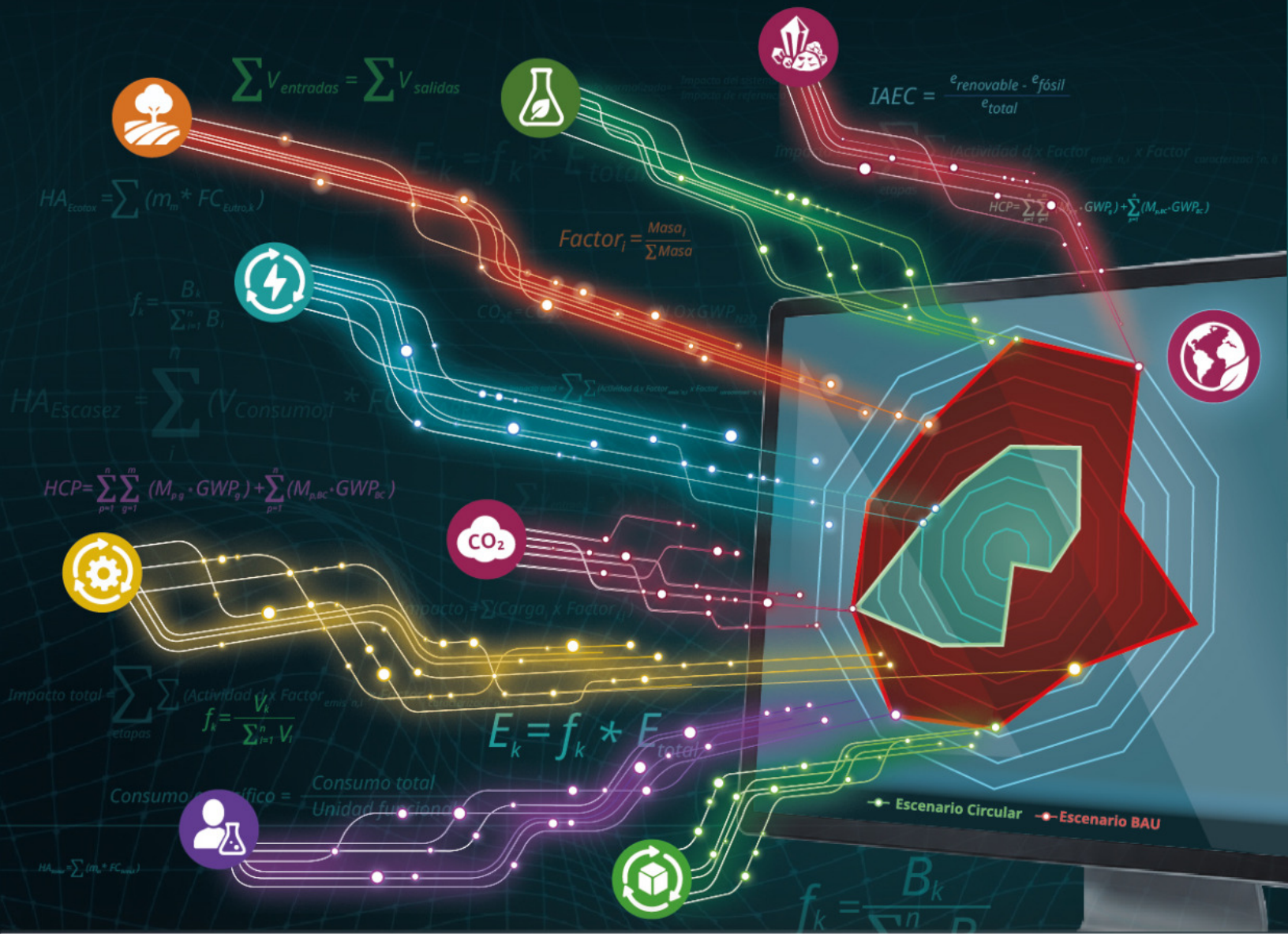
Metodología de Medición y Evaluación de la Circularidad de Productos y Servicios

CPS
COORDINACIÓN POLITÉCNICA PARA LA SUSTENTABILIDAD

Más allá del Reciclaje

versión 1

5 de Junio
Día Mundial del Medio Ambiente
2026



Educación
Secretaría de Educación Pública

Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Publicado en 2026 por la

Coordinación Politécnica para la Sustentabilidad del
Instituto Politécnico Nacional

© IPN 2026

ISNB 03-2026-062912143300-01

AUTORES

Dr. Rodolfo Lacy Tamayo
Mtra. María Eulalia Mildred Castro Hernández
Ing. Olivia Calixto Fernández
Ing. Miguel Fitz Castillo
Mtro. Darío Eduardo Martínez López

Metodología de Medición y Evaluación de la Circularidad de Productos y Servicios

más allá del reciclaje

Versión 1

Índice

Preámbulo 9
I. Economía Circular en México 15
I.1. Definición operativa de Economía Circular 17
I.2. El Sistema Nacional de Economía Circular 22
I.3. Referencias normativas 24
II. Metodología 30
II.1. Objeto de la Metodología 33
II.2. Alcance de aplicación 33
II.3. Principios metodológicos rectores 34
II.4. Terminología 34
II.5. Fases y Etapas de la Metodología 35
II.5.1. Fase de Planeación 40
II.5.2. Fase de Medición 47
II.5.3. Fase de Evaluación 58
II.5.3.1 Evaluación Progresiva 65
II.5.4. Esquemas que garantizan la Trazabilidad y Confiabilidad 67
III. Anexos 73
Anexo I. Terminología 75
Anexo II. Cálculo de Huella de Carbono 83
1. Objeto 83
2. Principio metodológico general 83
3. Relación con otras normas y reglas de categoría 84
4. Definición del objetivo y del alcance 85
5. Límites del sistema, corte y exclusiones 85
6. Inventario del ciclo de vida para la HCP 88
7. Fórmulas generales de cuantificación 89

8. Asignación 90
9. Etapas de uso y fin de vida 91
10. Tratamiento del efecto del tiempo 91
11. Emisiones y remociones específicas de GEI 92
12. Evaluación de impacto 93
13. Electricidad 94
14. Cambio de uso del suelo y uso del suelo 95
15. Emisiones de GEI de aeronaves 95
16. Seguimiento del desempeño 95
17. Interpretación 96
18. Informe de estudio de la HCP 96
19. Revisión crítica 96
20. Limitaciones de la HCP 96
21. Enfoque sistemático de HCP 97
22. Tratamiento del reciclaje 97
Anexo III. Cálculo de Huella Hídrica Circular 99
1. Objetivo y campo de aplicación 99
2. Referencias normativas 99
3. Términos, definiciones y marco conceptual de circularidad 100
4. Análisis de la huella hídrica bajo principios de circularidad 100
Anexo IV. Cálculo de Aprovechamiento Energético Circular 107
1. Objeto 107
2. Definición de las fronteras del sistema 107
3. Modelado de escenarios 107
4. Cuantificación de flujos: medir los ingresos de energía primaria 108
5. Interpretación 109
Anexo V. Cálculo de Huella Ambiental 111
1. Objeto y campo de aplicación 111
2. Términos y conceptos centrales 111

3. Principios del Análisis de Ciclo de Vida 112
4. Definición de objetivo y alcance 113
5. Inventarios de Ciclo de Vida (ICV) 114
6. Asignación de impactos ambientales 115
7. Evaluación de impacto del ciclo de vida 117
8. Normalización, agrupación y ponderación 118
9. Interpretación 119
10. Calidad de datos 120
11. Análisis de sensibilidad 120
12. Incertidumbre 121
13. Reporte 122
14. Fórmula integrada del ACV 122
15. Representación de la Huella Ambiental 123
Anexo VI. Cálculo del Indicador de Circularidad Material 125
Anexo VII. Cálculo de Huella de Agua 127
1. Objetivo y campo de aplicación 127
2. Referencias normativas 127
3. Indicadores de la Huella de Agua 127
4. Inventario de la Huella de Agua (fase de datos) 130
IV. Referencias 133

Índice de Tablas

Tabla 1. Catálogo de software de análisis de ciclo de vida. 47
Tabla 2. Indicadores obligatorios de Circularidad Material en la norma ISO 59020. .. 53
Tabla 3. Indicador obligatorio de Circularidad Funcional en la norma ISO 59020..... 53
Tabla 4. Índice obligatorio MCI de Circularidad Material. 54
Tabla 5. Progresividad en el cumplimiento de la circularidad. 66
Tabla 6. Elementos mínimos del alcance..... 86
Tabla 7. Criterios de calidad de datos. 89
Tabla 8. Variables generales de cálculo. 90
Tabla 9. Tratamiento de electricidad. 95
Tabla 10. Información mínima del informe de huella de carbono. 97
Tabla 11. Variables del reciclaje. 98
Tabla 12. Variables necesarias para considerar para el balance hídrico. 102
Tabla 13. Elementos clave para el cálculo de la Huella Ambiental. 112
Tabla 14. Elementos para incluir en la definición del objetivo y el alcance del ACV. . 113
Tabla 15. Elementos que deben registrarse en los ICV..... 114
Tabla 16. Indicadores obligatorios y complementarios del ACV..... 116
Tabla 17. Categoría en función del flujo para la evaluación de impacto de ciclo de vida. 118
Tabla 18. Ejemplo de cálculo de normalización y ponderación de resultados. 119
Tabla 19. Planteamiento de preguntas para la explicación de datos en el cálculo de la Huella Ambiental. 120
Tabla 20. Componentes y criterios para asegurar la calidad de los datos. 121
Tabla 21. Ejemplo final de integración de huella de carbono por etapas del ciclo de vida de un producto..... 123
Tabla 22. Índice obligatorio e indicadores de la norma ISO 14046 Huella de Agua. . 128
Tabla 23. Índices e indicadores de la ISO/TR 14073 Huella de Agua – ejemplos de cómo aplicar la ISO 14046..... 129

Índice de Figuras

Figura 1. Economía Circular e Integridad Ambiental. 11

Figura 2. Mecanismos Directos de Circularidad Las 8 Rs de la LGEC. 20

Figura 3. Sistema Nacional de Economía Circular, competencias y contribuciones. ... 23

Figura 4. Estándares Internacionales y Nacionales para la medición de la Circularidad de un Producto o Servicio en relación con la LGEC. 24

Figura 5. Alcances de la Evaluación de la Circularidad..... 27

Figura 6. Fases de la Metodología de Medición y Evaluación de la Circularidad. 35

Figura 7. Etapas de la Metodología de Medición y Evaluación de la Circularidad. 36

Figura 8. Flujos de agua para el cálculo de Huella Hídrica por producto o servicio de acuerdo con la definición de la NMX-AA-184-SCFI-2021. 49

Figura 9. Diagrama de la Huella Ambiental resultante. 61

Figura 10. Alcances de inclusión de fuentes emisoras de GEI en esquemas tipo ASG y reportes de huella de carbono. 84

Preámbulo

Durante las últimas dos décadas, la economía circular ha evolucionado desde un concepto emergente asociado principalmente a la gestión de residuos hacia un paradigma integral de transformación económica con implicaciones estructurales para la producción, el consumo, la competitividad industrial, la seguridad de recursos, la acción climática y la regeneración ambiental. Este cambio no ha sido espontáneo; responde a la creciente evidencia de que el modelo económico lineal tradicional —basado en extraer, producir, consumir y desechar— resulta incompatible con los límites biofísicos del planeta, la estabilidad climática y la resiliencia económica de largo plazo.

En este proceso, múltiples organismos internacionales han desempeñado un papel decisivo en la construcción conceptual, metodológica e institucional de la economía circular. La Unión Europea ha sido probablemente el actor regulatorio más influyente, al integrar la circularidad dentro de su política industrial, climática y de materiales críticos, evolucionando desde enfoques centrados en residuos hacia estrategias sistémicas orientadas al diseño de productos, cadenas de suministro resilientes, reparación, reutilización, reciclaje avanzado y reducción de dependencia de materias primas vírgenes. Paralelamente, organismos multilaterales como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE, por sus siglas en inglés), la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) y el Banco Mundial han contribuido a consolidar la economía circular como una herramienta para desacoplar crecimiento económico del consumo intensivo de recursos y de la generación de impactos ambientales.

Uno de los desafíos más relevantes a nivel internacional ha sido la ausencia de una definición universalmente aceptada de economía circular. Sin embargo, existe una convergencia conceptual significativa. La UNECE y la OCDE han identificado como núcleo común la permanencia del valor económico y funcional de materiales y productos durante el mayor tiempo posible, minimizando pérdidas materiales, reduciendo la extracción de recursos naturales y asegurando simultáneamente beneficios ambientales y sociales. Su marco conceptual reconoce cuatro dimensiones estructurales: el ciclo de vida de materiales y productos, las interacciones con el medio

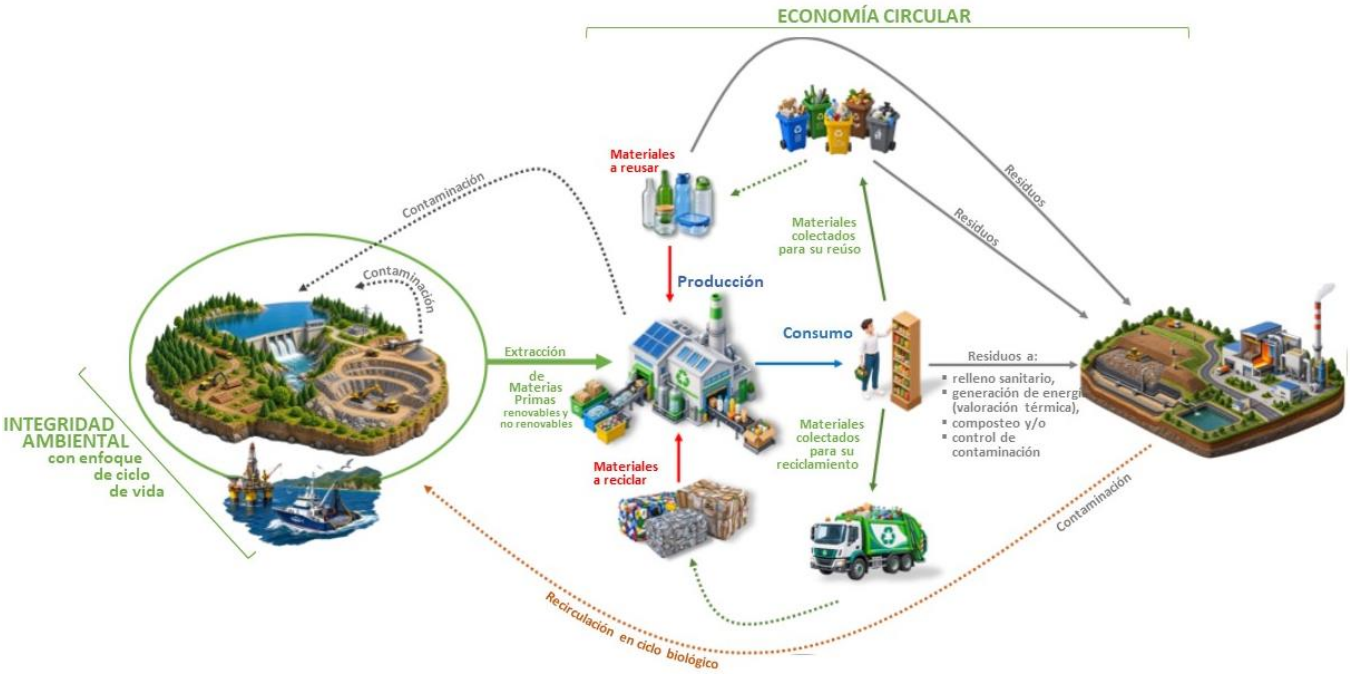
ambiente, las oportunidades socioeconómicas derivadas de la circularidad y las respuestas institucionales necesarias para su implementación. Este enfoque representa un avance crítico porque desplaza la conversación desde una visión limitada del reciclaje hacia una comprensión sistémica basada en flujos materiales, valor económico y desempeño ambiental.

Para el G20 y la OCDE, la economía circular ha dejado de ser una política sectorial de residuos para convertirse en una estrategia macroeconómica y ambiental de carácter estructural. Ambas instancias multilaterales, a los cuales pertenece México, reconocen que la presión creciente sobre los recursos naturales constituye uno de los principales motores de la crisis planetaria triple —cambio climático, pérdida de biodiversidad y contaminación—, por lo que mejorar la eficiencia en el uso de materiales y transitar hacia modelos circulares es indispensable para redefinir los patrones de producción y consumo, prolongar el valor de los materiales y fortalecer la resiliencia económica frente a los límites ambientales. En esta visión, la economía circular implica cerrar, extender y optimizar los ciclos materiales a lo largo de todo el ciclo de vida de productos y cadenas de valor, mediante instrumentos como ecodiseño, responsabilidad extendida del productor, compras públicas verdes, innovación tecnológica, simbiosis industrial y nuevos modelos de negocio orientados a reparación, reutilización, remanufactura y reciclaje de alto valor. El G20 considera este tema particularmente estratégico porque sus países concentran aproximadamente el 75% del uso mundial de materiales, el 75% del comercio global y cerca del 80% de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que les confiere una responsabilidad determinante en la transición global.

La OCDE enfatiza además que la economía circular no debe entenderse únicamente como una estrategia de eficiencia material, sino como un instrumento transversal para reducir simultáneamente múltiples presiones ambientales y fortalecer competitividad, resiliencia económica y seguridad de suministro. Su análisis reciente sobre la crisis planetaria triple advierte que, aun con mejoras tecnológicas, el consumo global de materiales podría aumentar cerca de 50% hacia 2050 bajo políticas actuales, agravando emisiones, contaminación y degradación ecosistémica; por ello propone integrar la circularidad en políticas climáticas, industriales, comerciales, urbanas y alimentarias, evitando desplazamientos de impactos entre sectores o etapas del ciclo de vida. También subraya la necesidad de métricas robustas, armonización internacional de indicadores, contabilidad de flujos materiales y cooperación multilateral para cadenas globales de valor más transparentes y eficientes. En esencia, para la OCDE y el G20, la economía circular es un mecanismo de transformación sistémica que combina productividad de recursos, innovación, gobernanza internacional y sostenibilidad ambiental como pilares de una nueva política económica global.

En paralelo, la Fundación Ellen MacArthur ha sido probablemente el actor no gubernamental más influyente en la difusión global de la economía circular, particularmente en el ámbito empresarial y de diseño industrial. Su principal contribución ha sido traducir el concepto en una arquitectura operativa aplicable a empresas, gobiernos y cadenas globales de valor. La Fundación articula la economía circular sobre tres principios fundamentales: eliminar residuos y contaminación desde el diseño, mantener productos y materiales en uso al máximo valor posible, y regenerar sistemas naturales para mantener la integridad ambiental de los ecosistemas de donde se extraen materias primas y energía. Esta formulación ha tenido enorme influencia porque combina racionalidad ambiental con lógica económica, presentando la circularidad no como una carga regulatoria sino como una estrategia de innovación, competitividad y reducción de riesgos de suministro (véase Figura 1).

Figura 1. Economía Circular e Integridad Ambiental.



FUENTE: Elaboración propia IPN, con base en "*Methodology, an approach to measuring circularity*", publicado por la Fundación Ellen MacArthur en 2019.

Uno de los aportes metodológicos más relevantes de la Fundación Ellen MacArthur ha sido el desarrollo del *Material Circularity Indicator* (MCI), una herramienta pionera para medir el grado de circularidad de productos y organizaciones. Este instrumento evalúa

variables como uso de materiales reciclados, reducción de insumos vírgenes, extensión de vida útil, reutilización, remanufactura y reciclabilidad. También reconoce que la circularidad material, por sí sola, no captura completamente el desempeño ambiental o social, por lo que recomienda complementar su uso con indicadores de energía, carbono, agua, toxicidad y riesgos de suministro. El Instituto Politécnico Nacional considera que este enfoque resulta especialmente relevante para México, cuya nueva legislación introduce explícitamente indicadores de economía circular asociados a huella ambiental, huella de carbono, huella hídrica, índice de materiales e índice de aprovechamiento energético, los cuales, permiten avanzar hacia una evaluación más integral de los sistemas productivos y su relación con la integridad ambiental, entendida como la capacidad de los ecosistemas para mantener su estructura, funcionamiento, resiliencia y provisión de servicios ambientales a largo plazo.

Desde una perspectiva técnica, el debate internacional ha evolucionado hacia una cuestión más sofisticada: no basta con medir cuánto material se usa y se recircula, sino qué valor funcional, económico y ambiental conserva durante sucesivos ciclos de uso. Investigaciones recientes han advertido limitaciones de los indicadores tradicionales de circularidad, particularmente cuando no capturan degradación funcional, *downcycling*, múltiples ciclos de uso o compensaciones ambientales no deseadas. Esta discusión es altamente pertinente para México, pues la implementación efectiva de la nueva **Ley General de Economía Circular** (LGEC) requerirá metodologías robustas de medición, reporte y verificación, que eviten el *greenwashing* a nivel sectorial o empresarial, al hacer de la circularidad un simple ejercicio declarativo o de cumplimiento procedimental.

La **LGEC** de México representa un paso notable en la alineación del país con estas tendencias internacionales. La ley adopta una definición moderna y sistémica de economía circular, consistente con los principios promovidos por organismos multilaterales, al definirla como un modelo económico de producción y consumo sostenible orientado a disminuir impactos ambientales mediante ciclos técnicos y biológicos, manteniendo productos y materiales en uso y regenerando sistemas naturales. Asimismo, incorpora conceptos avanzados como diseño circular, análisis de ciclo de vida, huella ambiental, reparabilidad, modularidad, reciclaje inclusivo y encadenamiento sustentable, entre otros, con la responsabilidad extendida del productor (REP) como el hilo conductor de la regulación, lo que coloca al marco jurídico mexicano en una posición conceptualmente comparable con experiencias regulatorias internacionales avanzadas.

Particularmente relevante es que la legislación mexicana trasciende el enfoque tradicional de residuos y adopta una lógica de transformación sistémica de cadenas de valor. La REP deja de ser una política limitada de recuperación postconsumo para convertirse en una obligación integral sobre el ciclo de vida del producto. La inclusión de principios como atemporalidad, modularidad, reparabilidad y prevención de

obsolescencia programada muestra una convergencia clara con el debate europeo sobre "*right to repair*" y ecodiseño.

No obstante, la experiencia internacional y nacional también muestra que aprobar una ley es apenas el inicio. El verdadero desafío reside en traducir principios jurídicos en instrumentos operativos: reglamentos técnicos, metodologías verificables, plataformas de trazabilidad, organismos evaluadores, sistemas de información, incentivos económicos, infraestructura circular y mecanismos de cumplimiento. En este sentido, la colaboración con la academia e instituciones de investigación será esencial. La futura implementación mexicana podría beneficiarse directamente de la integración estratégica de marcos regulatorios internacionales, en especial de las normas ISO para medición de circularidad y ciclo de vida, del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica (SEEA, por sus siglas en inglés) para contabilidad ambiental-económica y de aprendizajes empresariales derivados de los modelos impulsados por la reconocida Fundación Ellen MacArthur.

