HFC y TAM, evalúa estabilidad térmica y predice la vida útil de materiales energéticos. Se presentará un modelo de cinco fases que integra calorimetría y EC para pasar de una disposición reactiva a una gestión proactiva, optimizando recursos, reduciendo costos y minimizando impactos ambientales. Finalmente, se extrapolarán los beneficios económicos y ambientales respaldados con información tomada de SECOP II y suministrada por el instituto TNO en el marco de un estudio de alternativas tecnológicas desarrollado por la Armada Nacional.

## [T1] Vida Útil y Obsolescencia de Municiones: Un Enfoque Circular y Calorimétrico

En las últimas décadas, la seguridad y defensa se han consolidado como ejes estratégicos para salvaguardar la integridad estatal y proteger a la ciudadanía (Matres Manso, 2025; Miranda, 2023; Salamanca-Rodríguez et al., 2022). Este escenario exige modelos de gestión innovadores, donde la EC sea clave (MDN, 2023). La EC busca maximizar el valor de productos y recursos mediante reducción, reutilización, reciclaje y recuperación (Circle Economy, 2021; Ellen MacArthur Foundation, 2020). En las FF.MM de Colombia, su adopción optimiza la gestión y prolonga la vida útil de recursos críticos como las municiones. Sin embargo, la obsolescencia del material reservado genera limitaciones operacionales y riesgos para el personal, como indicó el señor Almirante Francisco Cubides en entrevista concedida al diario El País (Redacción El País, 2025), situación que ha escalado al ámbito político y ha motivado la intervención de entes de control (Agencia EFE, 2025; Contraloría General de la República, 2025; Redacción Judicial El Espectador, 2025; SWI, 2025). Implementar acciones basadas en la EC permitiría mitigar impactos logísticos y financieros (Liggins, 2024; Mora & Rodríguez, 2022; Núñez-Cacho Utrilla & Górecki, 2023).

En otros sectores a nivel global, técnicas relacionadas con la EC han generado resultados cuantitativos relevantes, como la reducción del 40% en bienes nuevos, el aumento del 60% en la reutilización de recursos y la disminución del 65% en los desechos (Vera Calderón et al., 2024). El uso de indicadores de sostenibilidad (KPIs) permite identificar oportunidades de optimización, lo que podría reducir el uso per cápita de recursos entre 5 a 6 toneladas (Dussi & Flores, 2018). Esto evidencia que la integración de técnicas de medición y gestión de flujos, análogas a la calorimetría aplicada, puede fortalecer la EC al incentivar el reúso seguro del material, así como la logística, la capacidad de respuesta y seguridad en contextos de defensa (Queiroz, et al., 2024).

Históricamente, la LI ha sido la modalidad predominante en las FF.MM colombianas para la disposición final de municiones obsoletas o vencidas: mediante procesos especializados se neutralizan componentes activos y gestionan los residuos (Amézquita Sanabria, 2024; Castañeda Rueda, 2022; Durán De las Salas et al., 2018). Sin embargo, esta modalidad presenta altos costos y complejidad, haciendo imperativo explorar alternativas más eficientes que integren la EC de manera proactiva y regenerativa. La tabla 1 ilustra algunos de estos altos costos asociados a los procesos de LI realizados por el Ejército y la Armada de Colombia, mediante los cuales se buscó neutralizar (desmilitarizar) el material reservado y aprovechar residuos útiles mediante el reciclaje, como son las vainillas.

**Tabla 1.** *Procesos de neutralización de material reservado realizados por el Ejército y la Armada de Colombia*

Entidad Contratante	Número y Año del Proceso	Objeto del Contrato	Valor del Contrato (COP)	Componentes Clave que Demuestran el Alto Costo
Ejército Nacional	EP-067-SUADQ-ARM-2024	Depuración de inventarios de armamento a desmilitarizar y destruir, no apto para readaptación o reparación.	\$ 749.603.041	Logística especializada para desintegración, transporte seguro y disposición ambiental del material.
Armada Nacional	0047-ARC-CBNL6-2023	Desmilitarización de munición, fundición y destrucción de armamento menor y equipo electrónico obsoleto.	\$1.030.000.000	Desensamble en sitio con personal calificado y supervisión militar para inutilización total del material.
Armada Nacional	0163-ARC-CBN6-2020	Destrucción de armamento y desmilitarización	\$145.000.000	Transporte especializado y gestión con gestor final certificado para fundición y destrucción completa.
Armada Nacional	0220-ARC-CBNL6-2021	Desmilitarización de munición obsoleta, fundición y disposición de desechos.	\$1.284.954.119	Uso de expertos de INDUMIL, hornos de detonación, gestión de residuos tóxicos y certificados que liberan responsabilidades.

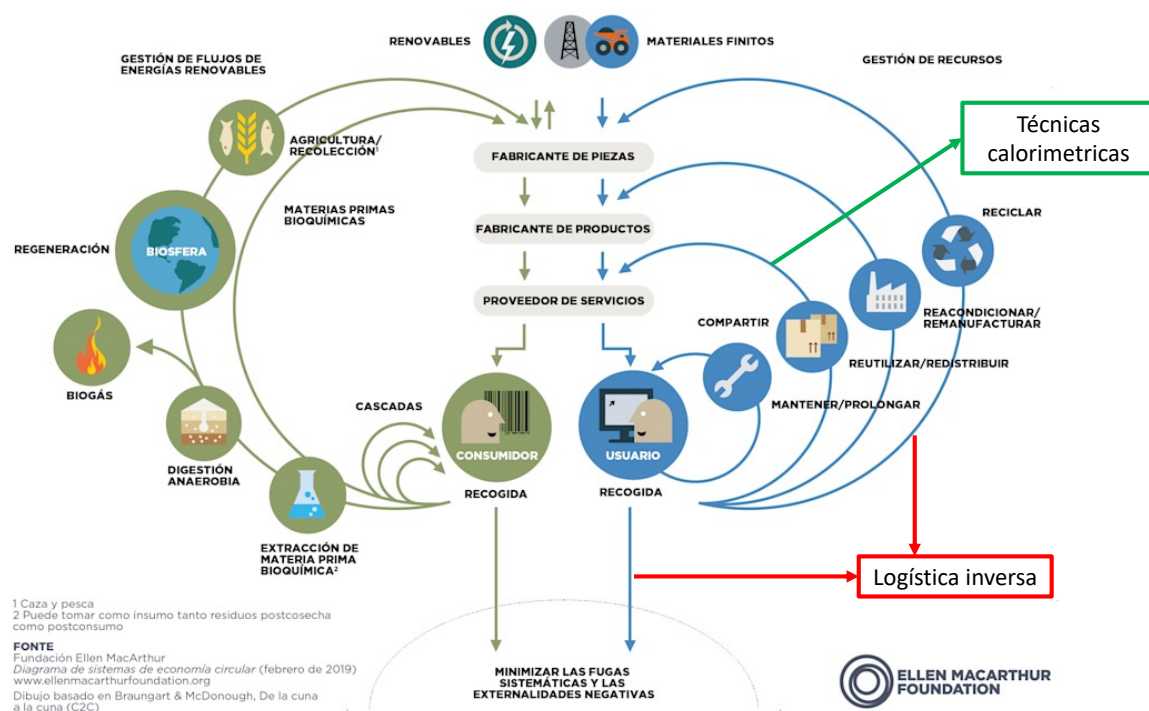
*Fuente:* elaboración propia con base en la información contenida en el SECOP II.

En este sentido, las técnicas calorimétricas emergen como un vector innovador que puede transformar la forma en que se gestionan los materiales energéticos en el sector militar (Đokić et al., 2024). La integración de técnicas de medición de flujos propias de la calorimetría e indicadores de sostenibilidad pueden optimizar la gestión de recursos, fortaleciendo la aplicación de la EC en el sector seguridad y defensa. En el ámbito de la defensa existen iniciativas de remanufactura, reparación, gestión del ciclo de vida y manufactura avanzada (v.g. la impresión 3D), que mejoran la resiliencia operativa y reducen las vulnerabilidades en la cadena de suministros (Queiroz et al., 2024). Es en esta intersección donde la calorimetría, entendida como la rama de la metrología dedicada a medir el calor liberado o absorbido en procesos físicos y químicos, ha demostrado ser una herramienta esencial tanto en ámbitos industriales como militares (CNAD Ammunition Safety Group, 2004; Đokić et al., 2024; Ghosh et al., 2021; Núñez-Regueira et al., 2004; Svensson et al., 2009). Su aplicación en el análisis de la estabilidad térmica y el rendimiento energético de materiales bélicos permite prever y mitigar riesgos asociados a la degradación química y la autoignición de los propelentes, permitiendo una evaluación objetiva de la vida útil de los materiales energéticos (Đokić et al., 2024).

## **[T2] La Calorimetría como Herramienta Clave para la Estabilidad de Materiales Energéticos.**

El paradigma del “ciclo de la mariposa” propuesto por la Ellen MacArthur Foundation, fomenta mantener la circulación y uso de productos y materiales para preservar su valor y reducir la generación de residuos (Ellen MacArthur Foundation, 2020; 2021). Siguiendo este paradigma, el uso de la calorimetría permite evaluar el estado residual de los propelentes (Đokić et al., 2024; Namir et al., 2021). Esto, a su vez, facilita el uso prolongado, continuo, seguro y sostenible de las municiones superando la dependencia de la LI para neutralizar material reservado, el reciclaje del material útil y disposición final (Amézquita Sanabria, 2024).

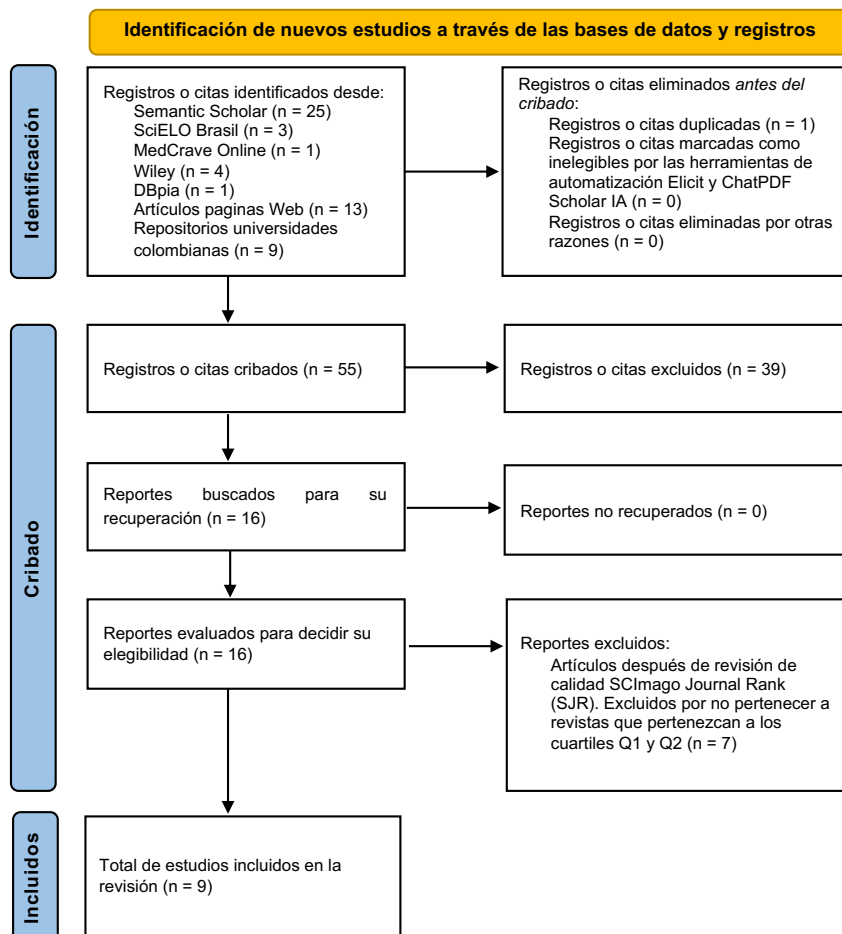
**Figura 1.** Mariposa de la economía circular.



*Fuente:* Tomado de Ellen Macarthur Foundation, 2021.

Por lo tanto, la calorimetría se puede usar para evaluar la estabilidad térmica, la seguridad y la vida útil de MYME mediante la medición directa de parámetros críticos en la degradación de dichos materiales. Este enfoque está respaldado con diversos estudios que describen técnicas variadas para determinar la seguridad de los materiales energéticos. Afianzando la relevancia de los materiales energéticos y la necesidad de uso seguro como punto de partida, para la consulta y selección de los estudios descritos, se llevó a cabo una búsqueda en fuentes especializadas: Semantic Scholar, repositorios de universidades colombianas, DBpia (base de datos académica de Corea), SciELO Brasil, MedCrave Online y Wiley, además de artículos y documentos disponibles en páginas web localizadas usando Scholar IA de ChatPDF, dando como resultado 56 artículos. De ellos, se encontró uno duplicado, generando 55 documentos para revisión final como se ilustra en la figura 2.

**Figura 2.** Diagrama de selección de artículos según metodología PRISMA 2020



*Fuente:* Elaboración propia usando la información de Chocobar Reyes & Barreda Medina y usando el formato de PRISMA Executive.

Para delimitar la revisión se empleó la plataforma Rayyan (Herramientas para Investigación en Salud, 2022), con el objetivo de incluir únicamente estudios vinculados con calorimetría, propelentes o municiones y descartar aquellos que no aportaran al análisis. Así, se definieron criterios de inclusión (IN) para investigaciones que aplican técnicas calorimétricas a municiones, explosivos o propelentes, que integran principios de EC al material analizado y que reportan indicadores de vida útil o métricas circulares. Los

criterios de exclusión (OUT) para los artículos fueron que evaluaran explosivos no militares, trabajos sin un método reproducible o sin aplicación en seguridad de municiones, así como actas de congresos y libros. Al finalizar este filtrado se descartaron 39 documentos, quedando una muestra final de 16 artículos.

Así mismo, se definió que los artículos seleccionados para análisis debían cumplir como mínimo con el siguiente criterio de calidad basado en la plataforma de búsqueda Scimago Journal: artículos de revistas que pertenecen a los cuartiles Q1 y Q2. Lo anterior hace referencia a que tan alta es la calidad de las revistas elegidas. Siguiendo este criterio de los 16 artículos, fueron seleccionados 9 artículos para la revisión final. A continuación, se presenta un resumen de los datos extraídos de cinco categorías evaluadas en la literatura:

**Tabla 2.** *Datos extraídos cinco categorías evaluadas*

<b>Autores</b>	<b>Metodología empleada</b>	<b>Técnicas y parámetros de calorimetría</b>	<b>Composición del propelente</b>	<b>Parámetros estimación vida útil</b>	<b>Conclusiones relacionadas con la estabilidad y la seguridad</b>
Wani et al., 2012	Experimental DMA	Análisis Mecánico Dinámico (DMA) usando DMA Q800, temperatura entre -80 a +80 °C. 3,5/11/35 Hz, principio TTS	HTPB, aluminio, perclorato de amonio.	3/6/10 años, umbral depende del módulo de encapsulado propelente.	Deterioro módulo de encapsulado señala fin de vida útil; método DMA eficaz.
Boers & de Klerk, 2005	Experimental HFC y HPLC	Microcalorímetro HFC a 85 °C, envejecimiento a 65/85°	228% NC, 21% NG, 49% nitroguanidina EC, Akardite II, DPA, MNA	10 años (STANAG 4117)	HFC supera HPLC al medir generación de calor
de Klerk, 2015	Experimental según método NATO HFC	HFC para energía de descomposición	Nitrocelulosa con diphenilamina y plastificantes	Extrapolación por temperatura y oxígeno	HFC óptimo y estándar NATO

<b>Autores</b>	<b>Metodología empleada</b>	<b>Técnicas y parámetros de calorimetría</b>	<b>Composición del propelente</b>	<b>Parámetros estimación vida útil</b>	<b>Conclusiones relacionadas con la estabilidad y la seguridad</b>
Bunyan et al., 2003	Experimental calorimetría de conducción y DSC	DSC-30 (~200 °C); conducción 40–90 °C, detección < 1 μW	PBX con RDX en polímero de propileno, diversos propulsores	Inferida por tasas de descomposición lenta	Requiere combinar técnicas para evaluar estabilidad explosivos
Krabbendam-La Haye et al., 2003	Experimental PVST, TG y DSC (STANAG 4147)	TG 2 °C/min (N <sub>2</sub> /aire), DSC 2 °C/min, PVST 100 °C/40 h	Propelentes simple y doble base; RDX, TNT, HMX, PETN; aditivos	No predice vida útil explícita	PVST más fiable; TG/DSC a veces difieren; ciertas mezclas incompatibles
Defanti et al., 2020	Experimental HFC, HPLC y GPC	HFC a 85 °C por 6 d (simula 10 años), analiza flujo y calor total	Nitrocelulosa con metil/etil centralita	Usan criterios de NO <1.8 mL/g y estabilizador >20% para seguridad.	Propiedades balísticas no siempre reflejan estabilidad química
Jawale et al., 2013	Experimental calorímetro de bomba	Parr bomb a 5–30 atm, N <sub>2</sub> , Ar, O <sub>2</sub> , aire; correcciones por ignición	AP, polvo de aluminio, HTPB; cordita	No aborda vida útil	UHP-N <sub>2</sub> /Ar y UHP-N <sub>2</sub> ofrecen valores reales; otros gases inflan mediciones
Trache & Khimeche, 2013	Experimental DSC con modelos cinéticos Kissinger y Ozawa	Uso modelo de DSC 8000, temperatura 50–300 °C, calentamientos 5-30 °C/min bajo nitrógeno	52 % NC, 30 % NG, 2.5 % MC, aditivos	Van't Hoff (F=3.5) y STANAG 4117	Predicción coincide con datos experimentales; útil para planificación
Elbasuney et al., 2019	Experimental TAM III y DSC	TAM III mide flujo de calor isotérmico a 90°C por 3.43 días (equivale a 10 años a	Nitrocelulosa, nitroglicerina y 10–20 % RDX	Flujo ≤ 350 mW/g, estimación vida	RDX mejora estabilidad; TAM III eficaz para evaluación rápida

Autores	Metodología empleada	Técnicas y parámetros de calorimetría	Composición del propelente	Parámetros estimación vida útil	Conclusiones relacionadas con la estabilidad y la seguridad
		25°C). DSC hasta 350 °C		hasta 56 años (STANAG 4582)	

*Fuente:* elaboración propia con base en la información contenida en los artículos para revisión sistémica.

El análisis de la Tabla 2 revela que la calorimetría a través de diversas técnicas es útil para evaluar la estabilidad y predecir la vida útil de materiales energéticos en seguridad y defensa. Por ejemplo, el Análisis Mecánico Dinámico (DMA) se muestra eficaz para detectar el deterioro del encapsulado de propelentes, señalando el fin de su vida útil en rangos de 3 a 10 años (Wani et al., 2012). La calorimetría de flujo de calor (HFC), por su parte, supera a otras técnicas como HPLC en la medición de la generación de calor y se consolida como un método óptimo y habilitado para cumplir estándares NATO, como el STANAG 4117, para evaluar la estabilidad de propelentes (Boers & de Klerk, 2005). Estos estudios confirman la importancia de la calorimetría como una herramienta precisa y confiable para la gestión proactiva de municiones, permitiendo extender su uso de forma segura y mitigar riesgos de autoignición y degradación química.