En suma, la economía circular ha dejado de ser una narrativa aspiracional para convertirse en un componente estructural de la gobernanza ambiental y económica global. México, con su nueva LGEC, se inserta formalmente en esta transformación. El reto ahora no es conceptual, sino institucional y operativo: construir un sistema nacional capaz de medir, verificar, incentivar y escalar prácticas circulares reales que fortalezcan competitividad, reduzcan presión sobre los recursos naturales, mitiguen emisiones, disminuyan residuos y generen valor económico y social sostenible.

I. Economía Circular en México

I.1. Definición operativa de Economía Circular

Las directrices de las Naciones Unidas definen la economía circular como aquella en la que el valor de los materiales se maximiza y mantiene el mayor tiempo posible, se minimiza la entrada y consumo de materiales, y se previene la generación de residuos, reduciendo además los impactos ambientales negativos a lo largo de todo el ciclo de vida de los materiales.

Esta visión converge de manera notable con la definición jurídica adoptada por México en su nueva LGEC, cuyo artículo 3, fracción VIII establece textualmente que la Economía Circular es un:

> *"Modelo económico de Producción y Consumo sostenible que incluye soluciones sistémicas para el desarrollo económico, que disminuyen el impacto ambiental mediante ciclos técnicos y biológicos que permiten la permanencia y reintegración sustentable de los materiales de los productos a la economía, el cual tiene como principios rectores la eliminación de residuos y la contaminación, mantener productos y materiales en uso, así como regenerar los sistemas naturales."*

Esta definición incorpora de forma explícita elementos que en el debate internacional han sido construidos gradualmente: el enfoque sistémico, la integración del ciclo de vida, la circularidad material, la prevención de impactos ambientales y la regeneración ecológica, consolidando una visión normativa moderna y holística.

El marco conceptual de las Naciones Unidas enfatiza que la circularidad debe entenderse como una estrategia jerárquica de preservación de valor, representada mediante el marco de las "*R*", que prioriza intervenciones desde la prevención del consumo material hasta la recuperación final de valor. Así, estrategias como rechazar (*refuse*), repensar (*rethink*), reducir (*reduce*), reutilizar (*reuse*), reparar (*repair*), reacondicionar (*refurbish*), remanufacturar (*remanufacture*), reconvertir (*repurpose*), reciclar (*recycle*) y recuperar energía (*recover*) constituyen una verdadera escalera de circularidad, donde las acciones preventivas y de extensión de vida útil generan beneficios ambientales significativamente superiores al reciclaje convencional.

El significado de las *Rs* de Circularidad*

Uso y manufactura más inteligentes de productos

- **Rechazar** (*Refuse*). Hacer innecesario un producto al abandonar su función o al ofrecer la misma función mediante un producto radicalmente diferente.
- **Repensar** (*Rethink*). Intensificar el uso del producto (por ejemplo, mediante esquemas de uso compartido o introduciendo productos multifuncionales en el mercado).
- **Reducir** (*Reduce*). Incrementar la eficiencia en la fabricación o uso del producto mediante el consumo de menos recursos naturales y materiales.

Extensión de la vida útil del producto y sus componentes

- **Reutilizar** (*Reuse*). Reutilización de un producto descartado por otro consumidor, siempre que aún se encuentre en buenas condiciones y cumpla su función original.
- **Reparar** (*Repair*). Reparación y mantenimiento de un producto defectuoso para que pueda seguir utilizándose con su función original.
- **Reacondicionar** (*Refurbish*). Restaurar un producto antiguo y actualizarlo para prolongar su utilidad.
- **Remanufacturar** (*Remanufacture*). Utilizar partes o componentes de un producto descartado para fabricar un nuevo producto con la misma función original.
- **Reconvertir o Reutilizar** con nuevo propósito (*Repurpose*). Utilizar un producto descartado, o partes de éste, en un nuevo producto con una función diferente.

Aprovechamiento útil de materiales

- **Reciclar** (*Recycle*). Procesar materiales para obtener materiales de la misma calidad (reciclaje de alto valor) o de menor calidad (downcycling o reciclaje de menor valor).
- **Recuperar** (*Recover*). Incineración de materiales con recuperación de energía.

*UNECE, 2023. *Guidelines for Measuring Circular Economy. Part A: Conceptual Framework, Indicator and Measurement Framework*.

La legislación mexicana adopta un enfoque funcionalmente equivalente, aunque con lenguaje regulatorio propio, al establecer *8 Rs* o mecanismos directos de circularidad como reúso, reducción, rediseño, reacondicionamiento, reparación, remanufactura, reutilización, reciclaje, valorización y recuperación (ver Figura 2), complementados con mecanismos indirectos como el encadenamiento sustentable y la compensación ambiental. Esta equivalencia conceptual, que requiere de una métrica y medición cuantitativa, demuestra que la política mexicana se alinea con la visión internacional de que la economía circular no debe limitarse a gestionar residuos, sino rediseñar integralmente el metabolismo económico y productivo.

Figura 2. Mecanismos Directos de Circularidad Las 8 Rs de la LGEC.



FUENTE: Elaboración propia IPN con base en la Ley General de Economía Circular, adaptado de (UNECE, 2023).

Desde una perspectiva funcional, el marco UNECE/OECD identifica tres mecanismos estratégicos mediante los cuales opera una economía circular:

- **Cerrar ciclos** (*closing loops*), lo que implica reincorporar materiales secundarios y productos recuperados al sistema económico, reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes;
- **Ralentizar ciclos** (*slowing loops*), que supone extender la vida útil de productos mediante atributos de durabilidad, reparabilidad y reutilización en el diseño de productos;
- **Estrechar flujos** (*narrowing flows*), donde se busca mejorar la eficiencia material y reducir la intensidad del uso de recursos por unidad de producción.

La LGEC internaliza claramente estos mecanismos mediante principios jurídicos innovadores como atemporalidad, que promueve productos vigentes y funcionales durante más tiempo; reparabilidad, que obliga a facilitar mantenimiento, refacciones e información técnica; modularidad, que permite actualizar componentes sin sustituir productos completos; y jerarquización, que establece una prelación ambiental entre distintas opciones de gestión material. En otras palabras, esta ley mexicana traduce conceptos abstractos de política internacional en obligaciones normativas concretas para orientar el comportamiento de productores, importadores, consumidores y autoridades públicas.

Otro punto de convergencia esencial es el enfoque integral de ciclo de vida. La UNECE sostiene que una economía circular debe analizar todas las fases del flujo material: extracción, transporte, diseño, manufactura, consumo, reutilización, recuperación y disposición final, incluyendo sus impactos sobre clima, biodiversidad, aire, agua, suelo y salud humana. Este enfoque supera la lógica tradicional de control “al final del tubo” y desplaza la acción pública hacia la prevención, el rediseño y la eficiencia sistémica. La legislación mexicana adopta plenamente esta lógica al incorporar conceptos técnicos avanzados como Análisis de Ciclo de Vida, Diseño Circular, Gestión Circular, Huella Ambiental y Responsabilidad Extendida del Productor, además de establecer indicadores cuantificables como índice de materiales, huella de carbono —incluyendo carbono negro, un contaminante climático de vida corta con efectos tóxicos en la población—, huella hídrica e índice de aprovechamiento energético. Esto convierte a la circularidad en un concepto evaluable y verificable, no meramente declarativo, lo cual es esencial para construir sistemas regulatorios eficaces y comparables internacionalmente.

Finalmente, tanto el enfoque internacional como el mexicano reconocen que la economía circular no constituye únicamente una agenda ambiental, sino una estrategia integral de transformación económica, innovación industrial, resiliencia material y justicia social. La UNECE estructura su marco conceptual sobre cuatro pilares: ciclo de vida material y cadena de valor, interacciones con el ambiente, respuestas y acciones de política pública, y oportunidades socioeconómicas para una transición justa. La LGEC refleja esta visión al establecer un Sistema Nacional de Economía Circular (SNEC), promover instrumentos económicos, auditorías ambientales voluntarias, infraestructura circular, innovación tecnológica, responsabilidad extendida del productor, reciclaje inclusivo y coordinación multinivel entre Federación, entidades federativas, municipios y sectores productivos. En conjunto, ambos marcos configuran una nueva arquitectura de política pública en la que la economía circular deja de ser una política sectorial asociada a residuos para convertirse en un modelo integral de desarrollo económico restaurativo y regenerativo, orientado a fortalecer competitividad, seguridad material, eficiencia productiva, regeneración ambiental y bienestar social de largo plazo.

I.2. El Sistema Nacional de Economía Circular

El SNEC emerge como la columna vertebral institucional para la transformación productiva de México hacia la sostenibilidad, actuando como el gran mecanismo de coordinación de política pública entre la Federación, las entidades federativas y los municipios. Su propósito fundamental es garantizar que los principios rectores de la ley —como la eliminación de residuos desde el diseño de un producto y la regeneración de los sistemas naturales de donde se extraen las materias primas— permee en la gestión ambiental de todos los niveles de gobierno. Bajo la conducción estratégica de la **Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales** (SEMARNAT), este sistema orquesta un cambio de paradigma que busca no solo conservar el entorno, sino también potenciar el valor económico de los materiales en todo el territorio nacional.

El SNEC se apoya en nuevos instrumentos de gobernanza ambiental como son la **Política Nacional** y el **Programa Nacional** de Economía Circular que será publicado en 2026 y la creación de la **Plataforma Nacional** de Economía Circular. A través de este marco de planeación y el establecimiento de una plataforma digital de administración y seguimiento de la **Gestión Circular** de los sectores productivos en México, el Sistema centralizará la información sobre la trazabilidad de los productos y monitoreará el cumplimiento de las metas de **Responsabilidad Extendida del Productor** (REP) mediante parámetros cuantitativos rigurosos. Esta infraestructura de gobernanza de la circularidad garantizará que el progreso del país en este tema sea medible y transparente, proporcionando información veraz a los consumidores y evitando prácticas de comunicación engañosa (*greenwashing* o *circular washing*).

El SNEC incorporará al sector privado y productivo del país a través de los **Acuerdos Generales de Implementación** sectoriales de la REP, para guiar a las empresas y organizaciones [1] en su proceso de reconversión hacia la circularidad. Cuando la SEMARNAT firme estos acuerdos con un sector o categoría de producto, las empresas quedarán obligadas a diseñar una **Gestión Circular** e inscribirla en el **Registro Nacional de Economía Circular**, para después reportar sus actividades. Esta obligación puede cumplirse individualmente o mediante organismos coordinadores sectoriales (ver Figura 3).

Por su parte, la **Procuraduría Federal de Protección al Ambiente** (PROFEPA) desempeña un papel central en el sistema al promover y conducir, por encargo de la SEMARNAT, la auditoría ambiental voluntaria en materia de economía circular, entendida como un proceso sistemático de evaluación preventiva y, en su caso, correctiva, orientado no solo a verificar el grado de cumplimiento de los principios,

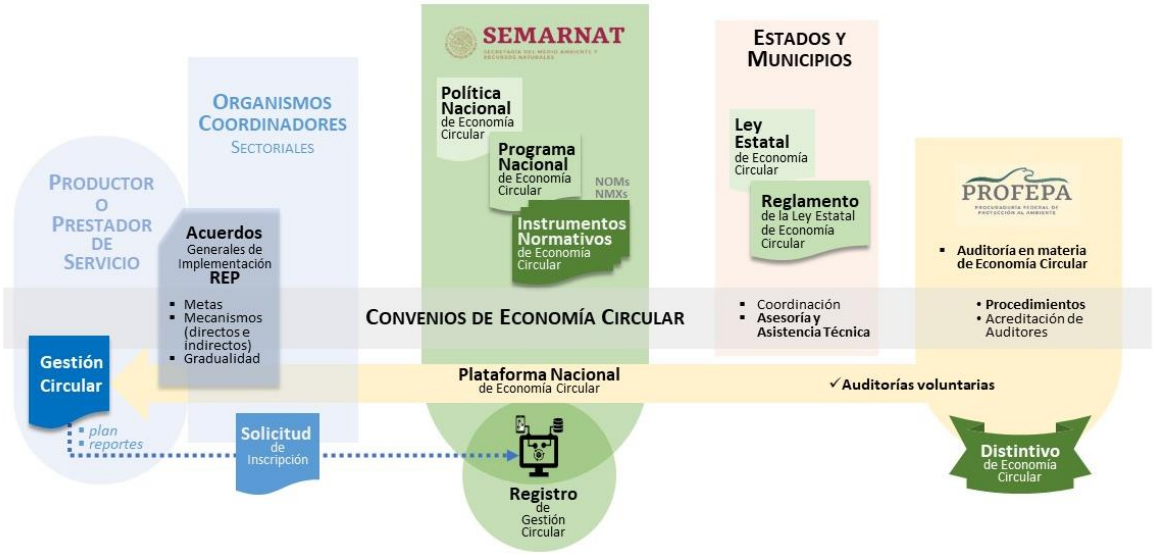
[1] Organismos coordinadores, confederaciones o cámaras nacionales de carácter sectorial.

criterios, disposiciones y objetivos de la Ley, sino a impulsar oportunidades de mejora en procesos productivos, optimizar el uso de recursos, minimizar impactos

ambientales y fortalecer la competitividad del sector productivo. Para ello, la LGEC establece en su artículo 35 que el Reglamento especificará:

> *"…los procedimientos, requisitos y demás disposiciones relativas a la auditoría en materia de Economía Circular, a fin de establecer criterios técnicos,* ***metodologías de evaluación****, acreditación de auditores y los mecanismos de supervisión que aseguren su implementación efectiva, con el objeto de definir las medidas preventivas y correctivas necesarias."*

Figura 3. Sistema Nacional de Economía Circular, competencias y contribuciones.



FUENTE: Elaboración propia IPN con base en el contenido de la Ley General de Economía Circular.

La potestad sancionadora formal recae en la SEMARNAT por conducto de la PROFEPA, quien participará funcionalmente en las actividades de inspección, supervisión y vigilancia ambiental derivadas del marco supletorio de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), particularmente en la verificación del cumplimiento de obligaciones relacionadas con la REP, el otorgamiento y uso adecuado del **Distintivo Nacional de Economía Circular** y la observancia de la normativa ambiental aplicable. En términos prácticos, la PROFEPA actúa como el brazo operativo de aseguramiento del cumplimiento ambiental, con énfasis en prevención, auditoría, mejora continua y control regulatorio.

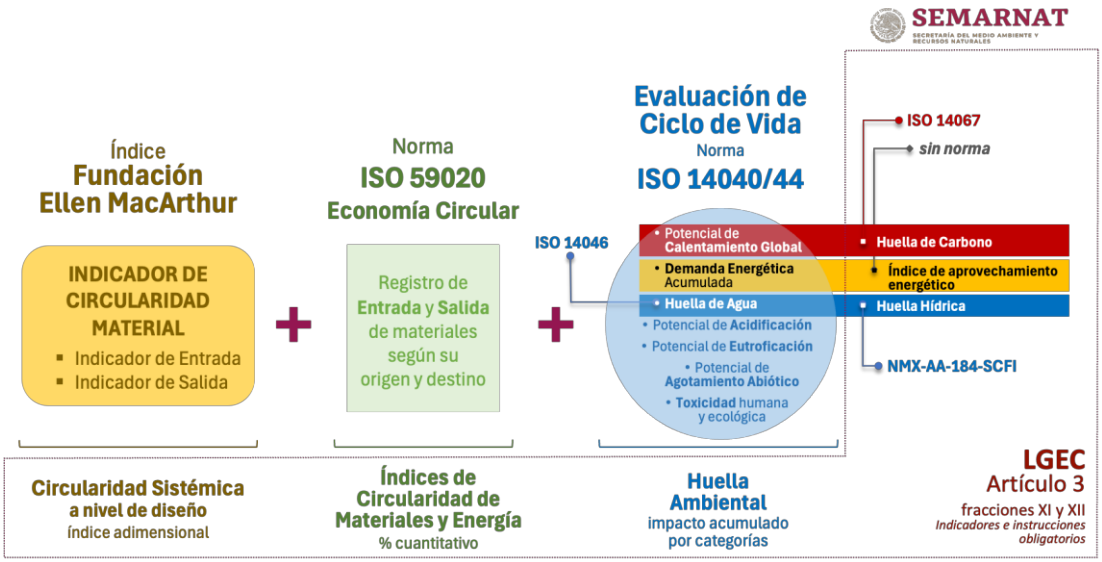
I.3. Referencias normativas

Para preparar los documentos y reportes de Gestión Circular, la LGEC solicita explícitamente (artículos 15 y 39) que se adopte un enfoque de ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final o reincorporación de materiales, y solicita que las empresas u organizaciones que elaboran productos o prestan un servicio (empleando diversos productos), cuantifiquen el grado de circularidad de sus productos, procesos o sistemas, a través de un **Índice de Economía Circular** que debe construirse utilizando los siguientes índices o indicadores de desempeño ambiental (artículo 3, fracción XII):

- **Índice de materiales**
- **Huella de Carbono (incluyendo Carbono Negro)**
- **Huella Hídrica**
- **Índice de Aprovechamiento Energético**

La medición cuantitativa de estos índices e indicadores de Economía Circular nos deben permitir la determinación del impacto o **Huella Ambiental** de las actividades realizadas para generar un producto o prestar un servicio y con ello, salvaguardar la integridad ambiental y evitar el *green* o *circular washing*.

Figura 4. Estándares Internacionales y Nacionales para la medición de la Circularidad de un Producto o Servicio en relación con la LGEC.



FUENTE: Elaboración propia IPN.

Como lo muestra la Figura 4, existen muy diversas referencias internacionales, para medir organizada y confiablemente la mayoría de estos indicadores en diversas modalidades, granularidades y enfoques complementarios. No obstante, en México aún no hay Normas Oficiales Mexicanas (NOM) ni Normas Mexicanas (NMX) para todos los índices e indicadores especificados por la LGEC.

En particular, no hay referencias normativas nacionales o internacionales para medir y evaluar la huella de carbono incorporando el carbono negro, un contaminante climático de vida corta, altamente relevante en salud pública por su toxicidad asociada, como tampoco existe un índice de aprovechamiento.

La LGEC especifica en su artículo 6, fracción III, que la Federación, a través de la SEMARNAT, deberá expedir la Norma Oficial Mexicana de Economía Circular. Para ello, podrá utilizar la familia ISO 59000, la cual incluye a la fecha las siguientes referencias:

- ✓ ISO 59004:2024. Economía circular - Vocabulario, principios y orientación para la implementación.
- ✓ ISO 59010. Economía circular – Orientación para la transición de modelos de negocios y redes de valor.
- ✓ ISO 59014:2024. Gestión ambiental y economía circular – Sostenibilidad y trazabilidad en la recuperación de materiales secundarios – Principios y requisitos.
- ✓ **ISO 59020. Economía circular – Medición y evaluación del desempeño circular.**
- ✓ ISO/TR 59031:2026. Economía circular – Enfoque basado en el desempeño – Análisis de casos de estudio.
- ✓ ISO/TR 59032:2024. Economía circular – Revisión de redes de valor existentes.
- ✓ ISO 59040:2024. Economía circular – Hoja de datos de circularidad de producto.

Con respecto al Índice de Economía Circular referido en la LGEC, el más cercano es el índice adimensional de circularidad material empleado por la Fundación Ellen MacArthur para fines comparativos entre empresas y/o productos. No obstante, por las especificidades de la LGEC, referidas al inicio de esta sección, este indicador puede ser de gran utilidad para medir el nivel de competitividad internacional de los productos y servicios mexicanos, así como de los distintivos que en su momento se expidan.

Asimismo, las normas internacionales ISO 14046:2014, 14040 y la 59020, dan indicaciones de cómo calcular la Huella de Agua, cuya definición y alcance es distinta a la especificada en la norma mexicana NMX-AA-184-SCFI sobre Huella Hídrica. Las principales diferencias entre ambas son las siguientes:

Huella de Agua (Normas ISO 14046 / ISO 59020:2024)

- Alcance: Es un análisis de impacto multicriterio. No solo mide volumen, sino cómo el ciclo de vida del producto afecta la calidad del agua (acidificación, eutrofización, contaminación) y su escasez.
- Metodología: Basada estrictamente en el ACV (Análisis de Ciclo de Vida), incluyendo impactos indirectos de la cadena de suministro.
- Localización: El impacto es altamente dependiente del estrés hídrico de la ubicación geográfica específica.

Huella Hídrica Azul Directa (NMX-AA-184-SCFI-2021)

- Alcance: Es una medición volumétrica de eficiencia. Se centra exclusivamente en el agua incorporada al bien o consumida (evaporada/perdida) en el sitio de producción.
- Exclusión: Específicamente no considera los impactos indirectos (agua usada para fabricar insumos fuera del sitio).
- Propósito: Diseñada para acreditar el ahorro efectivo de aguas nacionales ante la autoridad (Conagua) y obtener incentivos o sellos de cumplimiento.

En la Figura 4 se han alineado las normas que guardan mayor relación con los requerimientos establecidos en la LGEC; se observa que actualmente no existen normas nacionales o internacionales que permitan medir de manera integral la totalidad de la Huella Ambiental en los términos específicos planteados por dicha Ley. Aun así, su evaluación puede aproximarse mediante metodologías de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) estandarizadas a través de las normas ISO 14040/44/46, las cuales incorporan indicadores y categorías de impacto ambiental relacionados —aunque no idénticos— a los previstos por la ley referida que, permiten evaluar impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de productos o servicios, contribuyendo así al análisis de la **integridad ambiental** de los ecosistemas de los cuales se obtienen las materias primas, materiales vírgenes y recursos energéticos.

En este contexto regulatorio, los indicadores de un **Inventario de Ciclo de Vida** (ICV) cuantifican flujos físicos como consumo de materias primas, materiales reciclados, agua, energía, combustibles, emisiones atmosféricas (CO_2, CH_4, NOx, SOx, partículas, compuestos orgánicos volátiles), descargas al agua, residuos, uso de suelo, ruido y otros parámetros ambientales relevantes. Estos indicadores constituyen la base empírica de un ACV y permiten caracterizar la Huella Ambiental del sistema evaluado.