Además de las técnicas descritas, la tabla destaca el uso de la calorimetría diferencial de barrido (DSC) para estimar la energía de activación y perfilar la descomposición térmica de explosivos y propelentes (Elbasuney et al., 2019; Trache & Khimeche, 2013), ofreciendo predicciones de estabilidad de hasta 37 años en algunos casos (Kirchhof et al., 2016). Otros métodos, como la HFC y el análisis de consumo de estabilizadores, permiten cuantificar la tasa de generación de calor y predecir la estabilidad de materiales energéticos en periodos que van desde los 6 hasta los 140 años, dependiendo de los estabilizadores utilizados (Boers & de Klerk, 2005; de Klerk, 2015; Defanti et al., 2020). La combinación de estas técnicas, como la calorimetría de conducción con DSC, o PVST con TG/DSC, se consideran esenciales para una evaluación exhaustiva de la

estabilidad, especialmente en mezclas complejas (Bunyan et al., 2003; Elbasuney et al., 2019; Krabbendam-La Haye et al., 2003; Trache & Khimeche, 2013). En definitiva, la evidencia científica respalda la capacidad de la calorimetría para ofrecer una evaluación objetiva y precisa de la vida útil de los materiales energéticos, lo cual es crucial para optimizar la logística y seguridad en el ámbito militar.

### **[T3] Diseño de un Modelo Integrador de Técnicas Calorimétricas y Economía Circular para la Optimización de la Vida Útil de MYME**

La logística militar en Colombia afronta hoy un desafío estratégico de gran envergadura: el envejecimiento y la caducidad de su parque de materiales reservados, en particular de las MYME. Esta obsolescencia acumulada no solo ha generado un déficit crítico en provisiones básicas y denota un manejo no óptimo de los inventarios fiscales, sino que ha incrementado de manera alarmante los riesgos para el personal en el cumplimiento de las misiones (Contraloría General de la República, 2025). Así, el problema ha erosionado progresivamente tanto la operatividad como la seguridad de las FF.MM. (Redacción El País, 2025). Frente a esta realidad, es indispensable evaluar los modelos logísticos vigentes, con el fin de promover la implementación de esquemas alternativos más ágiles y proactivos que garanticen una gestión eficiente, preventiva y sostenible de los materiales reservados.

Históricamente la LI ha sido el principal método de las FF.MM colombianas para disponer de MYME obsoletas o vencidas (Amézquita Sanabria, 2024; Mariño Munar, 2017; Pedraza Martínez, 2024), mediante procesos de neutralización y gestión de residuos. Ejemplos incluyen procesos por \$749.603.041 COP (Ejército, 2024) y \$1.284.954.119 COP (Armada, 2021), que cubren logística, personal especializado y tratamiento ambiental. En 2015, desmilitarizar 48.799 municiones mayores costaba €1.164.444,84, sin ingresos por reciclaje (Amézquita Sanabria, 2024). Aunque efectiva, la LI resulta reactiva y costosa, evidenciando la necesidad de estrategias proactivas y regenerativas que reduzcan impactos, optimicen recursos y potencien beneficios económicos y ambientales a largo plazo,

alineando la gestión de armamento con principios de sostenibilidad (Durán De las Salas et al., 2018; Elbasuney et al., 2019; Pedraza Martínez, 2024).

En este escenario, la calorimetría se perfila como una herramienta disruptiva capaz de revolucionar la gestión de los materiales energéticos en el ámbito militar. Al combinar técnicas calorimétricas con los principios de la EC, se abre la posibilidad de optimizar cada etapa de su ciclo de vida, potenciando la seguridad operativa y la sustentabilidad de las Fuerzas Militares. El reto consiste ahora en definir qué modelos, metodologías o técnicas permitirán a las FF.MM. colombianas maximizar ciclo de mantener y prolongar de la EC (ver figura 1), al tiempo que minimizan el uso y la dependencia de la LI para la disposición final de explosivos, propelentes y municiones.

#### **[T4] Técnicas Calorimétricas para Evaluar Materiales Energéticos y su Aplicabilidad en las FF.MM de Colombia**

El desarrollo de un modelo integrador en el ámbito de la gestión de MYME exige la selección rigurosa de técnicas calorimétricas, como la HFC, la DSC, el DMA, entre otras, que permitan evaluar con precisión la estabilidad y la vida útil de estos compuestos e incorporar principios de EC en su mantenimiento y extensión del ciclo de vida. Para ello, se aplicó la metodología PRISMA 2020 en una revisión sistemática que identificó nueve estudios con criterios estrictos de inclusión y calidad (cuartiles Q1 y Q2), los cuales, dada su heterogeneidad metodológica, fueron sometidos a un análisis crítico mediante las listas de verificación del Joanna Briggs Institute (JBI), evaluando la validez interna, el riesgo de sesgo, la relevancia y la aplicabilidad en distintos diseños de investigación. Este escrutinio meticuloso garantiza tanto la solidez científica de la evidencia como su reproducibilidad (JBI, 2021; Phillips, 2023) y la posibilidad de adopción efectiva en el contexto de las FF.MM colombianas, asegurando la rigurosidad de los procesos y la robustez de las conclusiones obtenidas. A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la aplicación de la validación JBI y su nivel de aplicabilidad en las FF.MM colombianas, así:

**Tabla 3.** Resultados de la validación JBI realizada a los 9 artículos seleccionados bajo la metodología de revisión sistemática PRISMA 2020

Autores	Tipo de estudio	Checklist JBI aplicada	Fortalezas clave	Limitaciones clave	Juicio Global	Aplicabilidad en las FF.MM colombianas
Wani et al., 2012	Experimental	JBI experimental	Relación composición – módulo viscoelástico, protocolo reproducible DMA	Extrapolación no validada; estadística limitada	Validez moderada; útil para estimación preliminar	Alta-moderada: viable con equipo DMA en propelentes
Boers & de Klerk, 2005	Experimental comparativo	JBI experimental	Integración HPLC y HFC; vida útil basada en cinética	Concentraciones iniciales no normalizadas; pocas réplicas	Validez moderada–alta; vigilancia técnica	Alta-moderada: replicable con HPLC para propelentes triple base; HFC técnica superior.
de Klerk, 2015	Opinión técnica	JBI opinión experta	Autor reconocido; marco STANAG; defiende calorimetría pasiva	Sin datos primarios; no considera costos	Alta credibilidad; requiere respaldo empírico	Alta: sustento conceptual para vigilancia HFC; respalda inversión.
Bunyan et al., 2003	Experimental físico - químico	JBI experimental	Alta sensibilidad; HFC adaptado a explosivos	Sin validación estadística; R <sup>2</sup> baja en modelos cinéticos.	Prometedor, pero requiere de validación	Alta–moderada: aplicable con microcalorímetro en PBX
Krabbendam-La Haye et al., 2003	Técnico normativo	JBI para textos técnicos	Protocolos STANAG 4147 claros; selección logística	Sin replicación; enfoque cualitativo	Útil como referencia normativa	Alta: adaptable a TNT/explosivos plásticos; base para protocolos.
Defanti et al., 2020	Experimental	JBI experimental	Fases de degradación definidas; integra HFC, GPC, balística	Sin pruebas estadísticas; baja extrapolación	Validez moderada; confiabilidad buena	Alta: aplicable a vigilancia pólvora negra/monobásica
Jawale et al., 2013	Experimental técnico	JBI experimental	Influencia del gas en calorimetría; metodología reproducible	Sin análisis de riesgos; sin estadística	Validez moderada – alta; útil en calibración	Alta: estandariza calorimetría sin oxígeno con UPH-N2
Trache & Khimeche, 2013	Experimental analítico	JBI experimental	Modelos cinéticos; parámetros de estabilidad	Falta grupo de control y validación empírica a largo plazo	Validez moderada, pero diseño sólido.	Alta: técnica DSC accesible; correlación estabilizador–oxidación

<b>Autores</b>	<b>Tipo de estudio</b>	<b>Checklist JBI aplicada</b>	<b>Fortalezas clave</b>	<b>Limitaciones clave</b>	<b>Juicio Global</b>	<b>Aplicabilidad en las FF.MM colombianas</b>
Elbasuney et al., 2019	Experimental	JBI experimental	Protocolo reproducible; Van't Hoff bajo STANAG	No evalúa humedad, fotodegradación, desempeño	Validez moderada; útiles matrices envejecimiento	Moderada: adaptable a doble base; requiere ajuste tropical.

*Fuente:* elaboración propia con base en la información contenida en los artículos para revisión sistémica y la aplicación de las listas de chequeo del Joanna Briggs Institute (JBI).

A partir del análisis sistémico y el proceso de validación metodológica JBI de los nueve artículos especializados se puede inferir que las técnicas calorimétricas más idóneas para la evaluación de MYME en el contexto operativo y logístico de las FF.MM colombianas son la HFC y el Monitoreo de Actividad Térmica (TAM). Aunque presentan limitaciones como la necesidad de control térmico estricto, sensibilidad al ruido térmico ambiental y costos de implementación moderados, sus fortalezas superan con claridad a las de otros métodos, por su capacidad de medir la tasa global de generación de calor, integrando reacciones químicas lentas y sinérgicas que otras técnicas suelen omitir (Boers & de Klerk, 2005; de Klerk, 2015; Elbasuney et al., 2019). Métodos como DSC o el Análisis Termogravimétrico (TG) aportan información puntal sobre eventos térmicos específicos, pero no logran capturar la dinámica continua de generación de calor que caracteriza la degradación química progresiva de explosivos y propulsantes (Bunyan et al., 2003; Elbasuney et al., 2019; Krabbendam-La Haye et al., 2003; Trache & Khimeche, 2013). Además, las HFC y TAM han sido adoptadas por los estándares de la OTAN, lo que respalda su confiabilidad y permite una fácil adaptación a protocolos locales alineados con los STANAG (de Klerk, 2015; Elbasuney et al., 2019).

Adicionalmente, la integración de las HFC/TAM en un protocolo híbrido con técnicas adicionales como la DMA, permitirían mejorar la predicción, aumentar la vigilancia y validación térmica, reforzar el alcance operativo de las pruebas e incluso construir matrices de estabilidad basadas en el envejecimiento balístico y la compatibilidad química (Elbasuney et al., 2019). Finalmente, la posibilidad de adaptar estas técnicas mediante gases ultrapuros (UHP) a los ambientes tropicales y a las condiciones exigentes y

agrestes propias de las regiones colombianas haría posible la reproducibilidad y pertinencia territorial de las técnicas calorimétricas (Jawale et al., 2013). Así, aunque ningún método es infalible, el HFC y TAM representan la alternativa más completa, sensible y normativamente validada, ideal para apoyar decisiones estratégicas u operativas sobre la vida útil, el rechazo y reprocesamiento o clasificación de los MYME. A continuación se presenta un análisis comparativo de las técnicas evaluadas, así:

**Tabla 4.** *Comparación de técnicas calorimétricas evaluadas en la revisión sistemática.*

<b>Técnica Calorimétrica</b>	<b>Parámetros Medidos / Aplicación Principal</b>	<b>Ventajas Clave / Estándares</b>	<b>Limitaciones / Complementos Necesarios</b>
Calorimetría de Flujo de Calor (HFC) / Microcalorimetría (TAM)	Tasa de generación de calor, calor total, potencial de autoignición, estabilidad térmica global.	Estándar STANAG 4582; menos mano de obra; vida útil independiente del calibre; no requiere conocer efecto de estabilizadores; estima disminución del calval; predicciones menos conservadoras; TAM III complementa DSC y permite horizontes largos. (Boers & de Klerk, 2005; Elbasuney et al., 2019)	Requiere interpretar si el proceso térmico observado es el crítico; no usar como único método en altos explosivos; se sugiere enfoque híbrido. (Bunyan et al., 2003)
Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)	Energía de activación, perfil de descomposición térmica (picos exotérmicos/endotérmicos), temperaturas de inicio de descomposición y autoignición, calor total liberado.	Ofrece datos cuantitativos físico-químicos; permite estimar vida útil por envejecimiento acelerado; evidencia efectos de la velocidad de calentamiento en doble base. (Bunyan et al., 2003; Elbasuney et al., 2019; Trache & Khimeche, 2013)	Puede requerir técnicas complementarias en mezclas complejas; los termogramas suelen mostrar un solo pico, lo que impide distinguir etapas sucesivas del proceso. (Elbasuney et al., 2019; Trache & Khimeche, 2013)
Análisis Mecánico Dinámico (DMA)	Módulo de almacenamiento, módulo de pérdida, delta temperatura de transición vítrea (Tg)	Detecta deterioro del encapsulado y fin de vida (3–10 años); proyecta vida útil a partir de la caída del módulo de almacenamiento. (Wani et al., 2012)	Evalúa propiedades viscoelásticas/mecánicas, no la reactividad química ni la generación de calor. (Wani et al., 2012)
Termogravimetría (TG)	Pérdida de masa.	Útil junto con DSC y PVST para compatibilidad. (Krabbendam-La Haye et al., 2003)	Menos directa que HFC para predecir vida útil. (Krabbendam-La Haye et al., 2003)
Prueba de Estabilidad de	Volumen de gas liberado.	Considerado más fiable que TG/DSC para pruebas de	Si la liberación de gas excede un umbral, se recomienda un

Técnica Calorimétrica	Parámetros Medidos / Aplicación Principal	Ventajas Clave / Estándares	Limitaciones / Complementos Necesarios
Vacío a Presión (PVST)		compatibilidad en ciertos casos (Krabbendam-La Haye et al., 2003).	método de compatibilidad adicional (Krabbendam-La Haye et al., 2003).
Calorímetro de Bomba (Parr bomb)	Valor calorimétrico (cal-val) en diferentes ambientes (N <sub>2</sub> , AR, O <sub>2</sub> , aire)	Determina el valor calorimétrico de propulsores y explosivos (Jawale et al., 2013). Los ambientes de NHP-N <sub>2</sub> /Ar ofrecen valores reales y reproducibles, mientras que otros gases inflan las mediciones (Jawale et al., 2013).	No aborda directamente la predicción de vida útil o la estabilidad en el tiempo, sino el valor energético de la combustión completa (Jawale et al., 2013).

*Fuente:* elaboración propia con base en la información contenida en los artículos para revisión sistémica.

En resumen, el análisis de la tabla 4 revela que, aunque todas las técnicas evaluadas ofrecen información relevante, la HFC y el TAM destacan por su capacidad para cuantificar directamente el calor liberado durante los procesos de degradación (Boers & de Klerk, 2005; de Klerk, 2015; Elbasuney et al., 2019). Así es imperativo considerar que éstas técnicas, deben erigirse como la base del modelo integrador que sea propuesto. Adicionalmente, su aplicación puede enriquecerse con la DSC para el estudio de la cinética de descomposición (Bunyan et al., 2003; Elbasuney et al., 2019) y con el DMA para evaluar la integridad física de los materiales (Wani et al., 2012).

### [T5] Transición de la LI al Ciclo “Mantener o Prolongar” en la EC

Históricamente, las FF.MM. colombianas han gestionado las municiones de forma reactiva, priorizando la LI en la fase final de la EC, cuando el material ya está degradado. En esta etapa, se reciclan componentes útiles y se neutralizan los no reutilizables, debido a la ausencia de capacidades técnicas para estimar con precisión su vida útil remanente (Amézquita Sanabria, 2024; Ramírez Nieto et al., 2017). La calorimetría propone un cambio hacia el ciclo de “mantener o prolongar”, permitiendo evaluar la estabilidad térmica y predecir la durabilidad de los materiales, lo que habilita una gestión proactiva que supera el enfoque tradicional de disposición y reciclaje, como se expone a continuación.

### *[T6] Detección temprana de degradación*

Técnicas como la HFC, con su alta sensibilidad pueden detectar cambios en la tasa de generación de calor, con lo cual indican el inicio de procesos de descomposición mucho antes que se vuelvan críticos o visible por otros medios (Bunyan et al., 2003; de Klerk, 2015). Esto permite intervenir antes de que el material se convierta en un desecho inmanejable o peligroso.

### *[T7] Extensión segura de la vida útil*

Al cuantificar la vida remanente, por ejemplo, mediante modelos de predicción como los basados en la fórmula de Vant' Hoff o la extrapolación de datos de HFC (Elbasuney et al., 2019), las FF.MM podrían decidir si una munición puede seguir en servicio de forma segura, incluso si ha superado su vida útil nominal, o si requiere control o reacondicionamiento (Amézquita Sanabria, 2024; Mariño Munar, 2017). Esto reduce la dependencia de la adquisición de nuevo material y el costoso proceso de destrucción (Amézquita Sanabria, 2024; de Klerk, 2015; Namir et al., 2021).

### *[T8] Optimización de inventarios o redistribución*

Al conocer la estabilidad real de los lotes de MYME, se puede optimizar su almacenamiento y redistribución, priorizando el consumo de lotes que muestran signos más avanzados de degradación, pero que aún son seguros. Este enfoque minimiza el riesgo de acumulación de material vencido (Pedraza Martínez, 2024; Ramírez Nieto et al., 2017).

### *[T8] Reducción del impacto ambiental y costos*

Mantener las municiones en uso seguro por más tiempo reduce la necesidad de fabricar unidades nuevas, disminuye el consumo de materias primas y la generación de residuos desde su origen, traducándose en ahorros presupuestarios sustanciales al evitar los elevados costos de adquisición y disposición final (Amézquita Sanabria, 2024; Durán De

las Salas et al., 2018). Un caso práctico de la Armada Nacional, enmarcado en la LI, demostró este potencial: un proceso de desmilitarización autónomo, respaldado por investigación, redujo los costos de 1,16 millones de euros a 80 millones de pesos colombianos y permitió recuperar materiales por un valor de 120 millones de pesos (Amézquita Sanabria, 2024). No obstante, si ese mismo enfoque logístico se orientara a estrategias de mantenimiento predictivo y prolongación de la vida útil, intervenciones que anticipan y corrigen el desgaste antes de la fase de disposición final, las FF.MM podrían multiplicar los ahorros e incrementar los retornos económicos, al optimizar los ciclos de vida, maximizar la reutilización de componentes y minimizar aún más la generación de residuos.

En esencia, la calorimetría transforma la gestión de municiones de un enfoque reactivo de “fin de vida” (LI) a un proactivo y preventivo de “extensión de vida” (mantener – prolongar), permitiendo a las FF.MM colombianas optimizar recursos y alinear sus operaciones y abastecimientos con los principios de sostenibilidad y responsabilidad ambiental.

### **[T9] Diseño del Modelo Integrador de Técnicas Calorimétricas y EC**

Se propone un modelo integrador basado en un enfoque de ciclo de vida y alineado con los principios de la EC, que incorpora técnicas calorimétricas en las etapas críticas del manejo de MYME. Este marco se estructura en cinco fases: (1) diseño y adquisición sostenible, (2) almacenamiento y monitoreo continuo, (3) toma de decisiones y gestión del ciclo de vida, (4) disposición final y valorización, y (5) retorno y retroalimentación.

*[T10] Diseño y Adquisición Sostenible (EC – Diseño y Materiales)*

En esta fase resulta imprescindible asegurar que INDUMIL y los fabricantes extranjeros que abastecen a las FF.MM. colombianas integren criterios de diseño y adquisición sostenible en sus procesos productivos, incorporando parámetros de estabilidad térmica y vida útil en la formulación de estabilizadores y MYME (Elbasuney et al., 2019; Krabbendam-La Haye et al., 2003). Para ello, deberán emplear técnicas calorimétricas como la HFC o el TAM durante la investigación, el desarrollo y la fabricación de prototipos o productos, complementadas con ensayos de envejecimiento acelerado que verifiquen la resiliencia térmica (Elbasuney et al., 2019). Este enfoque posibilita la selección precisa de prototipos y productos con mayor estabilidad y vida útil prolongada, tal como se evidenció con los propelentes modificados con RDX, cuya durabilidad se extendió hasta 56 años (Elbasuney et al., 2019; Krabbendam-La Haye et al., 2003), incorporando de este modo los principios de la EC y fomentando la innovación en materiales y metodologías de fabricación.