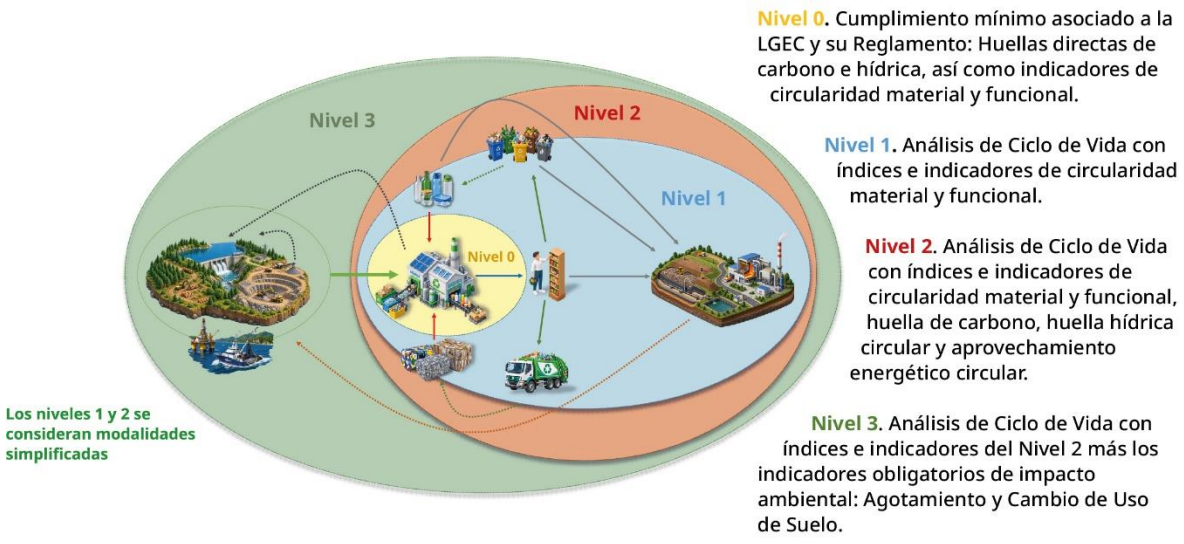
A partir de estos datos, la fase de **Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida** (EICV) transforma los flujos inventariados en categorías de impacto ambiental potencial mediante factores de caracterización. Entre los indicadores más comúnmente utilizados se encuentran cambio climático (kg CO_2 equivalente), acidificación (kg SO_2 equivalente), eutrofización (kg PO_4 equivalente), formación de ozono fotoquímico (O_3),

agotamiento de recursos fósiles y minerales, toxicidad humana, ecotoxicidad, material particulado (PM), uso o escasez hídrica, uso del suelo y agotamiento de la capa de ozono. Las normas ISO no establecen una lista cerrada obligatoria de indicadores, sino que exigen que éstos sean consistentes con el objetivo, alcance, unidad funcional y calidad de datos del estudio, permitiendo seleccionar metodologías reconocidas según el propósito de evaluación.

Esta Metodología propone trabajar la progresividad analítica de la Gestión Circular, a través de cuatro niveles o modalidades de reporte, todos ellos basados en un Análisis de Ciclo de Vida como lo indica la LGEC.

La Figura 5 ilustra cómo el foco de atención de la Gestión Circular inicia en la planta productiva, documentando sus impactos directos, y se va extendiendo hasta abarcar todas las componentes del sistema productivo y de consumo, incluyendo los procesos vinculados a las *8 Rs*, terminando por considerar a los ecosistemas de donde se extraen los recursos naturales o materias primas y energía, y a donde van a dar los contaminantes que el sistema genera.

Figura 5. Alcances de la Evaluación de la Circularidad.



FUENTE: Elaboración propia IPN con base en Moraga G. *et al.* (2019).

Las modalidades o niveles de Análisis de Ciclo de Vida (ver Figura 5) son:

Nivel 0. Cuantificación y reporte de las huellas directas de carbono (Alcance 1 de (WRI/WBCSD, 2011)) e hídrica (NMX-AA-184-SCFI) derivadas de la actividad del productor o prestador de servicio, y los indicadores obligatorios de circularidad material del producto o servicio en toda su cadena de suministro y de valor (ISO 59020:2024, ver Tabla 2).

Nivel 1. Análisis de Ciclo de Vida con índices, huella de carbono Alcance 2 e indicadores de circularidad material y funcional (combinación de normas ISO 59020:2024 y 14040, ver **Etapa 6,** II.5.2. Fase de Medición).

Nivel 2. Análisis de Ciclo de Vida con índices e indicadores de circularidad material y funcional, Huella de Carbono Alcance 3 incluyendo carbono negro (Anexo II), Huella Hídrica Circular (Anexo III) y Aprovechamiento Energético Circular (Anexo IV).

Nivel 3. Análisis de Ciclo de Vida con índices e indicadores del **Nivel 2** más los indicadores obligatorios de impacto ambiental (Agotamiento Abiótico, Toxicidad Humana y Ecotoxicología, Huella de Agua y Cambio de Uso del Suelo) (Anexo V).

Se considera que los Niveles 1 y 2 son modalidades simplificadas del ACV, como lo indica la fracción I del artículo 15 de la LGEC.

II. Metodología de Medición y Evaluación de la Circularidad de Productos y Servicios

La LGEC de México tiene como propósito fundamental la disminución del impacto ambiental causado por el desarrollo y crecimiento de las actividades productivas y de servicio en nuestro país. La circularidad no constituye una propiedad binaria ni un atributo exclusivamente material. Se trata de un desempeño sistémico y multidimensional que exige una evaluación técnica rigurosa, verificabilidad independiente, trazabilidad metodológica y coherencia ambiental integral a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o servicio.

La existencia de múltiples enfoques metodológicos internacionales para medir y evaluar la circularidad de industrias y empresas plantea desafíos relevantes. Mientras algunos modelos privilegian métricas puramente materiales, otros incorporan dimensiones funcionales, ambientales, energéticas, hídricas, económicas y sociales. No se omite señalar que existe el riesgo de que una mejora aparente en circularidad genere efectos adversos no intencionados, como mayores emisiones atmosféricas, toxicidad, consumo excesivo de combustibles fósiles o alteraciones de los ciclos hídricos y de nutrientes, fenómenos conocidos como desplazamientos de impactos ambientales (*burden shifting*[2]).

Una metodología robusta debe reconocer que un producto no es circular únicamente porque incorpore material reciclado, ni porque sea potencialmente reciclable, sino cuando demuestra capacidad verificable de mantener la integridad del medio ambiente, así como el valor económico, funcional y material durante múltiples ciclos, pero siempre evitando transferencias de carga o deseconomías ambientales externas hacia otros sistemas, territorios, a la población e inclusive a generaciones futuras.

En congruencia con los principios de la LGEC, la presente metodología propone un proceso integrado, técnicamente robusto y verificable para medir y evaluar la circularidad de productos, servicios y sistemas producto-servicio, armonizando enfoques provenientes del análisis de ciclo de vida, métricas de circularidad material y funcional, principios regulatorios y sistemas de evaluación de la conformidad con normas nacionales e internacionales.

[2] Concepto común en las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida, como son: UNEP, 2011. Global *Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases*; UNEP/SETAC *Life Cycle Initiative methodological guidance*; o la Recomendación 2021/2279 de la Unión Europea que establece los métodos de medición de la huella ecológica.

II.1. Objeto de la Metodología

La presente Metodología tiene por objeto establecer el marco conceptual, técnico y procedimental para la medición y evaluación integral del desempeño circular de productos, servicios, procesos, sistemas producto-servicio y organizaciones, mediante indicadores cuantitativos y cualitativos verificables que permitan:

- Determinar el grado de circularidad material, funcional y ambiental de un sistema evaluado;
- Medir la capacidad de un producto o servicio para mantener valor económico, técnico y funcional durante el mayor tiempo posible;
- Cuantificar la reducción en la dependencia de materiales vírgenes y el incremento en el uso de materias primas secundarias;
- Evitar desplazamientos de impactos ambientales entre etapas del ciclo de vida;
- Sustentar declaraciones verificables de desempeño circular;
- Apoyar procesos regulatorios, esquemas de certificación, etiquetado, auditoría ambiental, compras sostenibles, ecoinnovación y evaluación de conformidad;
- Prevenir prácticas engañosas de *greenwashing* o *circular washing*.

II.2. Alcance de aplicación

La Metodología podrá aplicarse a cualquier sector económico, unidad productiva, empresa u organización, sin importar su tamaño, tipo, ubicación o posición en una cadena de valor que implique procesos de generación, importación, exportación, transporte, distribución, comercialización y consumo de un producto, así como la prestación de un servicio en México. Específicamente puede aplicarse a:

- **Productos**. Bienes físicos terminados, intermedios o componentes, como pueden ser envases, empaques, aparatos eléctricos o electrónicos, textiles, materiales de construcción, productos químicos, bienes duraderos, maquinaria o productos agroindustriales, entre muchos otros.
- **Servicios**. Servicios cuya prestación involucre uso de materiales, productos, energía, infraestructura o logística. Algunos ejemplos son transporte, servicios digitales con infraestructura física, servicios educativos, hospitalarios, turísticos, de manejo de residuos sólidos o energéticos.
- **Sistemas producto-servicio.** Modelos híbridos donde el valor se entrega mediante funcionalidad y no necesariamente transferencia de propiedad, como pueden ser servicios de renta de equipos de construcción, movilidad compartida y logística, plataformas de reutilización, entre otros.
- **Organizaciones o procesos**. Cuando el objetivo sea evaluar el desempeño agregado de productos, servicios o sistemas producto-servicio.

II.3. Principios metodológicos rectores

- **Enfoque sistémico.** Todo producto o servicio deberá evaluarse considerando sus interacciones con sistemas económicos, ambientales, tecnológicos y sociales.
- **Enfoque de ciclo de vida.** La evaluación abarcará extracción, manufactura, transporte, distribución, uso, mantenimiento, reutilización, remanufactura, reciclaje, valorización y disposición final.
- **Circularidad jerarquizada.** Se priorizarán estrategias preventivas sobre correctivas o compensatorias, conforme a la jerarquía funcional descrita en la LGEC como Mecanismos Directos de Circularidad (ver Figura 2).
- **No transferencia de cargas ambientales.** No podrá considerarse favorable una mejora en circularidad que incremente impactos en: emisiones, toxicidad, agua, biodiversidad, energía o contaminación.
- **Trazabilidad.** Toda afirmación deberá sustentarse documentalmente.
- **Transparencia metodológica.** Deben declararse todos los supuestos; límites; exclusiones; fuentes bibliográficas y de datos; incertidumbres calculadas y reglas de asignación aplicadas.
- **Comparabilidad.** Comparaciones válidas sólo cuando exista equivalencia funcional.
- **Verificabilidad.** Resultados auditables por terceros independientes.
- **Precaución.** En ausencia de certeza científica, prevalecerá la interpretación más conservadora ambientalmente.
- **Gradualidad y mejora continua.** La circularidad se entenderá como trayectoria de mejora progresiva tendiente a evitar *greenwashing* o *circular washing*.

II.4. Terminología

En esta Metodología se adoptan las definiciones y términos incluidos en la Ley General de Economía Circular (LGEC), la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), la Ley General de Cambio Climático (LGCC) y la Ley de Aguas Nacionales (LAN).

Adicionalmente, se emplean términos y conceptos asociados a los índices e indicadores de la Fundación Ellen MacArthur y las normas de las series ISO 14000 y 59000 (ver Anexo I).

II.5. Fases y Etapas de la Metodología

La medición y evaluación integral de circularidad de productos y servicios deberá planearse y desarrollarse mediante un proceso estructurado, iterativo, documentado y técnicamente verificable de 11 etapas sucesivas orientadas a garantizar consistencia metodológica, comparabilidad y robustez científica.

La Figura 6 muestra la secuencia de estas fases con los esquemas de transparencia requeridos de ley y en las normas internacionales, y la Figura 7 sintetiza las etapas y actividades de la Metodología en sus distintos ámbitos de realización.

Figura 6. Fases de la Metodología de Medición y Evaluación de la Circularidad.



FUENTE: Elaboración propia IPN.

Modelado de Escenarios Comparativos (dualidad obligatoria)

Dentro de una metodología robusta para la medición y evaluación de la gestión circular, uno de los principios metodológicos esenciales consiste en demostrar que la propuesta circular genera un desempeño superior respecto del modelo convencional al que pretende sustituir. En el contexto de la LGEC, este principio resulta particularmente relevante, ya que la economía circular no se concibe como una declaración aspiracional o conceptual, sino como una transformación verificable de los sistemas de producción, consumo, aprovechamiento y gestión de recursos. En consecuencia, la evaluación no puede limitarse a describir el desempeño aislado de un producto, servicio o proceso bajo una lógica circular; debe necesariamente contrastarse contra una línea base técnicamente equivalente que represente el comportamiento convencional o lineal del sistema evaluado. Este enfoque es plenamente consistente con los principios comparativos de ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, que establecen que toda comparación técnica requiere equivalencia funcional, límites metodológicos consistentes y criterios homogéneos de evaluación, así como con la ISO 59020:2024, que exige que la medición del desempeño circular produzca resultados significativos, comparables y útiles para la toma de decisiones.

Figura 7. Etapas de la Metodología de Medición y Evaluación de la Circularidad.



FUENTE: Elaboración propia IPN, basada en la LGEC y mejores prácticas internacionales de estandarización.

Por ello, esta Metodología incorpora como requisito obligatorio el modelado dual de escenarios comparativos, mediante la construcción de exactamente dos escenarios funcionalmente equivalentes, diseñados bajo supuestos homogéneos, límites consistentes y criterios metodológicos comparables. El primero corresponde al **Escenario BAU** (*Business As Usual*) o escenario base, que representa el modelo convencional o lineal actualmente existente, caracterizado por una lógica predominante de extracción, transformación, consumo y descarte, con mínima recuperación de valor o reincorporación material. Este escenario constituye la referencia metodológica contra la cual se medirá cualquier mejora propuesta y deberá representar de manera realista el desempeño operativo actual del sistema, evitando caricaturas metodológicas o simplificaciones artificiales que favorezcan indebidamente al escenario alternativo. El segundo corresponde al **Escenario Circular**, que representa la propuesta de transformación bajo principios de economía circular, incorporando mecanismos explícitos de conservación de valor material y funcional, reducción de insumos vírgenes, reintegración de recursos y optimización del desempeño sistémico. Ambos escenarios deberán modelarse utilizando la misma unidad funcional, idénticos límites del sistema, criterios equivalentes de calidad de datos y horizontes temporales comparables.

El **Escenario BAU** deberá representar con fidelidad el comportamiento real del sistema lineal bajo condiciones operativas plausibles y verificables. Conforme a la lógica del ACV de la ISO 14044:2006, ello implica modelar de manera completa las etapas relevantes del sistema producto o servicio, incluyendo extracción de materias primas, producción, transformación, transporte, distribución, uso, mantenimiento y disposición final, según corresponda al alcance definido. Este escenario deberá incorporar datos representativos del contexto real, evitando el uso de supuestos obsoletos o deliberadamente ineficientes diseñados para amplificar artificialmente las ventajas del modelo circular. En términos regulatorios, el escenario lineal constituye la línea base contra la cual se evalúan mejoras de desempeño ambiental, circularidad, eficiencia energética, reducción de residuos y conservación de recursos. Cuando existan referencias sectoriales, *benchmarks* regulatorios o configuraciones tecnológicas dominantes, éstas deberán utilizarse como sustento técnico del escenario base.

El **Escenario Circular**, por su parte, deberá modelar la configuración propuesta bajo principios de economía circular conforme a la definición de la LGEC, integrando mecanismos directos e indirectos de circularidad que permitan conservar valor material, funcional o económico dentro del sistema. Entre estos mecanismos podrán incluirse:

Mecanismos directos de circularidad (las *8 Rs*)

- Reparación;
- Mantenimiento;
- Reúso;
- Reciclaje mecánico;

- Reacondicionamiento;
- Remanufactura;
- Reciclaje químico técnicamente justificado;
- Reincorporación de materias primas secundarias;
- Valorización material.

Mecanismos indirectos o sistémicos

- Encadenamiento sustentable
- Compensaciones ambientales
- Prolongación de vida útil;
- Rediseño para modularidad;
- Diseño para desmontaje;
- Sustitución producto-servicio;
- Compartición de activos;
- Logística inversa;
- Simbiosis industrial;
- Optimización de intensidad de uso;
- Regeneración biológica, cuando aplique.

El modelado del Escenario Circular deberá demostrar viabilidad técnica realista, infraestructura disponible o razonablemente implementable, trazabilidad material y coherencia con condiciones operativas plausibles. No se admitirán escenarios circulares idealizados sin sustento técnico o dependientes de capacidades inexistentes.

Desde una perspectiva metodológica, ambos escenarios deberán evaluarse comparativamente utilizando indicadores homogéneos de desempeño, incluyendo al menos circularidad material, circularidad funcional, Huella de Carbono, Huella Hídrica, intensidad energética, emisiones atmosféricas, residuos, toxicidad relevante y cualquier otro indicador aplicable según el sistema evaluado. Este requisito deriva directamente del principio de consistencia metodológica de las normas ISO, que impide comparaciones entre sistemas definidos bajo criterios distintos. Asimismo, deberá analizarse explícitamente la existencia de desplazamientos de impactos ambientales (*burden shifting*), evitando que una mejora aparente en circularidad material genere deterioros significativos en otras categorías de impacto. La comparación deberá realizarse sobre equivalencia funcional estricta; es decir, ambos escenarios deben entregar el mismo servicio o función bajo condiciones comparables. No será metodológicamente válido comparar productos, procesos o servicios funcionalmente distintos o con niveles de desempeño no equivalentes.

En el contexto normativo de la LGEC, esta dualidad obligatoria cumple una función estratégica: transformar la circularidad de una aspiración conceptual a una propuesta técnica demostrable, medible y verificable. La transición hacia modelos circulares exige evidencia objetiva de que la solución propuesta mejora el desempeño respecto del sistema lineal que reemplaza, no sólo en términos materiales, sino también funcionales, ambientales y energéticos. Por ello, esta Metodología establece que ninguna propuesta de circularidad podrá validarse sin demostrar comparativamente, mediante modelado técnico estructurado, que su desempeño supera al Escenario Base equivalente bajo condiciones metodológicamente consistentes. El principio rector es claro: en economía circular, la mejora debe demostrarse, no declararse.

II.5.1. Fase de Planeación

Etapa 1. Definición del objetivo, propósito y tipo de evaluación

Consiste en establecer de manera clara, explícita y verificable el propósito del estudio, la aplicación prevista de los resultados y el público/cliente objetivo.
La definición del objetivo deberá especificar:

> **Naturaleza u objetivo de la evaluación**. Entre otras posibles, el estudio de circularidad puede ser una evaluación interna de desempeño; una certificación ante las autoridades ambientales o de comercio; una declaración pública ambiental tipo ASG[3]; una comparación entre alternativas productivas y de comercialización; un reporte de cumplimiento regulatorio; una auditoría ambiental voluntaria tipo PROFEPA; un procedimiento básico de ecoetiquetado, diseño de nuevos productos o mejora operativa; un reporte de cumplimiento de la REP; o un análisis para solicitar incentivos fiscales o financieros.
> **Objeto evaluado.** Producto**,** servicio, componente, proceso, sistema producto-servicio u organización.
> **Tipo de declaración.** Descriptiva, comparativa, pública, regulatoria, comercial, administrativa o técnica.
> **Nivel de evaluación.** Micro (producto), Meso (cadena de valor), Macro (sector).

Es importante señalar que no podrán realizarse comparaciones públicas entre productos o servicios si no existe equivalencia funcional demostrable.

[3] ASG. Criterios Ambientales, Sociales y de Gobernanza (ESG por sus siglas en inglés).

Etapa 2. Determinación de la unidad funcional o unidad declarada

La unidad funcional constituye el elemento metodológico central para garantizar comparabilidad. Cuando la equivalencia funcional no sea técnicamente viable, podrá utilizarse unidad declarada.

La **unidad funcional** se define como el "*desempeño cuantificado de un sistema del producto para su utilización como unidad de referencia*" (ISO 14044:2006). En términos prácticos, esto significa que la unidad funcional no describe simplemente un objeto físico, sino la función efectiva que dicho producto o servicio proporciona, expresada de forma medible, objetiva y comparable. Su propósito es asegurar que las evaluaciones comparen equivalentes funcionales y no únicamente cantidades físicas.

Por ejemplo, en lugar de comparar "una botella de PET" contra "una botella de vidrio", la unidad funcional correcta sería "la entrega de 1 litro de bebida potable al consumidor en condiciones equivalentes de calidad, conservación y distribución". De igual manera, para servicios podría definirse como "transportar una tonelada-kilómetro de carga", "proveer iluminación de 1,000 lúmenes durante 10,000 horas", o "garantizar refrigeración de X m^3 durante un año". Las normas ISO establecen este concepto precisamente para evitar comparaciones metodológicamente inválidas entre productos que cumplen funciones distintas o niveles de desempeño no equivalentes.

La **unidad declarada**, aunque no es un concepto central de ISO 14044:2006, sí es ampliamente reconocida en normas complementarias de declaraciones ambientales de producto, particularmente ISO 14025:2006 y estándares sectoriales de ACV. Se utiliza cuando no es posible definir o demostrar una equivalencia funcional completa, especialmente en productos intermedios, materiales básicos o estudios descriptivos no comparativos. En estos casos, la referencia se basa en una cantidad física estandarizada del producto, más que en una función. Ejemplos típicos serían: 1 kg de acero, 1 m^3 de concreto, 1 m^2 de panel aislante, 1 litro de pintura, o 1 unidad de componente electrónico. Mientras la unidad funcional responde a la pregunta "*¿qué servicio o desempeño entrega el sistema*?", la unidad declarada responde a "*¿qué cantidad específica del producto se está describiendo*?".

En el contexto de la ISO 59020:2024, aunque la norma no emplea el término "unidad funcional" con el mismo énfasis formal del ACV, sí exige que la evaluación del desempeño circular se realice sobre un "***sistema en foco***" claramente delimitado, con límites espaciales, temporales y funcionales definidos, bajo una lógica de ciclo de vida y comparabilidad significativa. Por tanto, en metodologías de economía circular técnicamente robustas, la unidad funcional sigue siendo el referente preferente cuando se evalúan productos o servicios con fines comparativos o de toma de decisiones, mientras que la unidad declarada resulta aceptable para caracterizaciones

descriptivas, inventarios materiales o productos cuya función no pueda normalizarse adecuadamente.

En términos metodológicos, la unidad funcional mide desempeño; la unidad declarada mide cantidad.

Etapa 3. Delimitación del "sistema en foco" y establecimiento de límites metodológicos

La evaluación deberá definir con precisión qué procesos forman parte de la evaluación de la circularidad de un producto o proceso, determinando un "**sistema en foco"**.

En esta etapa se seleccionarán qué procesos, flujos, actores y etapas serán incluidos en la evaluación y, por exclusión, cuáles quedarán fuera del sistema evaluado. La delimitación del sistema es indispensable para asegurar consistencia metodológica, comparabilidad y validez técnica de los resultados.