*[T11] Almacenamiento y Monitoreo (EC – Mantener/Reutilizar/Reducir)*

En la fase de almacenamiento y monitoreo continuo o periódico, orientada hacia los principios de mantener, reutilizar y reducir, se propone el monitoreo de actividad térmica basado en técnicas calorimétricas de alta sensibilidad para detectar tempranamente signos de degradación y estimar la vida útil remanente de los materiales energéticos (Elbasuney et al., 2019). El TAM y la HFC se consolidan como la herramienta principal, ya que permiten registrar tasas de generación de calor extremadamente bajas (hasta 40 °C), lo cual revela procesos lentos de descomposición incluso bajo condiciones normales u óptimas de almacenamiento (Bunyan et al., 2003). Esta detección se complementaría con evaluaciones periódicas mediante DMA, orientadas a verificar la integridad estructural de los propelentes mediante parámetros como la rigidez y viscoelasticidad, esenciales para garantizar su funcionalidad en entornos operativos (Wani et al., 2012). En conjunto estas técnicas

ofrecen un sistema robusto para la gestión técnico-logística de municiones en uso o almacenadas.

*[T12] Decisión y Gestión de Ciclo de Vida (EC – Prolongar y Redistribuir)*

Durante la fase de decisión y gestión del ciclo de vida de las MYME, las Fuerzas Militares deben orientar sus acciones bajo los principios de prolongación y redistribución, apoyándose en datos derivados del monitoreo calorimétrico para determinar, de forma segura, la extensión de la vida útil y la asignación del material hacia funciones operacionales, de entrenamiento o almacenamiento. Cuando el TAM o la HFC detecten tasas de generación térmica cercanas a umbrales críticos, como 350 mW/g a 90 °C, equivalentes a diez años de estabilidad (Elbasuney et al., 2019), se recomienda incorporar la DSC, que permite desentrañar la cinética de descomposición y establecer puntos críticos de autoignición (Elbasuney et al., 2019; Trache & Khimeche, 2013). Enlazando estas técnicas, un protocolo híbrido TAM/HFC + DSC permite no solo vigilar la señal térmica general, sino también confirmar procesos químicos subyacentes, superando así las limitaciones de cada método por separado: TAM/HFC puede capturar señales inespecíficas o invisibilizar fallas discretas, mientras que la DSC ofrece precisión molecular y energética. Complementariamente, el DMA permite verificar la integridad estructural del propelente a través del módulo de almacenamiento; si se evidencian deterioros cercanos a umbrales de rechazo, puede reorientarse su uso hacia tareas no operativas como el entrenamiento, optimizando recursos y evitando pérdidas logísticas (Boers & de Klerk, 2005; Bunyan et al., 2003; Elbasuney et al., 2019). En conjunto, este esquema integrado de evaluación permite a las FF.MM tomar decisiones informadas y asertivas sobre almacenamiento seguro, logrando así la mitigación de riesgos y la gestión eficiente de sus capacidades.

*[T13] Disposición Final y Valorización (EC – Reciclar/Recuperar/Eliminar)*

En la fase de disposición final y valorización de MYME obsoletas o sin vida útil, la neutralización se realiza solo ante riesgos inaceptables o pérdida total de funcionalidad,

priorizando la recuperación de materiales y la eliminación ambientalmente responsable (Amézquita Sanabria, 2024; Durán De las Salas et al., 2018). Los datos calorimétricos, aunque no aplicados durante la desmilitarización, sustentan técnicamente el cese de uso y facilitan la clasificación de componentes, especialmente materiales energéticos, para su reciclaje o eliminación eficiente (Jawale et al., 2013). Por ejemplo, la reutilización de vainillas de munición generan beneficios económicos y reducen costos (Amézquita Sanabria, 2024; Mariño Munar, 2017). La experiencia de la Armada Nacional demuestra ahorros significativos y recuperación de recursos, validando la viabilidad económica y ambiental de estos procesos (Amézquita Sanabria, 2024).

*[T14] Retorno y Retroalimentación (Información, Desarrollo Tecnología y Cadena de Suministros)*

Se integra de manera sistémica la información, el desarrollo tecnológico y la cadena de suministro con el propósito de generar un bucle de mejora continua que optimice futuros diseños y procesos (Ellen MacArthur Foundation, 2020; Liggins, 2024). Para ello, se realiza un análisis de datos procedentes de todas las etapas del ciclo de vida, desde la caracterización inicial hasta la evaluación de uso no seguro de los materiales, identificando tendencias de degradación, evaluando la efectividad de los estabilizadores e investigando el comportamiento de los materiales bajo condiciones reales de almacenamiento y uso. Este enfoque de minería de datos permite extraer patrones predictivos y lecciones aprendidas, que retroalimentan la innovación de procesos y el desarrollo de nuevas formulaciones, siempre alineadas con los objetivos de sostenibilidad y seguridad establecidos por el Ministerio de Defensa (MDN, 2023).

*[T15] Visualización del Modelo Integrador (Propuesta)*

Para visualizar el modelo integrador, se presenta la siguiente tabla que enlaza las fases del ciclo de vida con las técnicas calorimétricas y los principios de la EC.

**Tabla 5. Modelo integrador.**

Fase del Modelo Integrador	Objetivo de la Fase	Técnicas Calorimétricas Clave	Información proporcionada	Beneficio para FF.MM / EC
Diseño y Adquisición Sostenible (Diseño y Materiales)	Seleccionar proveedores que usen materiales estables y de larga vida útil.	HFC/TAM DSC	Compatibilidad, estabilidad inicial, potencial de envejecimiento.	Reducción de futuros residuos, materiales más resilientes.
Almacenamiento y Monitoreo (EC – Mantener / Reutilizar / Reducir)	Monitorear la salud de las municiones en tiempo real o de manera periódica.	HFC/TAM (principal) DMA (complemento)	Tasa de generación de calor, integridad mecánica, signos de degradación.	Detección proactiva, extensión del uso seguro, optimización de inventarios.
Decisión y Gestión de Ciclo de Vida (Prolongar y Redistribuir)	Tomar decisiones informadas para maximizar el valor y la vida útil.	DSC DMA	Cinética de descomposición, temperaturas críticas, deterioro estructural.	Extensión de la vida útil, reducción de costos de adquisición, maximizar el uso del material.
Disposición Final y Valorización (Reciclar/Recuperar/Eliminar)	Neutralizar (desmilitarizar) y valorizar de forma segura.	No se usan. Se emplean procesos de LI.	Clasificación para reciclaje o disposición final, acuerdo procesos de LI.	Recuperación de recursos, menor impacto ambiental, ahorro en disposición.
Retorno y Retroalimentación (Información, Desarrollo Tecnología y Cadena de Suministros)	Mejorar futuros diseños y procesos de almacenamiento y uso.	Análisis de datos cruzados de todas las fases.	Tendencias de degradación, efectividad de estabilizadores, comportamiento de materiales.	Innovación en procesos y materiales, alineación con objetivos de sostenibilidad y seguridad.

*Fuente:* elaboración propia con base en la información contenida en los artículos para revisión sistémica y los trabajos de Amézquita Sanabria, 2024 y Mariño Munar, 2017.

Este modelo integrador, articulado en cinco fases, desde el diseño y la adquisición sostenible hasta el retorno y retroalimentación, demuestra cómo las técnicas calorimétricas pueden convertirse en la columna vertebral para la gestión del ciclo de vida de las MYME alineado con los principios de la economía circular. Al combinar HFC, TAM, DSC y DMA en un esquema híbrido, se fortalece la capacidad de detección temprana, la prolongación de la vida útil, la valorización final y el aprendizaje continuo, garantizando tanto la eficiencia

logística como la responsabilidad ambiental. Con esta base sólida, resulta imprescindible profundizar ahora en cómo estas mismas técnicas aportan valor económico y reducen el impacto ecológico, asegurando una gestión sostenible de la seguridad y defensa en las FF.MM. En la siguiente sección, examinaremos las técnicas calorimétricas desde una perspectiva económica y ambiental para enriquecer aún más este enfoque integral.

## [T16] La perspectiva Económica y Ambiental de la Calorimetría y la Economía Circular

En el Ciclo de Vida (CV) de las MYME, los mayores costos y daños ambientales se concentran en tres etapas críticas: manufactura, uso y disposición final. Estas fases implican alto consumo de recursos, riesgos para la salud y emisiones tóxicas, además de gastos en manejo seguro y descontaminación (Cumming & Johnson, 2019). La gestión de estos materiales es, por tanto, un desafío que combina seguridad, eficiencia operativa y una creciente demanda de sostenibilidad ambiental y económica (Amézquita Sanabria, 2024; Liggins, 2024; Mariño Munar, 2017).

**Tabla 6.** *Etapas ciclo de vida de las MYME y sus principales impactos y costos.*

Etapa del Ciclo de Vida	Características principales	Costos económicos relevantes	Impactos ambientales principales	Observaciones adicionales
Diseño y desarrollo	Se debe invertir e investigar en innovación para eficiencia y reducción de impacto	Moderados. I+D, desarrollo de nuevos materiales.	Potencial bajo si se integra el diseño ambiental desde el inicio	Enfoque “verde” (green) importante.
Manufactura	Producción en gran escala con procesos químicos.	Altos Equipamiento, procesos, control ambiental	Emisiones de compuestos orgánicos volátiles, residuos tóxicos, consumo energético destacado.	Se presentan las principales emisiones.

Etapa del Ciclo de Vida	Características principales	Costos económicos relevantes	Impactos ambientales principales	Observaciones adicionales
Almacenamiento y transporte	Logística y resguardo seguro de materiales	Moderados. Infraestructura y seguridad.	Riesgo de fugas y contaminación accidental, emisiones indirectas.	Menor impacto relativo.
Uso (entrenamiento o combate)	Explosiones y liberación de residuos	Altos Operación, consumo y riesgos de salud.	Contaminación de suelo, agua y aire con compuestos tóxicos y metales pesados.	Impacto ambiental directo.
Disposición y desmilitarización	Eliminación segura de materiales obsoletos o deteriorados más allá de los límites de uso seguro.	Altos Procesos seguros y descontaminación.	Contaminación potencial persistente si no se controla adecuadamente.	Problema relevante en MYME obsoletas o viejas que no son consumidas en periodos de paz.

*Fuente:* elaboración propia con base en la información contenida en el libro *Energetic Material and Munitions* de Cumming & Johnson (2019).