Los límites del sistema son límites geográficos, temporales, de proceso y ciclo de vida donde se elabora un producto o se presta un servicio. El concepto de "**sistema en foco**", debe ser entendido como el sistema definido por dichos límites y que constituye el objeto de medición y evaluación. Para ello, se deberán documentar las reglas de inclusión o exclusión de los componentes del sistema, por ejemplo, que formen parte de la cadena de proveeduría o de la cadena de valor. En consecuencia, el evaluador debe evitar delimitaciones arbitrarias o convenientes que distorsionen los resultados, ya que un sistema insuficientemente definido puede producir conclusiones engañosas o no comparables. Toda exclusión deberá justificarse técnicamente.

Los **límites geográficos** determinan la cobertura geográfica y organizacional del análisis, es decir, el espacio físico, territorial o económico dentro del cual se evaluarán los flujos materiales, energéticos y funcionales. La ISO 59020:2024, por ejemplo, establece que la medición de circularidad debe considerar escalas espaciales apropiadas, reconociendo que, particularmente a nivel de producto, la cadena de valor puede extenderse globalmente, a múltiples territorios y jurisdicciones, desde la extracción de materias primas hasta el tratamiento de fin de vida. En términos prácticos, el evaluador debe definir si el estudio cubrirá únicamente una planta o instalación específica, una organización completa, proveedores directos, la cadena logística, una red interorganizacional, un territorio subnacional o incluso un mercado regional o nacional. Esta definición es particularmente relevante en economía circular, donde procesos como reciclaje, remanufactura, logística inversa o recuperación de materiales pueden ocurrir fuera de las fronteras operativas inmediatas del productor. Excluir procesos geográficamente relevantes sin justificación puede conducir a una subestimación significativa de impactos o sobrestimación del desempeño circular.

Los **límites temporales** establecen el horizonte de tiempo durante el cual el sistema será evaluado, aspecto especialmente importante en economía circular debido a que

muchos mecanismos de circularidad dependen del tiempo de permanencia del valor en el sistema. La ISO 59020:2024 indica que la escala temporal debe abarcar todo el ciclo de vida del sistema, desde su creación hasta su disposición final o reintegración, y recomienda evaluaciones periódicas cuando existan cambios tecnológicos, regulatorios o de desempeño relevantes. Por ello, el consultor o evaluador deberá definir variables como la vida útil nominal del producto, su vida útil real observada o esperada, los ciclos de mantenimiento, periodos de reutilización, frecuencia de reacondicionamiento, ciclos de remanufactura y el horizonte regulatorio aplicable. En productos durables, por ejemplo, una evaluación limitada a la etapa inicial de producción podría ignorar beneficios sustanciales asociados a reparación o extensión de vida útil; en contraste, horizontes excesivamente especulativos sin sustento técnico también pueden comprometer la credibilidad del análisis.

Los **límites de proceso** precisan qué tecnologías, procesos y operaciones unitarias o configuraciones operativas serán consideradas en el estudio, reconociendo que el desempeño circular y ambiental depende fuertemente de las condiciones tecnológicas reales y no de escenarios hipotéticos no demostrados. Conforme a los principios de la ISO 14044:2006, el sistema debe reflejar los procesos tecnológicos efectivamente utilizados o razonablemente representativos del sistema evaluado, incluyendo reglas de asignación cuando existan coproductos o procesos compartidos. En economía circular, esto implica definir con claridad las tecnologías de producción, reciclaje, clasificación, separación, transporte, tratamiento térmico, tratamiento químico, recuperación material, logística inversa, fuentes energéticas y procesos auxiliares que forman parte del sistema. Por ejemplo, un producto declarado reciclable no puede evaluarse con base en una tecnología inexistente o no disponible en el contexto geográfico relevante. La robustez metodológica exige que el sistema represente condiciones operativas plausibles, verificables y coherentes con el propósito del estudio.

Finalmente, los **límites del ciclo de vida** determinan qué etapas del ciclo de vida serán incluidas en el análisis, siguiendo enfoques reconocidos internacionalmente. La ISO 14044:2006 establece como referencia el análisis de ciclo de vida completo, aunque admite delimitaciones parciales siempre que estén técnicamente justificadas y alineadas con el objetivo del estudio. En este contexto, pueden aplicarse enfoques “cuna a tumba” (*cradle to grave*), que incluyen extracción, procesamiento, manufactura, distribución, uso, mantenimiento y disposición final; “cuna a cuna” (*cradle to cradle*), que incorporan explícitamente la reintegración circular de materiales y componentes; o “puerta a puerta” (*gate to gate*), limitados a procesos específicos dentro de una instalación o segmento operativo. La ISO 59020:2024 refuerza que los límites deben establecerse bajo una perspectiva de ciclo de vida y asegurar resultados significativos y transparentes. Por ello, cualquier exclusión de procesos, etapas o flujos deberá justificarse técnicamente, documentarse explícitamente y evaluarse en términos de su posible influencia sobre los resultados, evitando simplificaciones que comprometan la integridad metodológica del estudio.

Etapa 4. Caracterización del modelo circular evaluado

No basta medir materiales; debe identificarse el o los mecanismos circulares dominantes empleando estratégicamente las 8Rs como mecanismos directos de circularidad. La evaluación deberá clasificar el modelo conforme a los mecanismos funcionales predominantes.

Como se ha mencionado con anterioridad, la circularidad no debe entenderse únicamente como una medición cuantitativa de materiales recuperados o reciclados, sino como la identificación del mecanismo sistémico mediante el cual se conserva, recupera, extiende o regenera el valor de los recursos dentro del sistema económico. Adicionalmente, no debe perderse de vista el objetivo último de mantener la integridad ambiental de un territorio o del contexto geográfico en que se produce, consume o desecha un producto o se presta un servicio.

El primer mecanismo funcional de un sistema circular corresponde al **cierre de ciclos** (*closing loops*), que representa la forma más clásica y visible de circularidad material. Este enfoque busca reincorporar materiales, componentes o recursos nuevamente al sistema productivo, reduciendo la extracción de materias primas vírgenes y minimizando residuos y pérdidas. Aquí se ubican estrategias como reciclaje mecánico o químico, recuperación de materiales, reprocesamiento industrial, recuperación de componentes y uso de materias primas secundarias. Desde la perspectiva de la ISO 59020:2024, este mecanismo se relaciona con indicadores de flujos circulares de recursos y recuperación de valor, mientras que desde el enfoque del análisis de ciclo de vida conforme a ISO 14044:2006, requiere verificar que dicha reincorporación no implique desplazamientos de impacto ambiental desproporcionadas, razón por la cual es importante reconocer que este mecanismo no constituye automáticamente la estrategia óptima, ya que reciclar materiales con pérdidas de calidad, alta intensidad energética o degradación funcional puede resultar menos favorable que otras formas superiores de conservación de valor.

El segundo mecanismo es la **ralentización de ciclos** (*slowing loops*), considerado una de las estrategias más robustas de economía circular porque preserva el valor funcional del producto durante periodos más largos, evitando o postergando la necesidad de producir reemplazos. En este enfoque se incluyen estrategias como extensión de vida útil, mantenimiento preventivo, reparación, actualización tecnológica, reacondicionamiento y remanufactura. La ISO 59020:2024 reconoce explícitamente la durabilidad como un aspecto central de circularidad y enfatiza la conservación del valor económico, ambiental y social del recurso a lo largo del tiempo. Desde una perspectiva metodológica, esta categoría exige evaluar no sólo la permanencia física del producto, sino también su capacidad real de seguir cumpliendo su función bajo condiciones operativas adecuadas. En muchos casos, ralentizar ciclos genera mayores beneficios ambientales que reciclar materiales, ya que evita el consumo energético y material asociado a fabricar nuevos productos.

Un tercer mecanismo corresponde al **estrechamiento de flujos** (*narrowing flows*), orientado a reducir la intensidad material y energética requerida para cumplir una función equivalente. Aquí el objetivo no es necesariamente extender la vida del producto ni recuperar materiales, sino optimizar el uso de recursos mediante diseño eficiente, miniaturización, reducción de insumos, eficiencia de manufactura o desmaterialización funcional. Ejemplos incluyen envases más ligeros, reducción del espesor de materiales, optimización estructural, digitalización de servicios o mejoras de eficiencia en procesos productivos. Este enfoque es coherente con los principios de administración responsable de recursos y minimización de pérdidas establecidos en la ISO 59004:2024, así como con el enfoque de la ISO 59020:2024 sobre reducción de flujos de entrada y salida del sistema. Sin embargo, metodológicamente debe analizarse con cautela, ya que una reducción material aparente podría generar fragilidad funcional, menor durabilidad o mayor frecuencia de reemplazo, anulando beneficios netos.

La **sustitución funcional** representa una categoría particularmente innovadora dentro de la economía circular, al desplazar el foco desde el objeto físico hacia la función que éste proporciona. En este modelo, el valor no se entrega necesariamente mediante la propiedad del producto, sino mediante acceso, servicio o uso compartido. Ejemplos incluyen esquemas de "producto como servicio" (*product-as-a-service*), arrendamiento, movilidad compartida, plataformas colaborativas y modelos de acceso en lugar de propiedad. Este enfoque se alinea directamente con la lógica funcional implícita en la definición de unidad funcional del análisis de ciclo de vida según ISO 14044:2006, así como con la orientación estratégica de ISO 59010 sobre transición de modelos de negocio circulares. Desde el punto de vista metodológico, la sustitución funcional puede producir beneficios significativos al incrementar intensidad de uso, reducir activos ociosos y optimizar la utilización de recursos, aunque requiere análisis cuidadosos sobre comportamiento del usuario, logística asociada y efectos rebote.

Finalmente, y como lo incluye la LGEC, la **regeneración biológica** comprende aquellos modelos circulares aplicables a materiales de origen biológico o sistemas capaces de reincorporarse de manera segura a ciclos naturales, restaurando capital natural y funcionalidad ecosistémica. Incluye compostaje, digestión anaerobia, biodegradación controlada, recuperación de nutrientes y otras formas de regeneración biológica. Este enfoque resulta plenamente coherente con el principio de resiliencia de ecosistemas reconocido en la ISO 59004:2024, así como con el enfoque de preservación del capital natural presente tanto en marcos internacionales como en legislación de economía circular. No obstante, desde una perspectiva metodológica rigurosa, no basta con que un material sea teóricamente biodegradable; debe demostrarse que existe infraestructura, condiciones ambientales y control operativo que permitan su degradación o recuperación efectiva sin generar impactos secundarios.

En conjunto, estas cinco categorías permiten clasificar con precisión el modelo circular dominante del sistema evaluado y comprender no sólo cuánto material circula, sino cómo y con qué nivel de conservación de valor.

En esta etapa, se debe definir con claridad qué nivel de análisis se pretende en el estudio. Como se indica en la Figura 5, además del **Nivel 0** que sólo incluye información en planta y proveeduría directa, para el cumplimiento de las obligaciones de REP y medición de la circularidad como lo indica la LGEC, deben realizarse evaluaciones de **Nivel 1** y **Nivel 2** consideradas como modalidades simplificadas de ACV, y la de **Nivel 3**, que es la evaluación de ACV integral, considerando impactos ambientales, para determinar la circularidad real de productos y servicios (ver Tabla 5).

II.5.2. Fase de Medición

Etapa 5. Inventario de flujos materiales, energéticos y ambientales

Esta etapa constituye la base cuantitativa e indica que debe documentarse todo flujo relevante, para proporcionar los datos que permitirán la construcción de los índices e indicadores de desempeño circular y ambiental, eficiencia en el manejo de recursos naturales y evaluación de los impactos ambientales, de conformidad con cada nivel de análisis.

Conforme a la ISO 14044:2006, esta fase corresponde conceptualmente a la construcción de un Inventario del Ciclo de Vida (ICV), definido como la recopilación y cuantificación sistemática de entradas y salidas asociadas al sistema del producto a lo largo de su ciclo de vida, mientras que la ISO 59020:2024 establece que la medición de la circularidad debe basarse en la recolección, cálculo y compilación de datos trazables y suficientemente completos sobre los flujos de recursos del "sistema en foco". En consecuencia, esta etapa no consiste únicamente en reunir datos operativos, sino en construir una representación cuantificada, verificable y metodológicamente consistente del metabolismo material y energético del sistema evaluado. La integridad del inventario es determinante, ya que omisiones relevantes, datos inconsistentes o límites mal definidos pueden comprometer toda la evaluación posterior.

Tabla 1. Catálogo de software de análisis de ciclo de vida.

NOMBRE	LICENCIA / COSTO	DESCRIPCIÓN GENERAL	FORTALEZAS CLAVE
SimaPro	**Académica y Comercial**	**Plataforma de referencia en ACV profesional, ampliamente usada en consultoría y academia. Acceso a los Inventarios de Ciclo de Vida EcoInvent.**	**Potente modelado LCA, análisis detallado de impactos y amplia base datos.**
GaBi (Sphera LCA)	Comercial	Suite robusta con altas capacidades de modelado y compatibilidad con numerosos sectores.	Base de datos integrada, modelado complejo, escalabilidad corporativa.
Umberto	Comercial	Herramienta ACV con enfoque visual de modelado y análisis de flujo de materiales.	Interfaz gráfica, análisis dinámico de redes de procesos.
Ecochain Mobius	Comercial	Solución integrada orientada a ACV con automatización de inventarios.	Integración de datos operativos, *dashboards* y reportes.
Ecochain Helix	Comercial	Plataforma complementaria para ACV con enfoque de datos empresariales.	Visualización y métricas de sostenibilidad integradas.
Makersite	Comercial	Herramienta de digitalización de ACV con soporte basado en AI y datos globales.	Automatización de *datasets*, soporte de decisiones de diseño.
Devera LCA	Comercial	Solución de ACV con módulos de ciencia de datos y reportes personalizados.	Integración de datos empresariales, AI, diseño sostenible.
Dcycle	Comercial	Plataforma enfocada en métricas ESG y ACV integradas.	Buen balance entre ACV y métricas de sustentabilidad más amplias.
Air.e LCA	Comercial	Herramienta de ACV con enfoque accesible para especialistas en impacto ambiental.	Interfaz intuitiva y flujos de trabajo simplificados para ACV.
One Click LCA	Comercial	Especializada en ACV de construcción/edificación.	Fuertes vínculos con normativas de construcción sostenible y EPD.

FUENTE: Elaboración propia IPN.

Esta tarea debe ser auxiliada por software especializado, la Tabla 1 muestra, mas no limita, múltiples opciones comerciales o libres, donde destaca EcoInvent, que es la base de datos más amplia y referenciada a nivel global. Como en México la práctica de

realizar ACV aún no está difundida, se recomienda emplear este tipo de software para identificar inventarios que se ajusten a las componentes del "sistema en foco" definida en la **Etapa 3**.

El inventario deberá documentar exhaustivamente todas las **entradas al sistema**, entendidas como los recursos físicos, energéticos o auxiliares necesarios para la producción, operación, mantenimiento o prestación del servicio evaluado. Conforme al enfoque de economía circular, no basta registrar cantidades totales; es necesario caracterizar la calidad, origen y naturaleza funcional de cada flujo. Entre las entradas mínimas deberán incluirse:

Materiales

- Materiales vírgenes o primarios extraídos directamente de la naturaleza;
- Materiales reciclados postindustriales o postconsumo;
- Materiales renovables de origen biológico;
- Componentes recuperados para reúso o remanufactura;
- Sustancias peligrosas o restringidas;
- Materiales críticos o estratégicos con riesgos de suministro.

Energía

- Electricidad adquirida o autogenerada;
- Combustibles fósiles;
- Biomasa;
- Vapor industrial;
- Calor de proceso;
- Energía renovable certificada o autoconsumida.

Agua (ver Figura 8)

- Extracción directa;
- Agua de la red municipal;
- Agua de reúso y recirculada;
- Agua de fuentes no convencionales;
- Descargas o retornos al ambiente;
- Consumo neto y por producto o servicio (Huella de Agua).

Insumos auxiliares

- Empaques;
- Lubricantes;
- Reactivos;
- Solventes;
- Químicos de proceso;
- Materiales de mantenimiento.

La ISO 59020:2024 enfatiza que todos los flujos relevantes deben cuantificarse, bajo principios de trazabilidad, transparencia y suficiencia metodológica.

De igual forma, deberán documentarse de manera rigurosa todas las **salidas del sistema**, ya que éstas reflejan el destino funcional o ambiental de los recursos utilizados y permiten evaluar eficiencia, circularidad y pérdidas. Además del producto principal, deberán identificarse los coproductos y subproductos, particularmente cuando exista necesidad de aplicar reglas de asignación metodológica conforme a la ISO 14044:2006, que define criterios específicos para distribuir cargas ambientales entre múltiples salidas (ver Tabla 2).

Figura 8. Flujos de agua para el cálculo de Huella Hídrica por producto o servicio de acuerdo con la definición de la NMX-AA-184-SCFI-2021.



FUENTE: Elaboración propia IPN para fines ilustrativos, con nomenclatura de la NMX-AA-184-SCFI-2021.

En cuanto a residuos, la clasificación debe reflejar su destino real y no únicamente su potencial técnico, distinguiendo entre:

Residuos

- Reutilizables;
- Reciclables;
- Valorizables energéticamente;
- Peligrosos;
- Enviados a disposición final;
- Pérdidas no recuperadas.

Asimismo, deberán registrarse todas las **emisiones y vertidos**, incluyendo:

Descargas líquidas, sólidas o como aerosoles

- Efluentes líquidos;
- Vertidos al suelo;
- Emisiones fugitivas.

Emisiones atmosféricas

- Gases de efecto invernadero (CO_2, CH_4, N_2O y otros);
- Contaminantes climáticos de vida corta (carbono negro);
- Contaminantes criterio (NO_x, SO_2, CO, PM_{10}, $PM_{2.5}$, precursores de ozono);
- Contaminantes tóxicos (metales, COV, BTX -benceno, tolueno, xileno-, dioxinas, furanos, etc.).

La robustez técnica del inventario depende críticamente de la calidad de los datos utilizados, razón por la cual tanto las normas ISO de ACV como la ISO 59020:2024 establecen requisitos de trazabilidad, transparencia y verificabilidad. En este contexto, se debe establecer una jerarquía metodológica de calidad de datos, priorizando la evidencia más confiable y representativa:

Calidad 1 – Datos primarios medidos

- Mediciones directas;
- Balances de masa;
- Facturación energética;
- Monitoreo instrumental;
- Registros operativos.

Calidad 2 – Datos específicos auditables

- Datos de proveedores;
- Certificados verificables;
- Reportes técnicos específicos;
- Registros de mantenimiento.

Calidad 3 – Datos secundarios reconocidos

- Bases de datos internacionales (ej. Ecoinvent[4] o sphera[5]);
- Literatura científica;
- Estadísticas oficiales;
- Factores de emisión validados.

Calidad 4 – Supuestos documentados

- Estimaciones justificadas;
- Modelaciones;
- Extrapolaciones conservadoras.

En congruencia con la ISO 59020:2024 que distingue explícitamente entre datos primarios y secundarios y exige que la trazabilidad permita rastrear la información hasta sus fuentes originales y verificables, la aplicación de esta Metodología demanda que dicha información deba quedar documentada en las bases de datos e inventarios de ciclo de vida que se construyan o utilicen.

En términos metodológicos, esta etapa debe concebirse como la construcción de un balance integral del metabolismo del ***sistema en foco*** evaluado, y no como una simple recopilación administrativa de consumos y residuos.

Un inventario correctamente estructurado permite identificar pérdidas, fugas de valor, oportunidades de circularidad, dependencia de recursos críticos y riesgos ambientales asociados al sistema. Asimismo, constituye la base para etapas posteriores de medición de circularidad material, desempeño funcional, evaluación ambiental complementaria, MRV y evaluación de conformidad. Por ello, cualquier exclusión, simplificación o estimación deberá justificarse técnicamente y documentarse explícitamente, manteniendo coherencia con el objetivo, el alcance y los límites previamente definidos. En una evaluación rigurosa de economía circular, la calidad del inventario determina directamente la credibilidad de todas las conclusiones posteriores.

[4] Ecoinvent – Data with purpose https://ecoinvent.org
[5] Operational Risk, Safety, Sustainability Management / Sphera: https://sphera.com

Etapa 6. Medición de circularidad material y funcional

La medición de la circularidad material y funcional constituye el núcleo técnico para evaluar el grado en que un sistema conserva, recupera, extiende y mantiene el valor de los recursos dentro de la economía, en consonancia con los principios establecidos por la LGEC y la familia normativa ISO 59000 sobre economía circular. Conforme a la ISO 59004:2024, la circularidad no debe interpretarse exclusivamente como la recirculación física de materiales, sino como la capacidad del sistema para retener, recuperar o incrementar el valor funcional, económico y material de los recursos a lo largo del tiempo, minimizando simultáneamente la extracción de materias primas vírgenes y la generación de residuos.

La medición de circularidad debe incorporar dos dimensiones complementarias y medirse de manera obligatoria:

Circularidad material, que evalúa los flujos físicos de materiales dentro del sistema. La norma ISO 59020:2024 sólo mide obligatoriamente *3 Rs* y la LGEC menciona *8 Rs*, las cuales deben ser incluidas, cuando así se requiera, bajo la misma lógica aritmética (ver Tabla 2),

Circularidad funcional, que analiza la capacidad del producto o sistema para conservar su utilidad, desempeño y función durante el mayor tiempo posible (ver Tabla 3).

La medición de la circularidad material y funcional es fundamental, ya que un producto puede presentar altos niveles de contenido reciclado o reciclabilidad teórica, pero seguir siendo lineal desde una perspectiva funcional si su vida útil es corta, su reparación es inviable o su diseño promueve el remplazo prematuro (caducidad programada). Es el caso de los productos plásticos de un solo uso, en contraste con una hoja de papel fabricado con celulosa virgen, que puede reciclarse hasta siete veces sucesivamente como papel de segunda clase, cartón, conglomerado y finalmente como abono o combustible.

Tabla 2. Indicadores obligatorios de Circularidad Material en la norma ISO 59020.