Históricamente, el sector defensa ha operado bajo un modelo lineal de “producir, usar y desechar”, lo que ha contribuido al agotamiento de recursos y a un incremento en la generación de residuos (Amézquita Sanabria, 2024; Cumming & Johnson, 2019; Vera Calderón et al., 2024). Las FF.MM. han mantenido un enfoque reactivo en la disposición final, principalmente a través de la LI (Amézquita Sanabria, 2024; Mariño Munar, 2017; Pedraza Martínez, 2024). En contraste, la adopción del ciclo mantener y prolongar propio de la EC representa un cambio de paradigma clave para mitigar impactos y optimizar recursos.

En este contexto, las técnicas HFC/TAM permiten evaluar la estabilidad de materiales energéticos como los propelentes, proyectando su vida útil y determinando con mayor precisión sus condiciones de seguridad a lo largo del CV. Con este enfoque, la Armada Nacional, en un estudio de alternativas tecnológicas desarrollado en 2023, consultó al Instituto TNO Defence. En colaboración con el Ministerio de Defensa del Reino de los Países Bajos (MDRPB), TNO analizó más de 100 propelentes seleccionados aleatoriamente

y reportó que numerosos lotes de MYME mantuvieron su estabilidad más allá de la vida útil declarada por los fabricantes (L. Steen, comunicación personal, 11 de diciembre de 2023), así:

**Tabla 7.** *Información TNO porcentajes MYME mantuvieron estabilidad más allá vida útil declarada fabricantes.*

<b>Momento de la Prueba (Desde la adquisición/producción)</b>	<b>% de Propelentes Estables (para al menos 8 años adicionales)</b>	<b>Vida Útil Total Acumulada (Años)</b>
Al momento de la 1ra prueba (propelentes nuevos)	>90%	Al menos 8 años adicionales
Después de 8 años	~55%	Al menos 16 años adicionales
Después de otros 8 años	~40%	Al menos 24 años adicionales

*Fuente:* elaboración propia con base en la información contenida en L. Steen, comunicación personal, 11 de diciembre de 2023.

A partir de lo expuesto, la aplicación sistemática del Modelo Integrador de cinco fases permite establecer una gestión basada en condición para las MYME, orientada a extender su vida útil, optimizar su rotación, diferir nuevas adquisiciones y evitar desmilitarizaciones prematuras. Sobre esta base, se estiman los ahorros proyectados mediante la extrapolación de los parámetros de prolongación definidos por TNO y el MDRPB, aplicados a las adquisiciones de MYME realizadas entre 2019 y 2025 y registradas en la plataforma SECOP II por el Ministerio de Defensa Nacional (MDN) y sus entidades adscritas (ver tabla 8). Se proyectan los siguientes ahorros, calculados en valor presente neto (VPN julio de 2025):

- 1) Primera prueba (10 años): COP 181.044.809.901
- 2) Segunda prueba (18 años): COP 99.574.645.446
- 3) Tercera prueba (26 años): COP 39.829.858.178

Estos resultados, tomando como línea base las adquisiciones históricas, evidencian que este enfoque no solo alivia la carga fiscal, sino que incrementa la disponibilidad operativa, reduce pasivos y huella ambiental, y libera recursos para capacidades estratégicas prioritarias. La iniciativa se alinea con los principios de la EC y la gestión del CV: medición periódica, decisiones informadas por riesgo y circularidad, fortaleciendo así la gobernanza técnica de los arsenales de las FF.MM. (Cumming & Johnson, 2019; Ellen MacArthur Foundation, 2020).

**Tabla 8.** *Procesos desarrollados MDN para la adquisición de MYME entre 2019-2025.*

Entidad Estatal	Referencia	Descripción	Valor proceso (MCOP)	VPN julio 2025* (MCOP)	Fecha cumple 10 años (vencimiento estimado)	Primera prueba (10 años) 90% superan prueba (MCOP)	Segunda prueba (18 años) 55% superan prueba (MCOP)	Tercera prueba 40% superan prueba (MCOP)
CENAC	260-CD-CENACINGENIERO S-2025	Municiones	\$ 1.184	\$ 1.184	2035-07-21	1.066	\$ 586	\$ 234
EJC	CD-051-DIADQ-ARM-2025	Material de guerra, municiones y granadas.	\$ 59.156	\$ 59.963	2035-05-22	53.967	\$ 29.681	\$ 11.873
MDN	07/2024-MDN-EJC-ARC-FAC	Pistolas, granadas, municiones y fusiles	\$ 32.684	\$ 34.445	2034-11-13	\$ 31.000	\$ 17.050	\$ 6.820
CENAC	330-CD-CENACINGENIERO S-2024	Municiones	\$ 1.000	\$ 1.053	2034-11-01	\$ 948	\$ 521	\$ 209
CENAC	315-CD-CENACINGENIERO S-2024	Municiones	\$ 1.000	\$ 1.057	2034-10-08	\$ 952	\$ 523	\$ 209
EJC	SASI-025-DIADQ-ARM-2024	Municiones	\$ 39.983	\$ 42.284	2034-10-07	\$ 38.056	\$ 20.931	\$ 8.372

\* Para actualizar el valor monetario de datos históricos se usó el IPC del DANE, tomando julio de 2025 como referencia. El ajuste permite comparaciones financieras homogéneas y sin distorsión inflacionaria. La tabla resultante cuantifica los posibles beneficios del modelo integrado de calorimetría y EC, evidenciando su disminución con la edad de la munición.

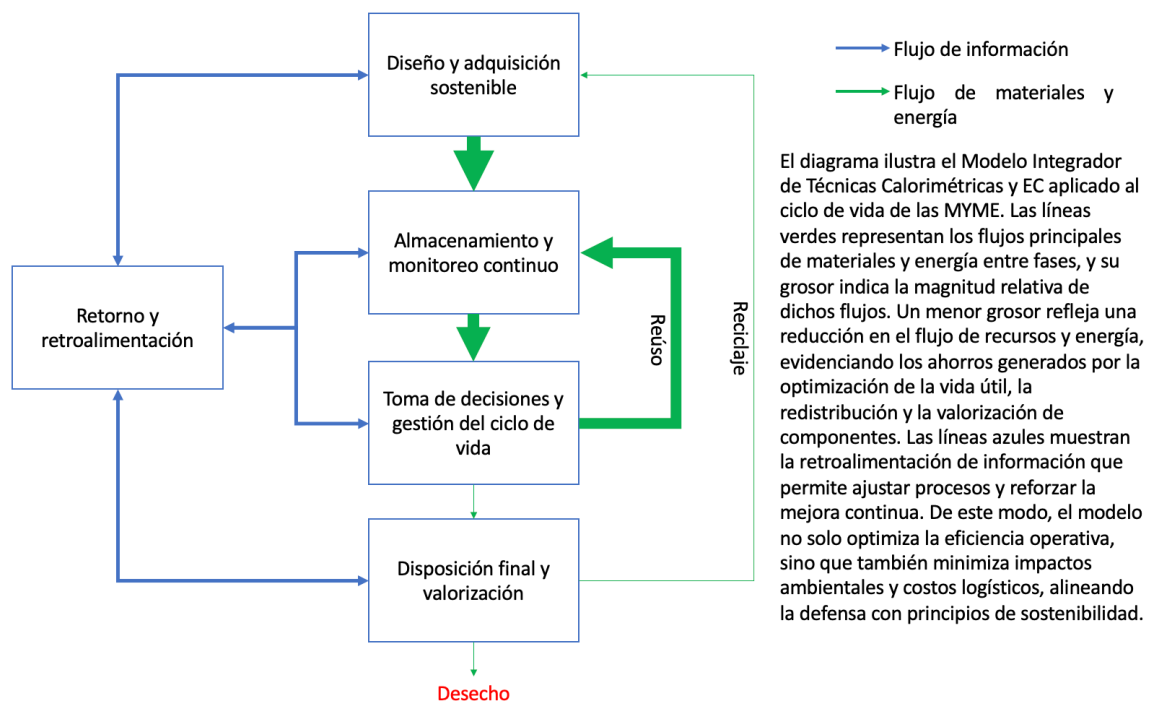
Entidad Estatal	Referencia	Descripción	Valor proceso (MCOP)	VPN julio 2025* (MCOP)	Fecha cumple 10 años (vencimiento estimado)	Primera prueba (10 años) 90% superan prueba (MCOP)	Segunda prueba (18 años) 55% superan prueba (MCOP)	Tercera prueba 40% superan prueba (MCOP)
CENAC	269-CD-CENACINGENIERO S-2024	Municiones	\$ 1.000	\$ 1.061	2034-09-03	\$ 955	\$ 525	\$ 210
INDUMIL	213/2024	Componentes para municiones	\$ 8.416	\$ 8.982	2034-07-25	\$ 8.084	\$ 4.446	\$ 1.778
CENAC	304-CD-CENACINGENIERO S-2023	Municiones	\$ 634	\$ 702	2033-11-24	\$ 631	\$ 347	\$ 139
INDUMIL	419/2023	Municiones	\$ 296	\$ 331	2033-10-02	\$ 298	\$ 164	\$ 66
INDUMIL	001/2023	Municiones	\$ 1.687	\$ 2.018	2033-01-20	\$ 1.817	\$ 999	\$ 400
INDUMIL	600/2022	Municiones	\$ 1.188	\$ 1.464	2032-11-23	\$ 1.317	\$ 725	\$ 290
EJC	051-SUADQ-ARM-2022	Municiones	\$ 9.103	\$ 11.363	2032-10-07	\$ 10.227	\$ 5.625	\$ 2.250
INDUMIL	163/2022	Municiones	\$ 4.529	\$ 6.000	2032-05-20	\$ 5.400	\$ 2.970	\$ 1.188
EJC	015-SUADQ-ARM-2022	Municiones	\$ 9.046	\$ 12.143	2032-02-28	\$ 10.928	\$ 6.011	\$ 2.404
EJC	042-SUADQ-ARM-2021_1	Munición tipo carabina	\$ 378	\$ 529	2031-08-17	\$ 476	\$ 262	\$ 105
INDUMIL	017/2021	Munición eslabonada	\$ 6.268	\$ 8.913	2031-02-22	\$ 8.022	\$ 4.412	\$ 1.765
INDUMIL	343/2020	Municiones	\$ 5.367	\$ 7.666	2030-09-01	\$ 6.899	\$ 3.795	\$ 1.518
Ahorros generados						\$ 181.045	\$ 99.575	\$ 39.830

*Fuente:* elaboración propia con base en la información publicada en la plataforma SECOP II.