CATEGORÍA	INDICADOR	FÓRMULA *(simplificada)*	UNIDAD	NOTAS / INSTRUCCIONES
ENTRADA de recursos	M_{ru} % de contenido **reutilizado** en la entrada	$\frac{Masa\ de\ material\ reutilizado\ en\ la\ entrada}{Masa\ total\ de\ entrada} \times 100$	% (masa)	Materiales/componentes usados directamente sin reprocesamiento.
	M_{rc} % de contenido **reciclado** en la entrada	$\frac{Masa\ de\ material\ reciclado\ en\ la\ entrada}{Masa\ total\ de\ entrada} \times 100$	% (masa)	Materias primas secundarias recuperadas y reprocesadas.
	M_{vr} % de contenido virgen **renovable** en la entrada	$\frac{Masa\ de\ entrada\ virgen\ renovable}{Masa\ total\ de\ entrada} \times 100$	% (masa)	Biomasa, insumos de origen renovable.
	M_{vnr} % de contenido virgen **no renovable** en la entrada	$\frac{Masa\ de\ entrada\ virgen\ no\ renovable}{Masa\ total\ de\ entrada} \times 100$	%(masa)	Recursos fósiles o minerales finitos.
SALIDA de recursos	MS_{ru} % de productos o componentes **reutilizados** en la salida	$\frac{Masa\ de\ productos/componentes\ efectivamente\ reutilizados}{Masa\ total\ de\ salida} \times 100$	% (masa)	Reutilización real, no solo potencial.
	MS_{rc} % de material **reciclado** en la salida	$\frac{Masa\ de\ materiales\ efectivamente\ reciclados}{Masa\ total\ de\ salida} \times 100$	% (masa)	Reciclaje logrado al final de la vida útil.
	MS_{cb} % de **recirculación** en ciclo biológico	$\frac{Masa\ de\ salida\ biodegradada/compostada\ de\ forma\ segura}{Masa\ total\ de\ salida} \times 100$	% (masa)	Compostaje, digestión anaerobia, retorno seguro a la biosfera.

FUENTE: ISO 59020:2024.

Tabla 3. Indicador obligatorio de Circularidad Funcional en la norma ISO 59020.

CATEGORÍA	INDICADOR	FÓRMULA	UNIDAD	NOTAS
Duración de VIDA ÚTIL	Índice de vida útil	$\frac{L_{real}}{L_{industria}}$	razón	Comparación de la vida útil real con la media del sector.

FUENTE: ISO 59020:2024.

Mientras las normas ISO establecen el marco metodológico general para medir circularidad, definir límites, recopilar inventarios y asegurar trazabilidad, la metodología de la Fundación Ellen MacArthur ofrece una operacionalización específica de la circularidad material a nivel producto y organización, integrando no sólo flujos físicos de materiales, sino también la utilidad funcional del producto. En este enfoque, la circularidad no se limita al reciclaje, sino que se entiende como la capacidad de reducir el flujo lineal de materiales vírgenes y residuos irrecuperables, mientras se maximiza la permanencia del valor material y funcional dentro del sistema económico.

Desde la perspectiva de circularidad material, uno de los indicadores estructurales más relevantes, considerado en esta Metodología como obligatorio, es el **Índice de Circularidad Material** (por sus siglas en inglés MCI o *Material Circularity Indicator*) desarrollado por la Fundación Ellen MacArthur, el cual evalúa simultáneamente la proporción de materiales restaurativos frente a materiales lineales y la utilidad funcional del producto (ver Tabla 4 y Anexo VI)

Tabla 4. Índice obligatorio MCI de Circularidad Material.

MARCO	INDICADOR / ÍNDICE	FÓRMULA *(simplificada)*	UNIDAD	ALCANCE / PROPÓSITO
Fundación Ellen MacArthur	Indicador de Circularidad de Materiales (**MCI**)	$1 - \frac{LFI \times E_{virgen}}{2}$	**Índice 0–1**	Capacidad restaurativa de los flujos de materiales
	Índice de Entrada Circular (**CII**)	$\frac{M_{circular,in}}{M_{total,in}} \times 100$	**%**	Proporción de entradas renovables, recicladas o reutilizadas
	Índice de Salida Circular (**COI**)	$\frac{M_{circular,out}}{M_{total,out}} \times 100$	**%**	Proporción de salidas que se reciclan efectivamente

FUENTE: Ellen MacArthur Foundation, 2019.

Conforme a la Fundación Ellen MacArthur, la circularidad no exige necesariamente ciclos cerrados dentro del mismo producto; puede reconocerse circularidad mediante circuitos abiertos siempre que exista reincorporación efectiva de materiales en la economía. No obstante, la metodología de la Fundación Ellen MacArthur y las normas ISO coinciden en que la circularidad material no es suficiente para describir el desempeño circular integral. Por ello, debe incorporarse la dimensión de circularidad funcional mediante el cálculo, cuando sea posible, de los siguientes indicadores complementarios:

Indicadores complementarios de circularidad funcional

- Reparabilidad, considerando:
  - ✓ disponibilidad de refacciones;
  - ✓ herramientas requeridas;
  - ✓ accesibilidad de componentes;
  - ✓ manuales técnicos; y
  - ✓ costo relativo de reparación.
- Modularidad, facilidad de desmontaje y sustitución;
- Reacondicionabilidad;
- Remanufacturabilidad;
- Compartibilidad;
- Intensidad de uso, medida por unidades funcionales efectivas;
- Extensión de la vida útil del producto por mantenimiento o actualización;
- Aptitud para modelos producto-como-servicio.

Este enfoque es plenamente coherente con la lógica de unidad funcional de ISO 14044:2006, donde el análisis se centra en la función efectivamente prestada y no únicamente en la masa física del objeto.

La Fundación Ellen MacArthur también recomienda el uso de indicadores adicionales de riesgo e impacto ambiental, lo cual coincide conceptualmente con el principio ISO de evitar evaluaciones parciales o sesgadas. Un producto materialmente circular puede seguir generando impactos adversos si depende de materiales escasos, tóxicos o procesos altamente intensivos en energía o agua. Por ello, además de la circularidad física y funcional, deben incorporarse indicadores clásicos de un Análisis de Ciclo de Vida como se indica en la siguiente etapa.

Etapa 7. Medición ambiental y energética

La medición ambiental y energética responde a un principio metodológico fundamental reconocido tanto por las normas ISO 14040 e ISO 14044:2006 de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), como por la ISO 59020:2024 en economía circular: la circularidad no sustituye el desempeño ambiental integral. Un sistema puede mostrar altos niveles de reutilización, reciclaje o contenido circular y, sin embargo, generar impactos ambientales significativos si depende de procesos altamente intensivos en energía, agua, sustancias peligrosas o emisiones contaminantes. Por ello, una evaluación técnicamente robusta no debe limitarse a medir flujos materiales circulares, sino realizar dicha evaluación con un enfoque y herramientas computarizadas de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), lo que permitirá cuantificar de manera sistemática los impactos ambientales potenciales asociados al producto o servicio a lo largo de todo el sistema en foco, geográfica y temporalmente.

La ISO 14044:2006 define el ACV como una metodología para compilar y evaluar entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un sistema producto, mientras que la ISO 59020:2024 reconoce explícitamente la necesidad de integrar indicadores ambientales complementarios para asegurar que la circularidad contribuya efectivamente a los objetivos de sostenibilidad y no genere desplazamientos de impacto ambiental (*burden shifting*).

Metodológicamente, la medición de la huella ambiental de un producto o servicio mediante ACV para la evaluación de los Niveles 1 al 3, requiere consistencia con las primeras cuatro etapas de planeación (ver Anexo V). Los Inventarios del Ciclo de Vida (ICV) permitirán traducir los flujos físicos del sistema en impactos ambientales comparables mediante metodologías reconocidas de evaluación de impacto, tales como ReCiPe, TRACI, CML, *Environmental Footprint* o equivalentes.

Como mínimo, esta etapa deberá cuantificar un conjunto de indicadores ambientales y energéticos esenciales, consistentes con ISO, huellas ambientales reconocidas y los principios complementarios de ISO 59020:2024. Entre ellos destacan:

Indicadores mínimos obligatorios

- ✓ **Huella de carbono** (Anexo II). Medido como emisiones totales expresadas en kg CO_2 equivalente, considerando todo el ciclo de vida conforme a ISO 14067:2018, incluyendo:
    - Extracción de materias primas;
    - Manufactura;
    - Transporte;
    - Uso;
    - Mantenimiento;
    - Fin de vida.
- ✓ **Carbono Negro** (Anexo II).
- ✓ **Huella Hídrica** (Anexo III).
- ✓ **Aprovechamiento energético** (Anexo IV**).** Energía total consumida por unidad funcional, considerando el cálculo de un Índice de Aprovechamiento Energético, que en ciclo de vida incluya:
    - Energía primaria;
    - Electricidad;
    - Combustibles;
    - Calor de proceso;
    - Energía renovable *vs* no renovable.
- ✓ **Toxicidad** humana y **Ecotoxicológica** (Anexo V):
    - Metales pesados;
    - PFAS;
    - Solventes;
    - Sustancias persistentes;
    - Carcinógenos;
    - Contaminantes bioacumulables.
    - **Emisiones atmosféricas**, ligadas a toxicidad humana, incluyendo los contaminantes criterio normados en México: NO_x, SO_2, CO, PM_{10} y $PM_{2.5}$
- ✓ **Agotamiento Abiótico** de recursos minerales y fósiles (Anexo V).
- ✓ **Cambio de uso del suelo** (Anexo V).
- ✓ **Índice MCI de Circularidad Material** (Anexo VI).
- ✓ **Huella de Agua** (Anexo VII). Que podrá ser asociada a escasez, degradación, eutrofización o acidificación según sea el impacto determinante.

La ISO 59020:2024 es consistente con este enfoque al reconocer que los flujos no recuperables, emisiones y riesgos asociados forman parte integral de una evaluación rigurosa de la circularidad.

Dependiendo del tipo de producto, servicio o sector evaluado, también deberán considerarse indicadores de categorías ambientales adicionales para evitar análisis

incompletos o conclusiones engañosas. A continuación, se enlistan los más relevantes y normalmente incluidos en los ICV:

Indicadores complementarios

- Acidificación (kg SO_2 eq);
- Eutrofización (kg PO_4 eq o kg N eq);
- Formación de ozono fotoquímico / smog;
- Agotamiento de ozono estratosférico;
- Radiación ionizante, cuando aplique;
- Residuos peligrosos, considerando su generación, manejo, tratamiento y disposición final.

Estos indicadores son particularmente relevantes en sectores como minería, manufactura química, construcción, alimentos, plásticos, electrónica o sistemas bio-basados, donde impactos aparentemente secundarios pueden ser determinantes. La lógica técnica aquí es clara: la circularidad no debe optimizar una dimensión mientras deteriora otra.

El principio rector de esta etapa debe formularse con claridad: no podrá validarse un desempeño favorable de circularidad cuando exista deterioro ambiental significativo en categorías relevantes de impacto. Un producto con alto contenido reciclado, pero con elevada toxicidad, gran huella hídrica o emisiones atmosféricas críticas, no puede considerarse ambientalmente preferible sin un análisis integral. La verdadera economía circular, conforme a ISO 59004:2024, busca conservar valor económico y material mientras preserva capital natural, salud humana y resiliencia ecosistémica. Por ello, la medición ambiental mediante ACV no es una etapa complementaria opcional, sino el mecanismo técnico indispensable para demostrar que la circularidad propuesta genera beneficios netos reales y evita soluciones aparentemente circulares, pero ambientalmente regresivas.

II.5.3. Fase de Evaluación

Etapa 8. Evaluación de compensaciones, desplazamientos de impacto y consistencia sistémica

Uno de los riesgos metodológicos más relevantes en la evaluación de circularidad consiste en asumir que una mejora material implica automáticamente una mejora ambiental o sistémica. Esta premisa es técnicamente incorrecta. La economía circular, cuando se evalúa únicamente mediante indicadores físicos de recuperación o reciclaje, puede ocultar efectos adversos significativos en otras dimensiones del desempeño ambiental, económico o funcional. Por ello, toda evaluación deberá incorporar explícitamente un análisis de compensaciones (*trade-offs*) y de desplazamiento de impactos ambientales (*burden shifting*).

El análisis deberá identificar si una mejora en algún indicador de circularidad genera deterioros significativos en otras variables críticas, tales como aumento del consumo energético, incremento de emisiones de gases de efecto invernadero, mayor toxicidad química, uso intensivo de agua, incremento de contaminantes atmosféricos, dependencia de materiales críticos o degradación funcional del producto. Por ejemplo, un material reciclado cuya reincorporación requiera temperaturas significativamente mayores o procesos altamente intensivos en energía podría resultar ambientalmente menos favorable que el uso parcial de material primario; de igual manera, un producto con alto contenido reciclado pero diseñado para una vida útil muy corta podría presentar menor circularidad sistémica que un producto durable, reparable y modular.

Asimismo, deberá evaluarse la existencia de *downcycling*, entendido como la pérdida progresiva de calidad técnica o funcional del material tras sucesivos ciclos de recuperación, fenómeno particularmente relevante en polímeros, fibras textiles, compuestos multicapa y ciertos materiales de construcción. La circularidad efectiva no podrá asumirse únicamente por el hecho de reincorporar materiales si dicha reincorporación implica pérdida estructural de desempeño o reducción significativa de valor económico y funcional.

Este análisis también deberá considerar desplazamientos geográficos o temporales de impactos. Por ejemplo, externalizar procesos de reciclaje o tratamiento hacia otras jurisdicciones con estándares ambientales inferiores no constituirá mejora circular legítima. Del mismo modo, transferir impactos presentes hacia cargas ambientales futuras —por ejemplo, mediante almacenamiento temporal de residuos o productos no reciclables— deberá identificarse y reportarse.

Etapa 9. Evaluación de incertidumbre, sensibilidad y calidad metodológica

Toda evaluación técnica incorpora incertidumbre inherente asociada a datos, supuestos, límites del sistema, factores de caracterización, condiciones operativas y variabilidad temporal. La credibilidad metodológica exige que dicha incertidumbre no permanezca implícita.

En la **evaluación de incertidumbre** se deberán identificar y documentar las principales fuentes de incertidumbre, incluyendo:

- Datos medidos con error instrumental;
- Estimaciones indirectas;
- Extrapolaciones;
- Factores genéricos;
- Supuestos tecnológicos;
- Escenarios futuros;
- Tasas de recuperación asumidas;
- Comportamiento del usuario;
- Durabilidad proyectada;
- Desempeño logístico.

La incertidumbre podrá evaluarse mediante análisis cualitativo, intervalos de confianza, análisis probabilístico o métodos de simulación cuando la complejidad del estudio lo amerite.

Los **análisis de sensibilidad** deberán considerar la influencia de variables críticas sobre los resultados, por ejemplo, asignando valores extremos en:

- Variación en tasa de reciclaje real;
- Distancia logística;
- Vida útil;
- Eficiencia energética;
- Composición material;
- Tasa de reutilización;
- Fuente eléctrica.

Si hubiera cambios razonables en variables críticas que modifiquen sustancialmente las conclusiones, deberá declararse explícitamente por escrito en el reporte final.

La evaluación de la **calidad de datos** podrá realizarse con una escala cualitativa o semicuantitativa, pero deberá considerar:

- ✓ Representatividad temporal;
- ✓ Representatividad geográfica;
- ✓ Representatividad tecnológica;
- ✓ Integridad;
- ✓ Consistencia;

- ✓ Trazabilidad;
- ✓ Verificabilidad;
- ✓ Exactitud;
- ✓ Completitud.

Etapa 10. Integración e interpretación de resultados

La interpretación constituye la fase de síntesis técnica y analítica para la posterior toma de decisiones para implementar la Gestión Circular, no consiste únicamente en presentar cifras, sino en construir conclusiones robustas, técnicamente consistentes, coherentes con el objetivo del estudio y atendiendo a las indicaciones y compromisos adquiridos por la empresa u organización ante las autoridades ambientales.

La LGEC en sus definiciones indica que la Gestión Circular es el "*…conjunto de estrategias aplicadas a lo largo del Ciclo de Vida de materiales, productos o residuos, …para lograr la menor Huella Ambiental*" y que ésta es el "*…impacto ambiental medible a través de indicadores de Economía Circular*".

De hecho, la propia LGEC indica en su artículo 13 que se negará la inscripción al Registro de Gestión Circular cuando la Huella Ambiental, que debe formar parte de la solicitud, *"…se incremente, permanezca o no se reduzca significativamente en los plazos que señale el Acuerdo General de Implementación de la REP y el convenio de concertación suscrito"*.

Por lo anterior y por la multidimensionalidad de la evaluación de la circularidad que se realizó en las etapas anteriores, la interpretación de los datos e información obtenida deberá responder al menos las siguientes preguntas:

¿Cuál es la Huella Ambiental del producto o servicio evaluado?

¿Cuál es el desempeño de circularidad observado?

¿Qué mecanismos explican dicha huella y desempeño?

¿Dónde se localizan las principales oportunidades de mejora?

¿Existen compensaciones ambientales relevantes para *"…mitigar o revertir de manera proporcional a la Huella Ambiental*" como lo indica la LGEC?

Los resultados numéricos de la evaluación de los índices e indicadores obligatorios para los niveles de análisis 1 al 3 (ver Anexo V), deberán mostrarse mediante el siguiente diagrama de radar, que expresa gráficamente la Huella Ambiental del producto o servicio en el **Escenario Base** y en el **Escenario Circular** (Figura 9).

Figura 9. Diagrama de la Huella Ambiental resultante.



FUENTE: Elaboración propia, IPN.

Además, la interpretación deberá ser consistente con el objetivo planteado en la **Etapa 1**, reconocer limitaciones, evitar extrapolaciones injustificadas, distinguir hechos medidos con base en inferencias, así como declarar incertidumbres relevantes.

Etapa 11. Informe Técnico

Conforme a las normas ISO 14040 e ISO 14044:2006 para Análisis de Ciclo de Vida, así como a los principios de trazabilidad, transparencia y consistencia metodológica de la ISO 59020:2024, un informe técnico debe concebirse como el expediente integral que permita a un tercero técnicamente competente pueda comprender con claridad qué se evaluó, cómo se evaluó, bajo qué supuestos y con qué grado de confiabilidad se obtuvieron los resultados. De manera complementaria, la ISO 59020:2024 establece que la medición y evaluación del desempeño circular debe sustentarse en información trazable, transparente, coherente y suficientemente documentada para permitir interpretación, comparación y eventual verificación independiente. En resumen, el informe técnico no debe limitarse a presentar cifras o conclusiones ejecutivas; debe funcionar como una reconstrucción completa del razonamiento técnico y metodológico del estudio, permitiendo reproducibilidad, auditoría y evaluación de conformidad.

El proceso de integración del informe debe comenzar con un resumen ejecutivo técnicamente sólido, orientado a sintetizar los hallazgos principales sin sacrificar precisión conceptual. Este apartado debe comunicar de manera clara el propósito del estudio, el sistema evaluado, los principales resultados de circularidad material, funcional y ambiental, así como las conclusiones estratégicas más relevantes para la toma de decisiones. A continuación, deberá desarrollarse el capítulo de objetivo y alcance, que conforme a ISO 14044:2006 constituye uno de los elementos fundacionales del estudio. Aquí debe explicarse con precisión la finalidad de la evaluación, la aplicación prevista, el público objetivo, el tipo de estudio realizado (diagnóstico interno, evaluación comparativa, certificación, cumplimiento regulatorio, soporte para ecoetiqueta, etc.) y si los resultados están destinados a comunicación pública o comparaciones externas.

En esta misma sección deberán incorporarse las definiciones metodológicas aplicadas, particularmente aquellas relacionadas con economía circular, circularidad material, circularidad funcional, materiales secundarios, valorización, residuos, trazabilidad y otras categorías necesarias para asegurar consistencia interpretativa.

Un componente metodológicamente crítico es la descripción precisa de la unidad funcional y de los límites del sistema, ya que ambos determinan la validez técnica del análisis. Conforme a ISO 14044:2006, la unidad funcional define el desempeño cuantificado del sistema producto y constituye la base de comparabilidad; por ello, el informe debe justificar claramente por qué se seleccionó una unidad funcional determinada y cómo representa la función real del producto o servicio evaluado. De igual forma, deberán documentarse exhaustivamente los límites espaciales, temporales, tecnológicos y del ciclo de vida: qué instalaciones, proveedores, procesos, tecnologías, regiones geográficas y etapas del sistema fueron incluidas o excluidas, así como la justificación técnica correspondiente. Si el estudio adopta un enfoque cuna a

tumba, cuna a cuna, puerta a puerta o una delimitación híbrida, ello deberá explicarse explícitamente, incluyendo cualquier exclusión significativa que pudiera influir en los resultados.

Posteriormente, se deberá incorporar después el inventario cuantitativo del sistema, que constituye la base empírica del análisis, seguido por la explicación detallada de los métodos de cálculo empleados. Conforme a las normas ISO, esta sección debe documentar la recopilación de datos primarios y secundarios, fuentes de información, balances materiales y energéticos, reglas de asignación, criterios de calidad de datos, factores de emisión, modelos de caracterización y herramientas analíticas utilizadas.

Asimismo, deberán describirse los indicadores aplicados, incluyendo aquellos de circularidad material (contenido reciclado, recuperación, reutilización, materiales circulares), circularidad funcional (durabilidad, reparabilidad, modularidad, intensidad de uso), y desempeño ambiental (huella de carbono, huella hídrica, intensidad energética, emisiones, toxicidad, entre otros).

Todo supuesto metodológico deberá declararse explícitamente, evitando inferencias implícitas o supuestos no trazables. Del mismo modo, el informe debe incluir una evaluación de incertidumbre y sensibilidad (ver **Etapa 9**), identificando limitaciones de datos, hipótesis críticas y variables que puedan modificar significativamente los resultados.

El informe técnico debe presentar de manera clara los resultados cuantitativos, acompañados de una interpretación crítica técnicamente fundamentada, en línea con lo exigido por ISO 14044:2006, que establece que la interpretación debe identificar hallazgos significativos, consistencia metodológica, limitaciones y conclusiones compatibles con el objetivo del estudio (ver **Etapa 10**). Esto implica no sólo mostrar cifras, sino explicar su significado, identificar oportunidades de mejora, reconocer compensaciones ambientales o funcionales y advertir sobre posibles riesgos de sobreinterpretación. También deberán incluirse secciones explícitas de limitaciones metodológicas y recomendaciones, diferenciando claramente entre hechos medidos, inferencias técnicas y propuestas estratégicas.

Finalmente, deberán anexarse todos los documentos de respaldo relevantes, tales como inventarios detallados, certificados, registros operativos, fichas técnicas, factores de cálculo, evidencias documentales, diagramas de proceso y cualquier otra información que permita reconstruir y eventualmente verificar el estudio. En términos prácticos, el informe técnico final debe concebirse como el expediente completo de trazabilidad metodológica y evidencia técnica del proyecto, preparado no sólo para comunicar resultados, sino para soportar revisión crítica, auditoría, evaluación de conformidad y toma de decisiones informada.