Ahora en términos medioambientales, la aplicación combinada de la calorimetría (HFC/TAM, DSC, DMA) y los principios de EC en la gestión de MYME permite cerrar y desacelerar flujos de recursos, reduciendo la extracción y las emisiones en todo el CV. Al predecir con alta sensibilidad la vida útil remanente, se evita la manufactura (etapa más contaminante del CV) o la desmilitarización prematura, disminuyendo el consumo energético, residuos peligrosos y riesgos de liberación de compuestos tóxicos (Cumming & Johnson, 2019; De Souza Defanti, 2019; Liggins, 2024; Queiroz et al., 2024). Lo

mencionado anteriormente habilita estrategias de reducir y reutilizar antes de recurrir al reciclaje o recuperación energética (ver figura 3), maximizando la valorización de componentes críticos (Liggins, 2024). Además, la trazabilidad de datos térmicos y balísticos favorece las decisiones basadas en condición, alineadas ISO 59020 para medir circularidad y con compromisos ambientales, sociales y de gobernanza técnica, fortaleciendo la resiliencia logística y ventaja operativa de las FF.MM. con una menor huella ecológica (Cumming & Johnson, 2019; Liggins, 2024; Queiroz et al., 2024).

**Figura 3.** Diagrama del Modelo Integrador y sus flujos de ahorros de materiales y energía



*Fuente:* Elaboración propia usando la información contenida en Cumming & Johnson, 2019; Liggins, 2024; Queiroz et al., 2024 y Ellen Macarthur Foundation, 2021.

Por lo expuesto anteriormente es recomendable que las FF.MM. institucionalicen un programa de gestión predictiva que integre mediciones calorimétricas periódicas y criterios de EC en la política de ciclo de vida de las municiones y materiales energéticos,

incorporando requisitos de diseño sostenible en las adquisiciones; desarrollando capacidades metrológicas propias para ensayos HFC/TAM adaptados a condiciones tropicales y complementados con DMA y DSC; estableciendo acuerdos de responsabilidad extendida del productor con la industria para facilitar reutilización, remanufactura y reciclaje; creando sistemas de información que integren parámetros químicos, mecánicos y de circularidad para priorizar redistribución o reacondicionamiento sobre la disposición final; y fomentando innovación en materiales y procesos bajo la lógica de ciclos productivos y técnicos de la EC, con el fin de prolongar el uso seguro de las MYME, optimizar recursos, reducir impactos ambientales, alinear la defensa con la transición sostenible y fortalecer la autonomía estratégica, replicando resultados como los reportados por TNO.

## [T1] Conclusiones

El recorrido desarrollado en este capítulo evidencia la necesidad urgente de transformar la gestión del material bélico en las FF.MM colombianas, superando la LI, una práctica reactiva que ha predominado históricamente (Amézquita Sanabria, 2024; Castañeda Rueda, 2022; Durán De las Salas et al., 2018). El envejecimiento y la obsolescencia de las MYME afectan la operatividad, la seguridad y generan riesgos para el personal (Contraloría General de la República, 2025). En este contexto, la calorimetría surge como herramienta disruptiva para evaluar y gestionar la vida útil de los materiales energéticos. Técnicas como la HFC y el TAM permiten detectar tempranamente la degradación, medir la generación de calor y cumplir estándares OTAN (Bunyan et al., 2003; de Klerk, 2015; Elbasuney et al., 2019), mientras que el DMA y DSC complementan el análisis estructural y químico (Elbasuney et al., 2019; Trache & Khimeche, 2013; Wani et al., 2012). Integradas en un modelo de EC, estas metodologías prolongan de forma segura la vida útil, optimizan inventarios y tienen el potencial de generar ahorros significativos (ver tabla 8), estableciendo un marco proactivo y regenerativo que fortalece la resiliencia logística y la sostenibilidad en seguridad y defensa.

En el plano ambiental, la combinación metodológica propuesta desacelera el consumo de materias primas y reduce emisiones asociadas a la manufactura y disposición final, etapas históricamente más contaminantes del CV. La trazabilidad de datos térmicos favorece las decisiones basadas en condición, alineadas con estándares internacionales como la ISO 59020 o los STANAG 4117, 4147 y 4582, y potencia la resiliencia logística al disminuir riesgos asociados al desabastecimiento, los malos procedimientos de disposición final o la contaminación accidental por deterioro del material (Boers & de Klerk, 2005; Elbasuney et al., 2019; Krabbendam-La Haye et al., 2003; Liggins, 2024; Trache & Khimeche, 2013). Además, fomenta la valorización de componentes críticos y la circularidad de flujos, cerrando ciclos y mitigando la huella ecológica de la seguridad y defensa.

El modelo propuesto puede llegar a trascender su función técnico - logística para convertirse en un catalizador cultural que impulse una “defensa sostenible y regenerativa”. Al igual que un ecosistema sano recicla nutrientes y energía para fortalecerse, unas FF.MM. que integren circularidad y medición térmica no solo aseguran su operatividad, sino que evolucionan hacia un sistema que se retroalimenta de su inteligencia logística (Ellen MacArthur Foundation, 2020; Liggins, 2024). Así, la sostenibilidad deja de ser un objetivo secundario y se convierte en una ventaja estratégica que redefine la seguridad nacional, ampliándola hacia la protección integral de los recursos y capacidades que sostienen el poder de la Nación.

Para dar continuidad a lo expuesto en este capítulo, futuras investigaciones deberán enfocarse en validar experimentalmente el modelo integrador en entornos operativos - logísticos reales, adaptando las técnicas calorimétricas a condiciones tropicales y de alta humedad. Asimismo, se sugiere explorar nuevos estabilizadores y materiales sostenibles para MYME, desarrollar sistemas predictivos basados en inteligencia artificial y minería de datos, e integrar métricas de circularidad y trazabilidad en la gestión logística. Finalmente, sería clave evaluar con datos empíricos y KPIs el impacto económico, ambiental y

estratégico de estas prácticas para consolidar políticas de defensa sostenibles y regenerativas en el contexto colombiano.

## [T1] Referencias (APA séptima edición)

Agencia EFE. (2025, junio 5). *Petro ordena renovar “todo el armamento” del Ejército tras hallar material bélico vencido*. ELHERALDO.CO.

<https://www.elheraldo.co/colombia/2025/06/05/petro-ordena-renovar-todo-el-armamento-del-ejercito-tras-hallar-material-belico-vencido/>

Amézquita Sanabria, W. J. (2024). *Implementación de un modelo de logística inversa para la disposición final de municiones obsoletas en la Armada Nacional*. Escuela Superior de Guerra «General Rafael Reyes Prieto».

<https://www.esdegrepositorio.edu.co/bitstream/handle/20.500.14205/11263/ARTICULO%20DE%20REVISION%20CCAIEL%20WALTER%20AMEZQUITA%20SANABRIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Boers, M. N., & de Klerk, W. (Wim) P. C. (2005). Lifetime Prediction of EC, DPA, Akardite II and MNA Stabilized Triple Base Propellants, Comparison of Heat Generation Rate and Stabilizer Consumption. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 30(5), 356-362. <https://doi.org/10.1002/prop.200500026>

Bunyan, P., Baker, C., & Turner, N. (2003). Application of heat conduction calorimetry to high explosives. *Thermochimica Acta*, 401(1), 9-16. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00053-4)

Castañeda Rueda, C. E. (2022). *Estrategia de desarrollo sostenible aplicada a la gestión de logística inversa de material individual de intendencia de las Fuerzas Militares como factor geopolítico de posicionamiento regional*.

<https://www.esdegrepositorio.edu.co/handle/20.500.14205/11130>

- Chocobar Reyes, E. J., & Barreda Medina, R. F. (2025). Estructuras metodológicas PICO y PRISMA 2020 en la elaboración de artículos de revisión sistemática: Lo que todo investigador debe conocer y dominar. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(1), 8525-8543. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i1.16491](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16491)
- Circle Economy. (2021). *Circularity Gap Report 2021*. The Platform for Accelerating the Circular Economy (PACE).
- CNAD Ammunition Safety Group. (2004). *Explosives, nitrocellulose based propellants, stability test procedure and requirements using heat flow calorimetry* (No. PFP (AC/326)D(2004)0007; Versión Edition 1).
- Contraloría General de la República. (2025, abril 2). *Advertencia al Gestor Fiscal, Ejército Nacional de Colombia actuación especial de fiscalización a la administración, almacenamiento y conservación de municiones, granadas y explosivos en las unidades militares del Ejército Nacional de Colombia, denominadas centralizadoras y centralizadas*.  
<https://es.scribd.com/document/872225529/2025ee0063342-gr-Luis-Emilio-Cardozo-advertencia-Al-Gestor-Fiscal-1>
- Cumming, A. S., & Johnson, M. S. (2019). *Energetic Materials and Munitions: Life Cycle Management, Environmental Impact, and Demilitarization*. Wiley-VCH.
- de Klerk, W. P. C. (2015). Assessment of Stability of Propellants and Safe Lifetimes. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 40(3), 388-393.  
<https://doi.org/10.1002/prop.201500040>
- De Souza Defanti, B. F. (2019). *INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO NO DESEMPENHO BALÍSTICO DE PROPELANTES À BASE DE NITROCELULOSE* [Curso de Mestrado em Química, Instituto Militar de Engenharia].  
[https://www.repositorio.mar.mil.br/bitstream/ripcmb/844505/1/DISSERTACAO\\_CT\\_BIANCA\\_FIGUEIROA.pdf](https://www.repositorio.mar.mil.br/bitstream/ripcmb/844505/1/DISSERTACAO_CT_BIANCA_FIGUEIROA.pdf)