El informe técnico final deberá contener los siguientes apartados como mínimo:

Resumen Ejecutivo

I. Objetivo y alcance
II. Definiciones aplicadas
III. Unidad funcional
IV. Límites del sistema*
V. Inventarios de Ciclo de Vida
VI. Métodos de cálculo
VII. Índices e Indicadores considerados
VIII. Supuestos
IX. Incertidumbres
X. Resultados
XI. Interpretación
XII. Limitaciones
XIII. Recomendaciones

Anexos documentales

*Incluyendo un esquema gráfico y descripción detallada de sus componentes

II.5.3.1 Evaluación Progresiva

Los niveles de evaluación establecidos en la presente Metodología representan grados progresivos de profundidad analítica y robustez en la evidencia para la evaluación de la circularidad sin constituir por sí mismos, una clasificación automática del desempeño circular de un producto o servicio. Su finalidad es permitir una implementación gradual de la circularidad conforme a las capacidades técnicas, de infraestructura y operativas de los distintos sectores productivos, asegurando proporcionalidad metodológica, comparabilidad y mejora continua.

Los resultados que se obtengan a partir de la evaluación de cada nivel, iniciando en el 1 y hasta el 3, serán la pauta para otorgar algún reconocimiento oficial por parte del IPN o de alguna autoridad ambiental (ver Tabla 5, Figura 5), de conformidad con los requisitos específicos que se señalen en las disposiciones regulatorias, lineamientos o instrumentos administrativos que para tales fines se emitan.

Mientras los **Niveles 1** y **2** utilizan enfoques simplificados orientados a facilitar la adopción gradual de la economía circular, el **Nivel 3** incorpora una evaluación integral de circularidad y de no desplazamientos de impactos ambientales, permitiendo su caracterización integral y el reconocimiento de beneficios ambientales del sistema evaluado.

La categoría y alcance de los distintivos o reconocimientos estarán en función de la profundidad de la evaluación realizada y de la evidencia generada para demostrar circularidad e integridad ambiental. Los mayores niveles de reconocimiento requerirán la incorporación de los indicadores complementarios de la Huella Ambiental descritos en el Anexo V o de aquellos que determine la autoridad competente.

Tabla 5. Progresividad en el cumplimiento de la circularidad.

Nivel	Objetivo	Instrumentos o Herramientas de Análisis y Evaluación	Tipo de uso
0	Cumplimiento normativo y alineación con metas nacionales ambientales y climáticas.	**Normas vigentes y/o de Referencia** para el cálculo de huellas de carbono e hídrica en planta, así como de reciclaje y/o reúso de materiales.	Demostración de cumplimiento de otras disposiciones vigentes -no incluye la LGEC- en planta.
1	Declaración de circularidades materiales (material y funcional) con enfoque de ciclo de vida.	**ACV**[6] *básico-simplificado* Fracción I del artículo 15 de la LGEC	Mecanismos de reconocimiento y de certificación en materia de economía circular, auditorías ambientales voluntarias y de liderazgo ambiental (tipo **ASG**[7]).
2	Declaración de circularidades materiales, huellas de carbono e hídrica y aprovechamiento energético con enfoque de ciclo de vida.	**ACV** *simplificado* Fracción I del artículo 15 de la LGEC	
3	Excelencia Ambiental.	**ACV** *integral* Circularidad e Integridad Ambiental de acuerdo con la LGEC (artículos 3, 4, 11 y 15).	

Nota: Los niveles representan profundidad metodológica, robustez analítica y no constituyen por sí mismos una calificación automática de la circularidad.
FUENTE: Elaboración propia IPN.

[6] **ACV**. Análisis de Ciclo de Vida
[7] **ASG**. Esquema voluntario empresarial de compromisos en los ámbitos de Ambiente, Social y de Gobernanza

II.5.4. Esquemas que garantizan la Trazabilidad y Confiabilidad

Esquema transversal MRV: Medición, Reporte y Verificación

El esquema transversal MRV constituye el componente de aseguramiento técnico y credibilidad de toda metodología, ya que garantiza que los resultados obtenidos sean cuantificables, trazables, reproducibles y verificables por terceros independientes.

En términos metodológicos, un sistema MRV robusto comprende tres funciones complementarias:

Medición, entendida como la obtención sistemática de datos primarios y secundarios sobre flujos de materiales, energía, agua, emisiones, residuos y variables funcionales del producto o servicio. Se demuestra mediante evidencias documentales, bitácoras de protocolos de medición, calibración de instrumentos, balances de materia y energía, entre otras evidencias que aseguran la confiabilidad y la calidad de los datos;

Reporte, consistente en la documentación estructurada, transparente y técnicamente consistente de metodologías, supuestos, límites del sistema, factores de cálculo, fuentes de información e incertidumbres; y

Verificación, orientada a confirmar de manera independiente la exactitud, consistencia y conformidad del estudio respecto de criterios metodológicos previamente definidos.

Desde una perspectiva operativa, un sistema MRV aplicado a economía circular debe estructurarse bajo principios equivalentes a los utilizados en inventarios ambientales, mercados de carbono y evaluación de conformidad, incorporando trazabilidad, integridad, transparencia, consistencia, precisión y verificabilidad independiente.

En el contexto mexicano, este enfoque resulta especialmente congruente con la LGEC, que incorpora explícitamente los principios de trazabilidad, responsabilidad extendida del productor, indicadores cuantificables de economía circular y evaluación de conformidad, así como con la lógica institucional de la Ley de Infraestructura de la Calidad, que establece mecanismos de certificación, inspección y validación técnica mediante organismos acreditados.

En consecuencia, el MRV debe entenderse como un tema transversal e indispensable para evitar declaraciones engañosas (*greenwashing* o *circular washing*) y asegurar que la circularidad declarada corresponda a desempeño real y verificable. Toda evaluación deberá sustentarse en un sistema robusto de MRV.

Esquema transversal de Evaluación de la Conformidad y Aseguramiento independiente de la Calidad.

La evaluación de conformidad y aseguramiento independiente constituye el mecanismo formal mediante el cual se valida la credibilidad técnica, legal y metodológica de los resultados obtenidos en una evaluación de circularidad, particularmente cuando éstos serán utilizados para fines externos que impliquen confianza pública, comparabilidad o consecuencias regulatorias o comerciales.

Para el responsable de aplicar la metodología, esta etapa implica, en primer lugar, determinar con precisión el propósito final del estudio y el nivel de aseguramiento requerido, ya que no todas las evaluaciones exigen el mismo grado de escrutinio. Una evaluación destinada exclusivamente a mejora interna puede sustentarse mediante una declaración de primera parte (autodeclaración), donde la propia organización asume responsabilidad sobre la veracidad de la información; sin embargo, cuando los resultados respaldan afirmaciones comerciales, comparaciones entre productos, certificaciones, ecoetiquetas, cumplimiento normativo, incentivos fiscales o financieros, o declaraciones públicas sobre desempeño circular, resulta indispensable prever mecanismos más robustos de revisión independiente. En consecuencia, el responsable de la evaluación de la circularidad debe diseñar desde el inicio el estudio bajo criterios de auditabilidad, asegurando consistencia metodológica, trazabilidad completa y suficiencia probatoria, evitando improvisaciones al final del proceso.

Hay que resaltar que el trabajo del equipo evaluador consiste en preparar un expediente técnico completo (ver **Etapa 11**), que permita y facilite la evaluación de conformidad por la instancia correspondiente. Si el aseguramiento corresponde a una evaluación de segunda parte, el consultor deberá atender requerimientos técnicos específicos del cliente o comprador, que normalmente incluyen protocolos propios de validación, auditorías contractuales o criterios de compras sostenibles. Si se requiere una evaluación de tercera parte, el consultor deberá preparar el estudio para auditoría independiente por un organismo evaluador, certificador o unidad de verificación técnicamente competente, asegurando que cualquier resultado pueda reproducirse a partir de la evidencia entregada. En términos prácticos, el equipo evaluador debe actuar como arquitecto técnico del proceso de aseguramiento, no sólo como calculista de indicadores.

Finalmente, el aseguramiento independiente exige que la instancia verificadora cumpla condiciones estrictas de integridad institucional y competencia técnica. El consultor debe confirmar que el organismo o equipo auditor posea conocimientos verificables en economía circular, análisis de ciclo de vida, huellas ambientales, sistemas de trazabilidad y evaluación documental; que actúe con independencia respecto del evaluado; que no tenga conflictos de interés financieros, comerciales o técnicos; y que pueda ejecutar una auditoría reproducible basada en evidencia objetiva.

Salvaguardas contra *greenwashing* y *circular washing*

Un componente esencial de cualquier metodología rigurosa para la medición y evaluación de la gestión circular consiste en establecer salvaguardas explícitas contra declaraciones ambientales engañosas, incompletas o técnicamente infundadas. La transición hacia la economía circular ha incrementado de manera significativa el uso de afirmaciones comerciales, institucionales y regulatorias relacionadas con reciclabilidad, reutilización, neutralidad climática, circularidad o sostenibilidad; sin embargo, la ausencia de criterios metodológicos homogéneos ha favorecido prácticas de *greenwashing* y, de manera más específica, *circular washing*, entendidos como la comunicación de beneficios ambientales o de circularidad no sustentados de manera verificable.

En el contexto de la LGEC, esta salvaguarda adquiere carácter estructural, ya que la Ley se sustenta en principios de trazabilidad, responsabilidad ambiental, evaluación objetiva del desempeño, información verificable, responsabilidad extendida del productor y prevención de impactos ambientales, por lo que cualquier afirmación de circularidad debe corresponder a desempeño demostrable y no a atributos meramente declarativos. En consecuencia, la presente metodología incorpora un conjunto de reglas de integridad circular destinadas a prevenir el uso engañoso de métricas parciales, declaraciones comerciales ambiguas o evaluaciones técnicamente manipuladas.

Es decir, la presente metodología incorpora salvaguardas procedimentales para que una organización, producto, servicio o sistema no sea calificado como circular, sostenible o ambientalmente preferible con base en atributos aislados que no reflejen su desempeño integral.

En particular, deberán rechazarse afirmaciones sustentadas en reciclabilidad teórica no demostrada, es decir, declaraciones basadas únicamente en propiedades potenciales del material sin evidencia de infraestructura, tecnología, logística o mercado que permitan su recuperación efectiva; tasas hipotéticas o supuestos optimistas no verificables, especialmente cuando no correspondan a desempeño real observado; exclusiones ocultas o límites metodológicos sesgados, mediante los cuales se omitan etapas relevantes del ciclo de vida para mejorar artificialmente resultados; límites del sistema manipulados, diseñados para excluir impactos significativos; equivalencias funcionales falsas, donde se comparen productos o servicios que no entregan prestaciones equivalentes; compensaciones injustificadas, en las cuales un beneficio parcial se utilice para ocultar deterioros significativos en otras categorías ambientales; y métricas parciales engañosas, que seleccionen únicamente indicadores favorables sin considerar el desempeño integral del sistema.

Ejemplos de declaraciones inválidas o condicionadas

- "*100% reciclable*", cuando no exista infraestructura técnica, logística o mercado funcional que permita recuperación efectiva.
- "*Circular*", sin trazabilidad documental de materiales, componentes o ciclos funcionales.
- "*Carbono neutral circular*", sin análisis robusto de huella de carbono, límites metodológicos transparentes y verificación independiente.
- "*Residuos cero*", cuando existan flujos ocultos, pérdidas externas o valorización energética impropiamente equiparada a eliminación de residuos.
- "*Material sustentable*", sin evaluación comparativa ambiental verificable.
- "*Producto regenerativo*", sin evidencia de recuperación efectiva de capital natural o servicios ecosistémicos.
- "*Libre de impacto*" o "*impacto positivo neto*", sin demostración integral.

Toda declaración pública, certificación, ecoetiqueta, incentivo o comunicación corporativa sustentada en esta Metodología deberá demostrar correspondencia entre afirmación y evidencia técnica.

Este enfoque es consistente con los principios de transparencia, trazabilidad y consistencia establecidos en ISO 14044, ISO 14067:2018, ISO 59020:2024, así como con metodologías internacionales como el *Product Environmental Footprint* de la Unión Europea y busca reconocer que la circularidad no puede inferirse únicamente a partir de un atributo material aislado. Un producto no podrá considerarse circular por contener un porcentaje de material reciclado si simultáneamente presenta obsolescencia prematura, imposibilidad de reparación, alta toxicidad o ausencia de mecanismos reales de recuperación. Del mismo modo, un envase técnicamente reciclable no podrá declararse como circular si no existe infraestructura operativa y tasas reales de recuperación que permitan cerrar efectivamente el ciclo material. La LGEC refuerza esta lógica al establecer que la economía circular implica soluciones sistémicas orientadas a mantener materiales y productos en uso, eliminar residuos y contaminación, y regenerar sistemas naturales; ello exige evidencia objetiva sobre trazabilidad material, gestión de residuos, reincorporación productiva y desempeño ambiental. Por tanto, la mera posibilidad técnica, el diseño conceptual o la intención corporativa no constituyen evidencia suficiente de circularidad.

Asimismo, para evitar *greenwashing* y *circular washing*, toda evaluación deberá incorporar un principio explícito de consistencia sistémica y ausencia de desplazamiento de impactos (*burden shifting*). Esto significa que una mejora aparente en circularidad no podrá considerarse favorable si produce incrementos significativos en emisiones, toxicidad, consumo de agua, degradación ecosistémica, generación de

residuos peligrosos o dependencia de materiales críticos. En otras palabras, no será metodológicamente aceptable compensar un mal desempeño integral mediante un único atributo positivo. Esta regla resulta particularmente importante en sectores donde ciertas estrategias circulares pueden incrementar impactos energéticos o ambientales, como reciclajes intensivos, procesos químicos complejos o materiales compuestos. La economía circular, conforme a la LGEC y a estándares internacionales, no debe convertirse en un instrumento de marketing ambiental selectivo, sino en un sistema verificable de transformación productiva y gestión responsable de recursos.

En términos regulatorios y metodológicos, estas salvaguardas buscan asegurar que la medición de la gestión circular contribuya efectivamente a la transformación económica prevista en la LGEC, evitando que el concepto de circularidad sea trivializado, manipulado o utilizado como sustituto de desempeño ambiental real.

III. Anexos

Anexo I. Terminología

Agua dulce. Agua que contiene una baja concentración de sólidos disueltos y generalmente es apta para tratamiento y consumo humano (3.1.1, ISO 14046:2014).

Agua fósil. Agua subterránea con una tasa de recarga natural insignificante en escalas de tiempo humanas (3.1.6, ISO 14046:2014).

Agua salobre. Agua que contiene sólidos disueltos en concentraciones superiores a las aceptables para usos domésticos o agrícolas, pero inferiores a las del agua de mar (3.1.2, ISO 14046:2014).

Agua subterránea. Agua almacenada en formaciones geológicas subterráneas susceptibles de extracción o aprovechamiento (3.1.5, ISO 14046:2014).

Agua superficial. Agua localizada sobre la superficie terrestre, incluyendo ríos, lagos, humedales y embalses (3.1.3, ISO 14046:2014).

Ambiente. El conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados (Fracc. I, Art. 3º. LGEEPA).

Análisis de Ciclo de Vida. Herramienta de análisis usada para evaluar el Ciclo de Vida, en los términos de los acuerdos generales de implementación de la REP (Fracc. II, Art. 3°. LGEC).

Aprovechamiento Circular. Acciones cuyo objetivo es mantener o potenciar el valor económico de los materiales y productos, o recuperar el valor económico de los residuos, mediante la aplicación de mecanismos directos e indirectos de circularidad (Fracc. III, Art. 3º. LGEC).

Asignación. Procedimiento mediante el cual las emisiones, remociones o cargas ambientales de un proceso o sistema se distribuyen entre productos y coproductos (IPN-CPS).

Biodiversidad. La variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otros, los ecosistemas terrestres, marinos y otros ecosistemas acuáticos (Fracc. IV, Art. 3º. LGGEPA).

Cadena de suministro. Conjunto de procesos, actividades y actores involucrados en la producción, distribución, uso y fin de vida de un producto (3.1.5.2, ISO 14067:2018).

Cadena de Valor. Actividades que permiten la integración de materiales, productos o de los residuos para su Aprovechamiento Circular (IPN-CPS).

Calidad del agua. Conjunto de características físicas, químicas, biológicas y térmicas del agua en relación con su aptitud para un uso específico humano o ecosistémico (3.2.4, ISO 14046:2014).

Cambio climático. Cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima (Fracc. V Bis, Art. 3º, LGEEPA).

Cambio de uso del suelo. Transformación de una categoría de uso del suelo a otra que puede generar emisiones o remociones de gases de efecto invernadero (3.1.7.5, 3.1.7.6, ISO 14067:2018).

Carbono biogénico. Carbono proveniente de biomasa de origen biológico, excluyendo el carbono contenido en materiales fósiles y formaciones geológicas (IPN-CPS).

Categoría de impacto. Clase de impacto ambiental asociada a mecanismos específicos relacionados con el agua (3.1.4.8, ISO 14067:2018).

Categoría de productos. Grupo de artículos con características, usos o procesos de fabricación comunes resultantes de la integración de materiales, productos o residuos para su aprovechamiento circular (IPN-CPS).

Ciclo de Vida. Etapas consecutivas e interrelacionadas con los materiales, productos o residuos, desde la extracción, Producción, vida útil, gestión integral de residuos, Aprovechamiento Circular o, en su caso, disposición final (Fracc. V., Art. 3º, LGEC).

Ciclo técnico / Ciclos técnicos (plural). Los procesos por los que fluyen los productos y materiales para mantener su más alto valor posible en todo momento (Ellen MacArthur Foundation, 2021).

Compensación de carbono. Mecanismo externo mediante el cual se financian, adquieren o reclaman reducciones o remociones de emisiones de GEI fuera del sistema producto evaluado (3.1.1.7, ISO 14067:2018).

Compostaje. Descomposición microbiana de la materia orgánica en presencia de oxígeno (Ellen MacArthur Foundation, 2021).

Control. Inspección, vigilancia y aplicación de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones establecidas en este ordenamiento (Fracc. IX, Art. 3°. LGEEPA).

Coproducto. Producto adicional generado simultáneamente en un mismo proceso unitario o sistema de producto (3.5.2, ISO 14046:2014).

Criterio de corte. Regla que establece la exclusión de flujos o procesos considerados insignificantes respecto al impacto total del sistema (IPN-CPS).

Cuenca hidrográfica. Territorio en el cual las aguas superficiales y subterráneas drenan hacia un cuerpo de agua común (3.1.8, ISO 14046:2014).

Cuerpo de agua. Entidad hídrica con características hidrológicas, físicas, químicas y biológicas definidas dentro de un área geográfica determinada (3.1.7, ISO 14046:2014).

Datos primarios. Datos obtenidos mediante medición directa o cálculos basados en mediciones directas de la fuente original (3.6.1, ISO 14046:2014).

Datos secundarios. Datos obtenidos de fuentes distintas a mediciones directas, incluyendo bases de datos y literatura técnica (3.6.2, ISO 14046:2014).

Degradación del agua. Alteración negativa de la calidad del agua (3.2.3, ISO 14046:2014).

Dióxido de carbono equivalente (CO_2e). Unidad de referencia utilizada para expresar el efecto climático de distintos gases de efecto invernadero en relación con el dióxido de carbono (Fracc. XLI, Art. 3°. LGCC).

Diseño Circular. Diseño del Producto que considere la Huella Ambiental con enfoque integral y que incorpora principios y mecanismos directos e indirectos de circularidad en su Ciclo de Vida (Fracc. VII, Art. 3º. LGEC).

Disponibilidad del agua. Grado en que existen recursos hídricos suficientes para satisfacer las necesidades humanas y ecosistémicas en un contexto geográfico y temporal determinado (3.3.16, ISO 14046:2014).

Disposición Final. Acción de depositar o confinar permanentemente residuos en sitios e instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente (Fracción V, Art. 5, LPGPGIR).

Durabilidad. La capacidad de un producto, componente o material para permanecer funcional y relevante cuando se usa según lo previsto (Fundación Ellen MacArthur, 2021).

Economía circular. Modelo económico de producción y consumo sostenible que incluye soluciones sistémicas para el desarrollo económico, que disminuyen el impacto ambiental mediante ciclos técnicos y biológicos (Fracc. VIII, Art. 3º, LGEC).

Economía lineal. Una economía en la que se extraen, usan y desechan recursos naturales para fabricar productos u otorgar servicios, sin que se repongan o sean reintegrados a los ecosistemas de donde fueron originalmente extraídos (IPN-CPS).

Ecosistema / Ecosistemas (plural). La unidad funcional básica de interacción de los organismos vivos entre sí y de éstos con el ambiente, en un espacio y tiempo determinados (Fracc. XIII, Art. 3º. LGEEPA).

Emisión / Emisiones (plural). Liberación al ambiente de toda sustancia, en cualquiera de sus estados físicos, o cualquier tipo de energía, proveniente de una fuente (Fracc. XVII, Art. 3º. LGEEPA).

Encadenamiento Sustentable / Encadenamientos sustentables (plural). Vínculos entre personas compradoras, entre vendedoras y entre unas y otras, en unidades productivas o sectores económicos, que involucran el intercambio de materiales, productos y residuos bajo criterios de Economía Circular (Fracc. IX, Art. 3º, LGEC).

Energía renovable. Energía derivada de recursos que no se agotan en escalas de tiempo relevantes para la economía, es decir, escalas de tiempo no geológicas (Fundación Ellen MacArthur, 2021).

Envase / Envases (plural). Es el componente de un producto que cumple la función de contenerlo y protegerlo para su distribución, comercialización y consumo (Fracc. VI, Art. 5º. LGPGIR).

Escasez de agua. Grado en que la demanda de agua supera la capacidad de reabastecimiento natural de una cuenca hidrográfica (3.3.17, ISO 14046:2014).

Estrés hídrico. Condición en la que la demanda de agua excede la disponibilidad hídrica existente en una región determinada (IPN-CPS).

Extracción de agua. Remoción antropogénica de agua desde cualquier cuerpo de agua o cuenca hidrográfica, de forma temporal o permanente (3.2.2, ISO 14046:2014).

Factor de caracterización (FC). Coeficiente derivado de un modelo científico utilizado para convertir resultados del inventario en indicadores de impacto comparables (3.3.14, ISO 14046:2014).

Flujo de referencia. Cantidad de producto necesaria para cumplir la función definida por la unidad funcional o declarada (3.5.8, ISO 14046:2014).

Flujo elemental de agua. Agua que entra al sistema bajo estudio desde el medio ambiente o que es liberada nuevamente al medio ambiente desde el sistema evaluado (3.1.9, ISO 14046:2014).

Gas de efecto invernadero (GEI). Componente gaseoso de la atmósfera, de origen natural o antropogénico, capaz de absorber y emitir radiación infrarroja (Fracc. XXIII, Art. 3º. LGCC).

Gestión Circular. Conjunto de estrategias aplicadas a lo largo del Ciclo de Vida de materiales, productos o residuos, incluido el Diseño Circular, para lograr la menor Huella Ambiental y el máximo Aprovechamiento Circular (Fracc. X. Art. 3º, LGEC).

Huella Ambiental. Conjunto de impactos causados a la naturaleza por un producto o servicio medidos a través de un Análisis de Ciclo de Vida estandarizado (IPN-CPS).