- Defanti, B. F. D. S., Mendonça-Filho, L. G. D., & Nichele, J. (2020). Effect of ageing on the combustion of single base propellants. *Combustion and Flame*, 221, 212-218. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.07.029>
- Dokić, M., Bajić, Z., & Ignjatović, V. (2024). Towards the reliable chemical stability testing of the single base gunpowder using a microcalorimetry method. *Vojnotehnicki Glasnik*, 72(3), 1395-1413. <https://doi.org/10.5937/vojtehg72-51113>
- Durán De las Salas, G., Sanabria Gaitán, G., Joya Prieto, A., Ramírez Ramos, M., & González Fernández, C. (2018). Logística inversa naval en Colombia: Prioridad creciente en el marco de la legislación ambiental. *Ensayos sobre Estrategia Marítima*, 3(8), Article 8. <https://doi.org/10.25062/2500-4735.431>
- Dussi, M. C., & Flores, L. B. (2018). Visión multidimensional de la agroecología como estrategia ante el cambio climático. *INTER DISCIPLINA*, 6(14), Article 14. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2018.14.63384>
- Elbasuney, S., Elghafour, Ashraf. M. A., Radwan, M., Fahd, A., Mostafa, H., Sadek, R., & Motaz, A. (2019). Novel aspects for thermal stability studies and shelf life assessment of modified double-base propellants. *Defence Technology*, 15(3), 300-305. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.09.005>
- Ellen MacArthur Foundation (Director). (2020, febrero 12). *Ellen MacArthur sobre los fundamentos de la economía circular* [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=NBEvJwTxs4w>
- Ellen Macarthur Foundation. (2021, febrero 12). *El diagrama de la mariposa: Visualizando la economía circular*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/el-diagrama-de-la-mariposa>
- Ghosh, S. K., Ghosh, K., Das, S., Dan, P. K., & Kundu, A. (Eds.). (2021). *Advances in Thermal Engineering, Manufacturing, and Production Management: Select*

*Proceedings of ICTEMA 2020*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-2347-9>

Herramientas para Investigación en Salud (Director). (2022, diciembre 19). *Revisiones Sistemáticas de Literatura con RAYYAN* [Video recording].  
<https://www.youtube.com/watch?v=zTGUdRodRpM>

Jawale, L., Dey, D., M., M., Gupta, M., & Bhattacharya, B. (2013). Effect of Experiment Environment on Calorimetric Value of Composite Solid Propellants. *Defence Science Journal*, 63(5), 467-472. <https://doi.org/10.14429/dsj.63.2896>

JBÍ (Director). (2021, junio 22). *13 JBÍ SUMARI Tutorial: Critical appraisal* [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=JPwkeWuX2mo>

Kirchhof, E., Rocha, R. J., Nakamura, N. M., Lapa, C. M., Pinheiro, G. F. M., Gonçalves, R. F. B., Rocco, J. A. F. F., & Iha, K. (2016). ESTIMATE OF PBX (PLASTIC-BONDED EXPLOSIVE) SHELF LIFE WITH ACCELERATED AGING. *Química Nova*. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20160072>

Krabbendam-La Haye, E. L. M., De Klerk, W. P. C., Mischczak, M., & Szymanowski, J. (2003). Compatibility testing of energetic materials at TNO-PML and MIAT. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 72(3), 931-942.  
<https://doi.org/10.1023/a:1025034719070>

Liggins, S. (2024, diciembre 2). *Sustainable circular economics for Defence concept note*. [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/67bc5f9c4ad141d908353450/Sustainable\\_circular\\_economics\\_for\\_Defence\\_concept\\_note.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/67bc5f9c4ad141d908353450/Sustainable_circular_economics_for_Defence_concept_note.pdf)

Mariño Munar, J. D. (2017). *MODELO DE LOGÍSTICA INVERSA PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE LA MUNICIÓN NAVAL MAYOR DE LA ARMADA NACIONAL* [Trabajo de Grado para optar el título de Magister en Gestión Logística]. Escuela Naval de Cadetes «Almirante Padilla».

Matres Manso, E. (2025). La OTAN ante la amenaza del cambio climático. *Revista Española de Defensa*, 54-57.

- MDN. (2023, junio 1). *Manual estandar de logística inversa del sector defensa*.  
Viceministerio para la Estrategia y planeación.
- Miranda, V. A. (2023, julio 10). Cambio Climático: Desafíos de la Seguridad y Defensa en la Adaptación y Mitigación. *IADC Publications Page*.  
<https://publications.iadc.edu/2023/07/cambio-climatico-desafios-de-la-seguridad-y-defensa-en-la-adaptacion-y-mitigacion/>
- Mora, R., & Rodríguez, J. J. (2022, junio 31). LA LOGÍSTICA INVERSA Y SU IMPORTANCIA EN LA FUERZA TERRESTRE DEL ECUADOR. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, II(2), 74-90.
- Namir, H., Mojca, K.-Å. kufca, Zahida, A., Azra, B.-H., & Rasim, O. (2021). Analysis of stability of naturally aged single base propellants. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 15(1), 1-7. <https://doi.org/10.5897/AJPAC2020.0859>
- Núñez-Cacho Utrilla, P., & Górecki, J. (2023). La economía circular en el sector industrial europeo de la defensa: Bases para su desarrollo y modelos a seguir. *Economía industrial*, 430, 73-80.
- Núñez-Regueira, L., Proupín-Castiñeiras, J., & Rodríguez-Añón, J. A. (2004). Design of an experimental procedure for energy evaluation from biomass. *Thermochimica Acta*, 420(1-2), 29-31. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2003.11.055>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799.  
<https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>

- Pedraza Martínez, J. D. (2024). *La relevancia de la logística inversa en el Ejército Nacional de Colombia*.  
<https://www.esdegrepositorio.edu.co//handle/20.500.14205/10986>
- Phillips, C. (2023, noviembre 22). 7.3.6.3 *Evaluación de la calidad metodológica—Manual del JBI para la Síntesis de la Evidencia—Confluence*. <https://jbi-global.atlassian.net/wiki/spaces/MDJPLSDLE/pages/237535603/7.3.6.3+Evaluaci+n+de+la+calidad+metodol+gica>
- Queiroz, F., Viegas Queiroz, J., Cordeiro De Oliveira, R., & Pereira Queiroz, A. (2024, noviembre 7). INICIATIVAS E ESTRATÉGIAS PARA A ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE DEFESA. *Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. ENEGEP 2024 - Encontro Nacional de Engenharia de Produção, PORTO ALEGRE/RS - BRASIL.  
[https://doi.org/10.14488/enegep2024\\_tn\\_st\\_419\\_2060\\_47611](https://doi.org/10.14488/enegep2024_tn_st_419_2060_47611)
- Ramírez Nieto, J. C., Sandoval Rubiano, C., Rodríguez Barajas, J. A., & Nieto Galvis, J. M. (2017). *Análisis de la implementación de los procedimientos de logística inversa alineados al plan de transformación del Ejército Nacional para la optimización de los recursos institucionales*.  
<https://www.esdegrepositorio.edu.co//handle/20.500.14205/3715>
- Redacción El País. (2025, julio 13). *Francisco Cubides, comandante de las Fuerzas Militares de Colombia: “Estamos operando a un 60 % de las capacidades”*. Noticias de Cali, Valle y Colombia - Periodico: Diario El País.  
<https://www.elpais.com.co/judicial/francisco-cubides-comandante-de-las-fuerzas-militares-de-colombia-estamos-operando-a-un-60-de-las-capacidades-1354.html>
- Redacción Judicial El Espectador. (2025, junio 5). *Petro ordenó renovar armamento del Ejército, tras jalón de orejas de Contraloría* [Text]. ELESPECTADOR.COM.  
<https://www.elespectador.com/judicial/petro-ordeno-renovar-armamento-del-ejercito-tras-jalon-de-orejas-de-contraloria/>

- Salamanca-Rodríguez, E. A., Cabrera-Ortiz, F., & Reith, S. (2022). Estrategia de Seguridad Nacional Activos Naturales y del Ambiente 2022-2032. En *Sello Editorial ESDEG*. Sello Editorial ESDEG. <https://doi.org/10.25062/9786289530476>
- Steen, L. (2023, diciembre 11). *ARC X TNO - misión Países Bajos 2024* [Comunicación personal].
- Svensson, L.-G., Lagerkvist, P. E., Elmqvist, C. J., Instruments, T., Drive, L., & Castle, N. (2009). *Ampoule microcalorimetry for stability and Compatibility Testing of Explosives and materials*.
- SWI. (2025, junio 5). Petro ordena renovar «todo el armamento» del Ejército tras hallar material bélico vencido. *SWI swissinfo.ch*. [https://www.swissinfo.ch/spa/petro-ordena-renovar-"todo-el-armamento"-del-ejército-tras-hallar-material-bélico-vencido/89470349](https://www.swissinfo.ch/spa/petro-ordena-renovar-)
- Trache, D., & Khimeche, K. (2013). Study on the influence of ageing on thermal decomposition of double-base propellants and prediction of their in-use time. *Fire and Materials*, 37(4), 328-336. <https://doi.org/10.1002/fam.2138>
- Vera Calderón, T. A., Castro Mora, M. M., Candelario Reyes, S. M., Cedeño Pilay, Y. L., Contreras Jaramillo, M. L., & Gomez Wilson, J. M. (2024). *ECONOMÍA CIRCULAR: ESTRATEGIAS PARA LA SOSTENIBILIDAD EN LA GESTIÓN DE RECURSOS* (No. 4). 27(4), Article 4. <https://doi.org/10.21503/cyd.v27i4.2763>
- Wani, V., Mehilal, M., Jain, S., Singh, P., & Bhattacharya, B. (2012). Prediction of Storage Life of Propellants having Different Burning Rates using Dynamic Mechanical Analysis. *Defence Science Journal*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Prediction-of-Storage-Life-of-Propellants-having-Wani-Mehilal/484b3e423196a69035a6cdccaf174c5c0413a8d1>