Huella de Agua. Métrica o métricas con las que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua. En el caso de que los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua, no hayan sido evaluados integralmente, el término "*huella de agua*" solamente puede utilizarse si está acompañado por un calificativo. Un calificativo es una o varias palabras adicionales utilizadas en conjunto con el término "*huella de agua*" para describir la categoría o las categorías del impacto estudiadas en la evaluación de la huella hídrica por ejemplo. huella hídrica por escasez¸huella hídrica por eutrofización, "*huella de agua no integral*" (3.3.1, ISO-14046-2014).

Huella de Carbono de Producto (HCP). Suma de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero de un sistema producto, expresadas como dióxido de carbono equivalente y determinadas mediante un análisis del ciclo de vida enfocado exclusivamente en la categoría de impacto de cambio climático (3.1.1.1, ISO 14067:2018).

Huella de Carbono de Producto parcial (HCP parcial). Suma de las emisiones y remociones de GEI asociadas únicamente a determinados procesos o etapas seleccionadas de un sistema producto (3.1.1.2, ISO 14067:2018).

Huella de Carbono. Cuantificación a lo largo del Ciclo de Vida de un Producto del valor neto de las emisiones de gases de efecto invernadero, y de carbono negro en la atmósfera, así como de las remociones correspondientes (Fracc. XII, letra b, Art. 3º. LGEC).

Huella de degradación del agua. Indicador que cuantifica los efectos potenciales asociados al deterioro de la calidad del agua (IPN-CPS).

Huella de escasez hídrica. Indicador que cuantifica el impacto potencial derivado del consumo de agua en zonas con limitaciones de disponibilidad hídrica (IPN-CPS).

Huella Hídrica. Cuantificación del uso eficiente y sustentable del agua. (Fracc. XII, letra c, Art. 3º. LGEC). Indicador de la cantidad de agua empleada para producir determinado bien o servicio, así como el volumen de agua de primer uso necesario para que los contaminantes de las aguas residuales descargadas generados en el citado proceso para la producción del bien o servicio puedan ser asimilados por el cuerpo receptor propiedad de la Nación a efecto de que se encuentren dentro de los límites permisibles a que se refiere la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, o la que la sustituya (Fracc. 3.11, Art. 3°, NMX-AA-184-SCFI-2021).

Impacto ambiental / Impactos ambientales (plural). Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza (Fracc. XX, Art. 3º. LGEEPA).

Indicador de Economía Circular / Indicadores (plural). Parámetro cuantitativo que permite medir el grado de circularidad de un Producto, proceso o sistema (Fracc. XII, Art. 3º. LGEC).

Instalación. Instalación única, conjunto de instalaciones o procesos de producción (fijos o móviles), que se pueden definir dentro de un límite geográfico único, una unidad de la organización o un proceso de producción (3.5.12, ISO 14046:2014).

Integridad Ambiental. Estado de los ecosistemas en el que se mantienen su estructura, funcionamiento y resiliencia, así como la biodiversidad, la renovación de los recursos naturales y la provisión de servicios ambientales (IPN-CPS).

Inventario de Huella Hídrica. Resultado cuantificado de los flujos de agua, emisiones y consumos recopilados durante el análisis del inventario de la huella hídrica (3.5.13, ISO 14046:2014).

LGEC. Ley General de Economía Circular.

LGEEPA. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

Límite del sistema. Conjunto de criterios que especifican qué procesos unitarios forman parte del sistema evaluado (3.1.3.4, ISO 14067:2018).

Materia Prima Secundaria / Materias primas secundarias (plural). Material, sustancia u objeto que después de su Producción, utilización o consumo conserva propiedades que permiten su procesamiento (IPN-CPS).

Material / Materiales (plural). Sustancia, compuesto o mezcla de ellos, que se usa como insumo y es un componente de productos de consumo, de envases, empaques, embalajes y de los residuos que éstos generan (IPN-CPS).

Material Virgen / Materiales vírgenes (plural). Materias primas extraídas directamente de fuentes naturales, sin previamente haber sido utilizadas o procesadas en un ciclo productivo; también definido como materiales que aún no han sido utilizados en la economía (IPN-CPS).

Mecanismo Directo de Circularidad / Mecanismos directos (plural). Aquel que aplica principios, criterios, medidas, instrumentos, procesos, estrategias o acciones de circularidad al Ciclo de Vida de productos, materiales y residuos (Fracc. XVIII, Art. 3º. LGEC).

Mecanismo Indirecto de Circularidad / Mecanismos indirectos (plural). Aquel que aplica principios, acciones, procesos o estrategias de circularidad para el cumplimiento de la Gestión Circular inscrito en el Registro (Fracc. XIX, Art. 30, LGEC).

Métricas de circularidad. Conjunto de índices e indicadores multidimensionales que cuantifican la capacidad de un sistema de retener valor, materia y energía dentro de los límites del sistema circular (IPN-CPS).

Organismo Coordinador. Ente asociativo de carácter público, privado o mixto, constituido legalmente, cuya finalidad es fomentar en la Actividad Económica los principios y criterios de Economía Circular (Fracc. XXII, Art. 3º. LGEC).

Perfil de huella hídrica. Conjunto de resultados de indicadores de impacto relacionados con el agua presentados de forma desagregada (3.3.13, ISO 14046:2014).

Persona Recicladora de Base o Pepenadora / Recicladores de base (plural). Persona que, de forma independiente o colectiva, realiza la recolección, separación manual, comercialización y reciclaje de materias primas secundarias (Fracc. XXIII, Art. 3º. LGEC).

Potencial de calentamiento global (PCG o GWP). Factor de caracterización que expresa el efecto climático de un gas de efecto invernadero respecto del dióxido de carbono dentro de un horizonte temporal determinado (3.1.2.4, ISO 14067:2018).

Proceso unitario. Elemento más pequeño del sistema para el cual se cuantifican datos de entradas y salidas (3.5.6, ISO 14046:2014).

Proceso. Conjunto de actividades interrelacionadas que transforman entradas en resultados (3.5.5, ISO 14046:2014).

Producto / Productos (plural). Bien físico que se fabrica o importa o servicio que se presta; que cuenta con valor económico, y que se genera como resultado de un proceso de actividades (Fracc. XXVI, Art. 3º. LGEC).

Recurso / Recursos (plural). Activo desde el cual se implementa o crea una solución (3.12., ISO 59010:2024).

Recurso natural / Recursos naturales (plural). El elemento natural susceptible de ser aprovechado en beneficio del hombre (Fracc. XXX, Art. 3º. LGEEPA).

Red de valor. Red de cadenas de valor y partes interesadas vinculadas (3.18. ISO 59010:2024).

Representatividad geográfica. Grado en que los datos reflejan adecuadamente las condiciones reales de la ubicación evaluada (IPN-CPS).

Representatividad temporal. Grado en que los datos representan adecuadamente el periodo temporal del estudio (IPN-CPS).

Residuo / Residuos (plural). Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos (Fracc. XXXII, Art. 3º. LGEEPA).

Responsabilidad Extendida del Productor. Medio por el cual la persona productora o importadora es responsable ambientalmente de su Producto en su Ciclo de Vida, en términos de la Gestión Circular que inscriba ante la Secretaría (Fracc. XXXI, Art. 3º. LGEC).

Restauración. Conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales (Fracc. XXXIV, Art. 3º. LGEEPA).

Riesgo / Riesgos (plural). Probabilidad o posibilidad de que el manejo, la liberación al ambiente y la exposición a un material o residuo, ocasionen efectos adversos en la salud humana, en los demás organismos vivos o en el ambiente (Fracc. XXXVI, Art. 5º. LGPGIR).

Secretaría. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Servicio / Servicios (plural). Actividad diseñada o ejecutada con un propósito en la cual se emplean productos específicos de diversa naturaleza y propósito (IPN-CPS).

Sistema económico. Sistema por el cual la sociedad organiza y asigna recursos (3.3. ISO 59010:2024).

Sistema producto. Conjunto de procesos unitarios interrelacionados, junto con sus flujos elementales y de producto, que representan el ciclo de vida de un producto (3.1.3.2, ISO 14067:2018).

Sistema. Sistema Nacional de Economía Circular (Fracc. XXXIII, Art. 3º LGEC).

Solución / Soluciones (plural). Producto o servicio, o una combinación de ambos, que satisface una necesidad de una parte interesada (3.14. ISO 59010:2024).

Trazabilidad. Sistema integrado de información que da seguimiento continuo, sistemático y verificable a los flujos de materia y energía de un producto o servicio a lo largo de su cadena de manejo y ciclo de vida (IPN-CPS).

Unidad declarada (UD). Unidad utilizada para organizaciones o actividades cuando no se evalúa una función específica de producto (IPN-CPS).

Unidad funcional (UF). Unidad estandarizada de una determinada magnitud física, adoptada por convención y reconocida en el Sistema General de Unidades de Medida, que se utiliza como patrón para cuantificar y reportar resultados (IPN-CPS).

Uso del agua. Empleo o alteración del agua derivado de actividades humanas, incluyendo extracción, consumo, descarga y modificación de su calidad o disponibilidad (3.2.1, ISO 14046:2014).

Valor. Beneficio(s) o ganancia(s) derivado(s) de satisfacer necesidades y expectativas, en relación con el uso y la conservación de recursos (3.16. ISO 59010:2024).

Vida útil. El período de tiempo desde que un producto es liberado para su uso después de su fabricación hasta el momento en que se vuelve obsoleto, sin posibilidad de recuperación a nivel de producto (Fundación Ellen MacArthur, 2021).

Anexo II. Cálculo de Huella de Carbono

1. Objeto

El presente Anexo establece la metodología técnica para la cuantificación de la huella de carbono de producto (HCP) y el carbono negro (CN), mediante la aplicación de un análisis de ciclo de vida.

La metodología definida tiene por objeto asegurar que la cuantificación de ambos sea coherente, transparente, trazable y reproducible, y que los resultados obtenidos sean adecuados para su uso en la comprensión del desempeño climático del producto, el seguimiento de dicho desempeño y, cuando proceda, la comunicación de la información. Los resultados se expresarán en masa de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) por unidad funcional o, en el caso de una HCP parcial, por unidad declarada.

Este Anexo se limita a la categoría de impacto de cambio climático y no aborda otros impactos ambientales, sociales o económicos derivados del ciclo de vida del producto.

2. Principio metodológico general

La cuantificación de la **HCP** se realizará considerando las emisiones y remociones relevantes de gases de efecto invernadero (**GEI**) asociadas al sistema producto, dentro de los límites del sistema definidos en el estudio.

La HCP se basará en un análisis de ciclo de vida (**ACV**), que podrá ser completo o parcial, conforme a lo establecido en la ISO 14067:2018. En todos los casos, la cuantificación se limitará a la categoría de impacto de cambio climático. El resultado de la HCP se expresará en masa de dióxido de carbono equivalente (CO_2e), calculada mediante la aplicación de factores de caracterización a las emisiones y remociones de GEI incluidas en el sistema producto.

La cuantificación de la HCP deberá realizarse conforme a los principios de:

- Perspectiva de ciclo de vida;
- Enfoque relativo basado en una unidad funcional o unidad declarada;
- Integridad;
- Coherencia y consistencia;
- Exactitud;
- Transparencia; y
- Evitación de la doble contabilidad.

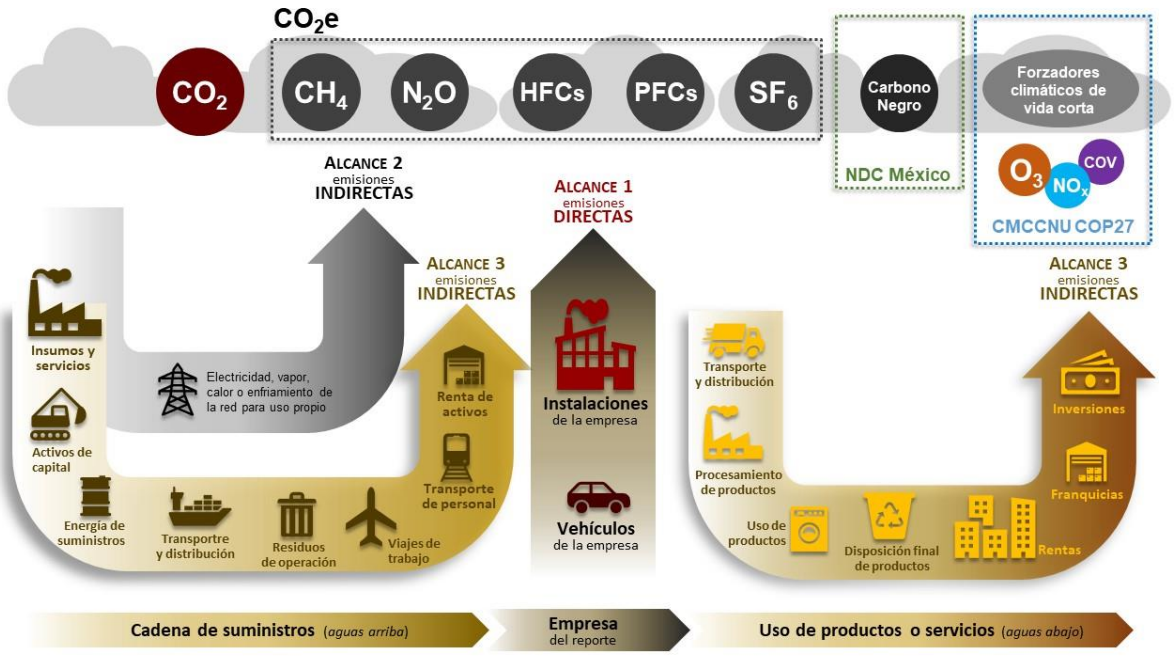
La selección de datos, métodos y supuestos deberá ser adecuada al objetivo y alcance del estudio y estar debidamente justificada y documentada.

3. Relación con otras normas y reglas de categoría

Cuando existan reglas de categoría de producto (**RCP**) o reglas específicas de huella de carbono de producto (HCP-RCP) aplicables, como las de la Unión Europea o los esquemas tipo ASG (ESG por sus siglas en inglés *Environment, Social and Governance*), éstas deberán utilizarse en la cuantificación de la HCP, siempre que hayan sido desarrolladas de conformidad con otras normas sectoriales equivalentes y coherentes con ISO 14067:2018 (ver Figura 10).

En caso de que existan múltiples RCP aplicables, deberá seleccionarse la más pertinente en función del objetivo y alcance del estudio, justificando dicha selección en el informe. Cuando no exista una RCP aplicable, podrán utilizarse otros documentos sectoriales reconocidos internacionalmente, siempre que sean coherentes con los principios, requisitos y directrices de la ISO 14067:2018 y su utilización esté debidamente justificada y documentada. El uso de RCP o HCP-RCP no sustituye los requisitos de la ISO 14067:2018, sino que los complementa para su aplicación a categorías de producto específicas.

Figura 10. Alcances de inclusión de fuentes emisoras de GEI en esquemas tipo ASG y reportes de huella de carbono.



FUENTE: Elaboración propia adaptado desde WRI/WBCSD, 2011. *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard.*

4. Definición del objetivo y del alcance

El objetivo del estudio debe indicar de manera inequívoca la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio, el público objetivo y, cuando aplique, la forma de comunicación de la huella o de parte de ella. Esta definición no es un formalismo; determina el nivel de detalle, la selección de datos, los criterios de corte, el tratamiento de la incertidumbre y la posibilidad de uso comparativo.

El alcance debe describir el sistema en estudio y sus funciones, la unidad funcional o declarada, los límites del sistema, el alcance geográfico, los requisitos de calidad de los datos, el límite temporal de los datos, los supuestos de la fase de uso y del fin de vida, los procedimientos de asignación, el tratamiento de emisiones y remociones específicas de GEI, el tipo de informe, el tipo de revisión crítica y las limitaciones del estudio.

4.1. Unidad funcional y unidad declarada

El estudio debe especificar de forma clara una unidad funcional o, en estudios parciales, una unidad declarada. La unidad funcional se usa cuando el análisis representa una función completa del producto; la unidad declarada se usa en HCP parcial. La unidad debe ser medible y coherente con el propósito del estudio.

Cuando se comparan productos, la comparación debe hacerse sobre la misma unidad funcional. Las comparaciones con unidad declarada solo son aceptables si las etapas omitidas son idénticas entre sistemas y si la comparación no induce sesgos.

Las comparaciones de huella de carbono de producto destinadas a comunicación pública deberán realizarse sobre la misma unidad funcional, emplear límites del sistema, supuestos metodológicos y calidad de datos equivalentes, además someterse a revisión crítica conforme a la ISO 14071:2024 antes de su publicación.

4.2. Flujo de referencia

Definida la unidad funcional o declarada, debe establecerse el flujo de referencia, es decir, la cantidad de producto necesaria para cumplir esa unidad. Ese flujo de referencia es la base para relacionar los datos del inventario con la función evaluada.

5. Límites del sistema, corte y exclusiones

El límite del sistema determina qué procesos unitarios se incluyen en el estudio. La exclusión de etapas, procesos, entradas o salidas solo está permitida si no altera significativamente las conclusiones. Toda exclusión debe declararse, justificarse y documentarse.

No se permite que el criterio de corte se use como una vía para simplificar indebidamente el estudio. Por ello, los criterios de corte deben definirse en la fase de objetivo y alcance y luego aplicarse con coherencia. Si un flujo resulta insignificante

para una etapa concreta, puede excluirse por razones prácticas, pero esa decisión debe registrarse y su efecto en el resultado debe analizarse.

5.1. Regla general de inclusión

Deben incluirse todos los procesos y flujos atribuibles al sistema analizado. El límite del sistema debe ser suficientemente amplio para evitar omisiones que cambien el resultado general.

5.2. Exclusión de compensaciones de carbono

La HCP y la HCP parcial no deben incluir compensación de carbono. Se debe distinguir claramente entre remociones o almacenamiento dentro del sistema producto y mecanismos de compensación externos; estos últimos no forman parte del cálculo de la huella.

Tabla 6. Elementos mínimos del alcance.

ELEMENTO	CONTENIDO MÍNIMO
Objetivo	Aplicación prevista, uso de resultados y público objetivo
Unidad	Unidad funcional o unidad declarada
Límite del sistema	Etapas, procesos, entradas y salidas incluidas
Geografía	Alcance espacial del estudio
Tiempo	Periodo representativo de los datos
Calidad de datos	Criterios de representatividad y precisión
Asignación	Regla de reparto de cargas y beneficios
GEI específicos	Carbono biogénico, electricidad, CUS*, uso del suelo, aeronaves
Revisión	Tipo de revisión crítica, si aplica
Limitaciones	Restricciones metodológicas y de interpretación

*CUS por sus siglas en inglés: Carbon Use and Storage.

Cuando se realicen compensaciones físicas directas (*offset* ambiental) (esto es distinto a la compensación por *trade-off* que no está permitida en esta Metodología) se deberá calcular cualquier deducción en el cálculo de la huella de carbono de producto (HCP) y

se deberá clasificar estrictamente como remoción o almacenamiento interno, siempre y cuando se cumpla con las siguientes reglas:

Principio de Frontera Estricta (Prohibición de o*ffsets*). Queda estrictamente prohibida la sustracción de emisiones mediante la compra de créditos de carbono, Certificados de Reducción de Emisiones (CERs), I-RECs (*International Renewable Energy Certificates*) o cualquier instrumento financiero que mitigue emisiones fuera de los límites del sistema en foco. Toda captura debe ocurrir físicamente dentro de la cadena de valor del producto o servicio (ej. captura directa en chimenea del proceso productivo, o absorción biogénica en materias primas cultivadas bajo el control de la organización).

Permanencia y efecto temporal. El almacenamiento de carbono biogénico o fósil dentro del producto (ej. uso de materiales orgánicos permanentes, o concretos inyectados con CO_2) solo podrá deducirse si se demuestra su permanencia a largo plazo. Si el carbono se liberará en la fase de fin de vida, deberá contabilizarse como una emisión diferida, documentando el perfil temporal exacto y sin restarse del cálculo final del impacto.

Principio de No Doble Contabilidad. El carbono removido o almacenado internamente no podrá ser monetizado, vendido o transferido como un atributo ambiental o certificado a una tercera parte. Si la remoción interna se comercializa en mercados voluntarios o regulados, perderá inmediatamente su validez para reducir la HCP del producto evaluado.

Trazabilidad y calidad de datos. Toda remoción debe sustentarse en datos primarios de alta calidad obtenidos mediante mediciones directas o balances de masa comprobables y auditables. No se admitirán remociones basadas exclusivamente en factores de estimación teórica o proyecciones a futuro.

Para la cuantificación neta del sistema en foco, la ecuación general de la huella de carbono integrará las remociones internas ($R_{internas}$) únicamente si el proceso que genera dicha remoción está incluido en el Inventario de Ciclo de Vida, asumiendo también las cargas ambientales (emisiones y energía) generadas por la propia tecnología o actividad de captura:

$$HCP = \sum(Ei \times GWPi) - \sum(R_{internas} \times GWPi)$$

Donde:

Ei representa las emisiones directas e indirectas del sistema y $R_{internas}$ representa el carbono físicamente secuestrado dentro de las fronteras de este.

6. Inventario del ciclo de vida para la HCP

El inventario es la fase en la que se recopilan y cuantifican todas las entradas y salidas de los procesos unitarios incluidos. Se exigen datos cualitativos y cuantitativos para todos los procesos relevantes del sistema. Los datos pueden ser medidos, calculados o estimados, pero deben ser coherentes, trazables y representativos.

Los procesos significativos deben documentarse en el informe. Cuando la organización tiene control financiero u operacional sobre un proceso, son necesarios datos específicos del sitio; además, los procesos que contribuyen significativamente de la huella tras aplicar el corte, entendiendo por tales aquellos que en conjunto explican al menos el 80 % de la HCP, comenzando por las contribuciones más grandes a las más pequeñas tras el corte, también deben apoyarse en datos específicos del sitio cuando sea posible.

Para la inclusión del carbono negro (**BC,** por sus siglas en inglés *black carbon*), este debe incorporarse en primera instancia y como parte del Inventario de Ciclo de Vida como un flujo de emisiones específico (en kg). Estas emisiones proceden de fuentes de combustión incompleta asociadas al sistema producto (ej. combustión de diésel, quema de biomasa). Se debe sumar un flujo de masa de BC por cada actividad emisora relevante, asegurando que los criterios de corte no excluyan fuentes significativas.

6.1. Calidad de los datos

La calidad de los datos debe caracterizarse y evaluarse según cobertura temporal, cobertura geográfica, cobertura tecnológica, precisión, integridad, representatividad, coherencia, reproducibilidad, fuentes de datos e incertidumbre. Se toma un enfoque en dos etapas: primero caracterizar la calidad requerida y luego evaluar los datos frente a esos requisitos.

6.2. Validación de datos

La validación debe demostrar que los datos cumplen los requisitos de calidad. Para ello pueden utilizarse balances de masa, balances energéticos, comparaciones con factores de emisión, control cruzado con bases de datos o métodos equivalentes. La lógica es simple: si el proceso respeta conservación de masa y energía, el inventario debe reflejarlo.

6.3. Relación entre procesos unitarios, flujo de referencia y unidad

Cada proceso unitario debe tener un flujo apropiado que permita relacionar entradas y salidas con la unidad funcional o declarada. El agregado de datos debe hacerse a un nivel coherente con el objetivo del estudio.

Tabla 7. Criterios de calidad de datos.

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Cobertura temporal	Edad de los datos y periodo representado
Cobertura geográfica	Área geográfica representada
Cobertura tecnológica	Tecnología o mezcla tecnológica
Precisión	Variabilidad o exactitud del dato
Integridad	Porcentaje del flujo total cubierto
Representatividad	Grado de correspondencia con la población de interés
Coherencia	Aplicación uniforme de la metodología
Reproducibilidad	Posibilidad de replicar el resultado
Fuentes	Origen documental o de medición
Incertidumbre	Variación asociada a los datos o supuestos

7. Fórmulas generales de cuantificación

La huella de carbono total puede expresarse como la suma de las emisiones y remociones caracterizadas de todos los gases relevantes y de todos los procesos del sistema:

$$HCP = \sum_{p=1}^{n} \sum_{g=1}^{m} (M_{p,g} * GWP_g) + \sum_{p=1}^{n} (M_{p,BC} * GWP_{BC})$$

Donde:

HCP = huella de carbono total del producto, en kg CO_2e por unidad funcional o declarada;

$M_{p,g}$ = masa emitida o removida del gas (g) en el proceso (p), en kg;

GWP_g = potencial de calentamiento global del gas (g), en kg CO_2e/kg gas;

n = número de procesos unitarios;

m = número de gases considerados;

$M_{p,BC}$ =masa de carbono negro emitida en el proceso (p), en kg;

GWP_{BC} = potencial de calentamiento global del carbono negro;

También puede expresarse como balance neto:

$$HCP = \sum E_i - \sum R_j$$

Donde:

E_i son las emisiones caracterizadas y R_j las remociones caracterizadas, ambas en kg CO_2e.

Tabla 8. Variables generales de cálculo.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDAD
HCP	Huella de carbono del producto (por **UF** o **UD**)	kg CO_2e/UF o UD
$\boldsymbol{M_{p,g}}$	Masa emitida o removida del gas (g) en el proceso (p)	kg
$\boldsymbol{GWP_g}$	Potencial de calentamiento global	kg CO_2e/kg
$\boldsymbol{E_i}$	Emisión caracterizada	kg CO_2e
$\boldsymbol{R_j}$	Remoción caracterizada	kg CO_2e
UF	Unidad funcional	según definición
UD	Unidad declarada	según definición

8. Asignación

La asignación se aplica cuando un proceso genera más de un producto, coproducto o salida útil. La secuencia debe ser clara: primero evitar la asignación; si no es posible, dividir el proceso; si tampoco es posible, repartir por relaciones físicas; y solo en último caso usar relaciones económicas.

8.1. Evitar la asignación

Debe intentarse desagregar el proceso en subprocesos o ampliar el sistema cuando existan funciones adicionales atribuibles a coproductos.

8.2. Asignación física

Cuando la asignación no pueda evitarse, se prioriza relaciones físicas. La distribución puede expresarse así:

$$f_k = \frac{B_k}{\sum_{i=1}^{n} B_i}$$

$$E_k = f_k * E_{total}$$

Donde:

B_k es la base física seleccionada para el producto (k) y E_k la parte asignada de las emisiones totales. La base física puede ser masa, energía, contenido de carbono u otra relación causalmente justificada.

8.3. Asignación económica

Si no existe relación física adecuada, puede usarse el valor económico:

$$f_k = \frac{V_k}{\sum_{i=1}^{n} V_i}$$

Donde:

V_k es el valor económico del producto (k). Esta opción debe justificarse y considerar la subsidiaria frente a la base física.

9. Etapas de uso y fin de vida

Cuando el estudio incluya la fase de uso, deben considerarse las emisiones y remociones de GEI derivadas del patrón de uso real o representativo del mercado objetivo. Debe definirse explícitamente el usuario, el perfil de uso, la vida útil y las condiciones relevantes del empleo del producto.

Si el perfil de uso no está regulado por una RCP o por una fuente técnica aplicable, la organización debe justificar sus supuestos y realizar análisis de sensibilidad. Cualquier diferencia entre el uso recomendado por el fabricante y el uso real debe documentarse.

En el fin de vida deben considerarse, según corresponda, recogida, transporte, desmontaje, trituración, reciclaje, compostaje, recuperación energética, incineración, tratamiento de cenizas y disposición final. El estudio debe vincular estas operaciones al flujo de referencia.

10. Tratamiento del efecto del tiempo

Si las emisiones o remociones de la fase de uso o del fin de vida ocurren más de diez años después de que el producto entra en uso, debe especificarse el momento de esas

emisiones o remociones respecto al año de producción. Si el efecto temporal se calcula, debe informarse por separado, junto con el método utilizado y su justificación.

El resultado principal de la HCP se calcula sin ajuste temporal explícito, salvo que se aplique un método específico para considerar el efecto del tiempo, el cual deberá informarse por separado junto con su justificación.

11. Emisiones y remociones específicas de GEI

11.1. Carbono fósil y biogénico

Las emisiones y remociones fósiles deben incluirse y documentarse por separado como resultado neto. Las emisiones y remociones biogénicas también deben incluirse, pero además deben informarse separadamente.

Todos los procesos del ciclo de vida de biomasa deben incorporarse al sistema, incluyendo cultivo, producción y recolección.

11.2. Carbono biogénico en productos

Si el producto almacena carbono biogénico durante un tiempo, ese almacenamiento debe tratarse conforme al efecto temporal. Si se calcula el contenido de carbono biogénico del producto, se documenta por separado, no se incorpora al cálculo final.

11.3. Carbono negro

A diferencia de otros gases, el BC no se mide directamente como un solo gas, sino que se evalúa mediante diversas metodologías que analizan sus propiedades físicas. Las emisiones proceden de fuentes de combustión incompleta asociadas al sistema producto. Se puede cuantificar el BC mediante:

- **Métodos ópticos (aetalómetros)**. Son los más comunes para el monitoreo en tiempo real. Miden la absorción de luz (típicamente a 880 nm) de las partículas recolectadas en un filtro para calcular la concentración de "carbono negro equivalente" (BCe).
- **Análisis térmico-óptico**. Se utiliza para distinguir entre carbono orgánico (CO) y carbono elemental (CE). La muestra se calienta por etapas y se utiliza un láser para corregir las interferencias, proporcionando alta precisión, pero sin datos en tiempo real.
- **Análisis químico y microscopía**. Métodos como la oxidación química o el uso de microscopios electrónicos (SEM/TEM) se emplean para identificar la morfología de las partículas en muestras complejas como sedimentos o tejidos biológicos.
- **Estimación por factores de emisión.** Si no se dispone de mediciones directas, se estimará a partir de inventarios de partículas finas (ej. aplicando factores de especiación sobre emisiones de $PM_{2.5}$) o utilizando factores de emisión validados (kg de BC por unidad de combustible/actividad).

En general, el método de medición directa o indirecta que pretenda utilizarse debe estar validado, o en su defecto, los factores de emisión deben estar validados en publicaciones entre pares.

12. Evaluación de impacto

La fase de evaluación del impacto calcula la contribución climática de cada emisión y remoción mediante los factores de caracterización del IPCC a 100 años, salvo justificación distinta. Se permite informar otros horizontes temporales o GTP, pero por separado.

$$Impacto_g = M_g * GWP_g$$

La HCP final es la suma de los impactos caracterizados. Cuando se actualicen los factores del IPCC, deben usarse los más recientes, salvo justificación técnica contraria.

12.1. Caracterización climática del carbono negro

Si bien no existe actualmente un factor de Potencial de Calentamiento Global a 100 años (GWP_{100}) para carbono negro (BC) universalmente adoptado por el IPCC para fines de contabilidad oficial de gases de efecto invernadero, la literatura científica reciente ofrece valores técnicamente robustos que pueden utilizarse como referencia analítica bajo supuestos explícitos. En particular, la actualización metodológica resumida por *CICERO Center for Klimaforsning* (Samset *et al.*, 2023; Abdillah S. *et al*., 2026), con base en los avances científicos incorporados en el IPCC AR6, propone un valor de **GWP_{100}=342**, significativamente menor al valor histórico de 658 derivado del AR5. Este valor representa una aproximación científicamente defendible para estimar el impacto climático del carbono negro bajo condiciones promedio globales, especialmente en ejercicios de evaluación comparativa, análisis prospectivos, huellas climáticas ampliadas o análisis de ciclo de vida.

Para el caso de México, el uso del valor 342 puede considerarse metodológicamente aceptable como referencia técnica nacional para estudios de circularidad, particularmente calculado en actividades y sectores donde las emisiones de carbono negro son relevantes —como el transporte con vehículos con motores de combustión interna a diésel, combustión industrial de combustibles fósiles pesados, quema de biomasa, ladrilleras, transporte marítimo o uso residencial de combustibles sólidos— y donde existe interés en reflejar impactos climáticos de corto plazo no capturados adecuadamente por los inventarios tradicionales centrados exclusivamente en CO_2, CH_4, N_2O y gases F. No obstante, este uso debe entenderse estrictamente como una herramienta analítica complementaria y no como un sustituto de la contabilidad oficial de emisiones bajo la CMNUCC o el Acuerdo de París, ya que el carbono negro no constituye un gas de efecto invernadero bien mezclado y su efecto climático depende fuertemente de factores regionales como la localización de la emisión a nivel planetario, la interacción con otros aerosoles, la latitud y los patrones atmosféricos.

En consecuencia, cualquier aplicación del GWP_{100}=342 en México debería acompañarse de una advertencia metodológica clara: su utilización sería válida únicamente para fines internos, estudios sectoriales, evaluación de políticas públicas nacionales o ejercicios de huella climática expandida, sin pretensión de comparabilidad internacional, armonización con inventarios nacionales oficiales, ni reporte global homologado.

Siendo así, el impacto del carbono negro se deberá definir con base en esta ecuación:

$$Impacto_{BC} = M_{BC} * GWP_{BC}$$

Por consistencia con las prácticas habituales de inventarios nacionales a 100 años, se adoptará el valor más actualizado, a saber, un GWP_{100}=342 (es decir, cada kg de BC equivale a 342 kg CO_2e).

Si se desea enfatizar el impacto a corto plazo para fines analíticos o de sensibilidad, particularmente dando importancia a su impacto en salud pública y por ejemplo, a 20 años, podrá utilizarse un GWP_{20}=1262 (Samset *et al.*, 2023), reportándolo por separado.

13. Electricidad

La electricidad consumida deberá tratarse considerando todo su ciclo de vida: *upstream*, generación, transmisión, distribución y *downstream*. El tratamiento debe evitar doble contabilidad.

Cuando se utilicen instrumentos contractuales para la electricidad, su aplicación deberá ser coherente con criterios internacionalmente reconocidos de trazabilidad y unicidad.

13.1. Electricidad generada internamente

Si la electricidad se genera dentro de la organización y no se han transferido atributos contractuales a terceros, deben usarse los datos del ciclo de vida de esa electricidad para el producto en estudio.

13.2. Electricidad de proveedor conectado directamente

Puede usarse un factor específico del proveedor cuando exista una línea de transmisión exclusiva y no se hayan vendido atributos contractuales a terceros.

13.3. Electricidad de red

Cuando no exista información específica del proveedor, debe usarse el factor de emisión de la red pertinente. Si existen instrumentos contractuales válidos, pueden utilizarse, siempre que cumplan trazabilidad, unicidad, correspondencia temporal y geográfica, y que el atributo no haya sido reclamado por otra entidad.

Tabla 9. Tratamiento de electricidad.

CASO	REGLA PRINCIPAL
Generación interna	Usar datos del ciclo de vida de la electricidad propia
Proveedor conectado directamente	Usar factor específico del proveedor, si hay conexión exclusiva
Red sin atributos contractuales	Usar factor de la red pertinente
Red con instrumentos contractuales	Solo si hay trazabilidad, unicidad y coherencia temporal/geográfica

14. Cambio de uso del suelo y uso del suelo

14.1. Cambio de uso del suelo

Las emisiones y remociones derivadas del cambio directo de uso del suelo deben evaluarse con métodos internacionalmente reconocidos, como las guías IPCC, y documentarse por separado. El periodo de análisis debe estar justificado y, como mínimo, abarcar un ciclo completo de rotación para cultivos o árboles, cuando aplique.

El cambio indirecto de uso del suelo puede incluirse solo cuando exista un procedimiento internacional acordado.

14.2. Uso del suelo

Las emisiones y remociones que se deriven del uso del suelo, incluso sin cambio de categoría de uso, deberían evaluarse e incluirse. Si no se incluyen, la decisión debe justificarse.

15. Emisiones de GEI de aeronaves

Las emisiones del transporte aéreo deben incluirse y documentarse por separado. Si se usa un multiplicador de aviación, éste no debe incorporarse al cálculo final de la HCP y debe informarse aparte.

16. Seguimiento del desempeño

Cuando la HCP se utilice para seguimiento en el tiempo, los estudios deben realizarse en diferentes momentos, con la misma unidad funcional o declarada y con métodos

consistentes. El periodo entre evaluaciones no debe ser menor que el límite temporal definido para los datos.

17. Interpretación

La interpretación debe identificar los aspectos relevantes del estudio, evaluar integridad, coherencia y sensibilidad, y formular conclusiones, limitaciones y recomendaciones.

La interpretación debe incluir, al menos, la evaluación de incertidumbre, el análisis de las reglas de redondeo si se usan, la documentación explícita de las asignaciones y la identificación de limitaciones del estudio. También debería incluir sensibilidad respecto de alternativas de uso, escenarios de fin de vida y opciones metodológicas importantes.

18. Informe de estudio de la HCP

El informe tiene por objeto demostrar que el estudio cumple el objeto y que sus resultados pueden usarse de forma técnica y transparente. Debe incluir la unidad funcional o declarada, el flujo de referencia, el límite del sistema, los criterios de corte, la lista de procesos importantes, las fuentes de datos, los GEI considerados, los factores de caracterización, los procedimientos de asignación, el tratamiento del tiempo, la calidad de datos, la sensibilidad, la incertidumbre, el tratamiento de electricidad, la interpretación, el alcance modificado cuando exista, los perfiles de uso, los escenarios de fin de vida, el periodo representativo y la referencia a la RCP utilizada.

19. Revisión crítica

Cuando el estudio vaya a comunicarse externamente o a usarse para comparaciones, debe someterse a revisión crítica de acuerdo con ISO/TS 14071. La revisión aumenta la credibilidad y verifica que la metodología, los datos, las interpretaciones y las conclusiones sean consistentes con el objetivo del estudio.

20. Limitaciones de la HCP

Se reconoce dos limitaciones estructurales: la HCP se centra en una sola categoría de impacto, el cambio climático, y además depende de decisiones metodológicas que pueden influir en el resultado. Por eso, el estudio debe explicitar supuestos, exclusiones y consecuencias metodológicas.

21. Enfoque sistemático de HCP

Cuando una organización desarrolle HCP para varios productos con el mismo conjunto de datos y procedimientos de asignación, puede adoptar un enfoque sistemático. Ese enfoque debe describir la secuencia de actividades, asignar responsabilidades, disponer de recursos, validar su funcionamiento mediante una prueba piloto y establecer controles para evitar que las HCP queden obsoletas o no representativas.

Tabla 10. Información mínima del informe de huella de carbono.

ELEMENTO	DEBE INCLUIRSE
Unidad	Funcional o declarada, y flujo de referencia
Sistema	Límites, procesos y exclusiones justificadas
Datos	Fuentes, calidad y decisiones de selección
GEI	Lista de gases y factores de caracterización
Carbono negro (BC)	Listado de emisiones de BC consideradas, GWP* (aplicando último factor empleado por el IPCC para 100 años) y metodología o fuente de datos (medición directa o factor de emisión)
Asignación	Criterios usados y justificación
Tiempo	Representatividad temporal y, si aplica, efecto temporal
Electricidad	Factor de red o proveedor y restricciones aplicables
Sensibilidad	Resultados y supuestos críticos
Interpretación	Conclusiones, limitaciones y recomendaciones
RCP	Norma o documento sectorial aplicado

*GWP, por sus siglas en inglés *Global Warming Potential.*

22. Tratamiento del reciclaje

Los siguientes enfoques constituyen ejemplos metodológicos, pero no son prescriptivos. El reciclaje puede tratarse como cuestión de asignación, en ciclo cerrado, si el material reciclado sustituye al material primario sin cambio en sus propiedades inherentes, puede evitarse la asignación. En ciclo abierto, cuando el material cambia de propiedades, puede aplicarse asignación física o económica, o un factor de asignación (A).

22.1. Reciclaje de ciclo cerrado

$$E_M = E_V + E_{E0L} - R * E_v$$

Donde:

E_M = emisiones asociadas a materias primas y fin de vida;
E_V = emisiones de producción de material virgen;
E_{E0L} = emisiones del fin de vida del sistema que entrega el material reciclado;
R = índice de reciclado.

Tabla 11. Variables del reciclaje.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
$\boldsymbol{E_M}$	Emisiones ligadas a materias primas y fin de vida
$\boldsymbol{E_V}$	Emisiones de material virgen
$\boldsymbol{E_{E0L}}$	Emisiones del fin de vida
$\boldsymbol{E_{PP}}$	Preprocesamiento del reciclado
$\boldsymbol{R}$	Tasa de reciclaje
$\boldsymbol{A}$	Factor de asignación
$\boldsymbol{C}$	Contenido reciclado

22.2. Reciclaje de ciclo abierto

Cuando se usa un factor de asignación (A), que refleja la relación entre el precio del material reciclado o residuo y el precio del material primario, puede expresarse:

$$E_M = E_V + E_{E0L} + R * A * E_V$$

Cuando el producto contiene material reciclado y se requiere incorporar el preprocesamiento del reciclado:

$$E_M = E_{PP} + E_{E0L} + (1 - R) * A * E_V$$

y, para una mezcla de material primario y reciclado:

$$E_M = C * E_{PP} + (1 - C) * E_V + E_{E0L} + (C - R) * A * E_V$$

Donde:

E_{PP} = emisiones de preprocesamiento del material reciclado;
C = contenido reciclado del producto.

Anexo III. Cálculo de Huella Hídrica Circular

Esta sección detalla la medición de la Huella Hídrica de acuerdo con los principios de circularidad que establece la LGEC. En términos ideales, para mantener la integridad ambiental de los medios y/o ecosistemas que son utilizados como fuentes de abastecimiento, la huella hídrica neutra de un producto o servicio es aquella que indica que el agua fue extraída respetando el caudal ecológico y no causa sobreexplotación de acuíferos, se depura mediante tratamiento para cumplir con las normas de descarga, se reúsa dentro del sistema en foco de la unidad funcional a caracterizar o se reintegra al medio ambiente sin causar daño a los ecosistemas, a la salud pública o a los ciclos hidrológicos, evitando un impacto negativo al recurso en cantidad o calidad.

1. Objetivo y campo de aplicación

El objeto de este Anexo es establecer las directrices operativas, ecuaciones matemáticas y criterios de evaluación de impacto para cuantificar la huella hídrica de un producto, proceso o servicio, fundamentada en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) según la norma **ISO 14046**, los ejemplos de aplicación de **ISO/TR 14073**, y la estructuración de la huella hídrica azul directa conforme a la **NMX-AA-184-SCFI-2021**. La particularidad de este esquema radica en la integración obligatoria de los criterios de la **LGEC**, condicionando la "neutralidad" o circularidad del indicador al cumplimiento normativo y ecosistémico de los flujos de entrada y salida del sistema.

2. Referencias normativas

La definición de Huella Hídrica Circular que se utilizará en cumplimiento a la LGEC, incorporando sus criterios de minimización de extracción, reutilización interna, tratamiento obligatorio y preservación de fuentes hídricas, se base en las normas que a continuación se enlistan:

- **ISO 14046:2014:** *Environmental management — Water footprint — Principles, requirements, and guidelines*.
- **ISO/TR 14073:2016:** *Environmental management — Water footprint — Illustrative examples on how to apply* ISO 14046.
- **NMX-AA-184-SCFI-2021:** Metodología para determinar el volumen de uso eficiente de aguas nacionales y la huella hídrica azul directa.
- **LAN (Ley de Aguas Nacionales):** Disposiciones sobre asignaciones, concesiones y protección de caudales ecológicos.

3. Términos, definiciones y marco conceptual de circularidad

Huella Hídrica azul directa ($HHDA$). Volumen de agua dulce consuntiva extraída de cuerpos superficiales o subterráneos para la ejecución de las actividades dentro del límite del sistema bajo estudio (NMX-AA-184-SCFI-2021).

Caudal ecológico. Cantidad, calidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos de acuerdo con la normatividad nacional aplicable (NMX-AA-159-SCFI-2012).

Agua de reúso ($V_{Reúso}$). Agua residual tratada que proviene de un proceso interno o de una planta de tratamiento externa que se reincorpora al ciclo productivo, sustituyendo la extracción de agua de primer uso.

Huella Hídrica Circular (HHC). Indicador neto ponderado que contempla la huella de escasez y degradación cuando los flujos del sistema violan las tasas de renovación del acuífero/río, rebasan el caudal ecológico o incumplen con los límites de descarga limpia.

4. Análisis de la huella hídrica bajo principios de circularidad

4.1. Definición de objetivos y alcance

Se debe explicitar el propósito del estudio, la aplicación prevista y la audiencia a la que se dirige. Los requisitos metodológicos obligatorios son los que se aplicarán en el Análisis de Ciclo de Vida (ver Anexo VI):

Unidad Funcional (UF)

Se define la unidad de medida con base en la función del sistema de productos. Todo flujo elemental de agua en el inventario debe referirse estrictamente a esta unidad, por ejemplo: *m^3 de agua consumida por tonelada de producto terminado listo para distribución* o *litros de agua por unidad funcional de servicio prestado*.

Límites del sistema (Enfoque de Ciclo de Vida)

El límite debe abarcar desde la cuna hasta la tumba o bien de la puerta a la puerta si está plenamente justificado en el alcance. Conforme a los principios de circularidad, se deben mapear con precisión quirúrgica las siguientes fronteras físicas y geográficas:

- Puntos exactos de extracción (coordenadas de pozos, derivaciones de ríos o redes de agua potable).
- Procesos unitarios internos de transformación y consumo (evaporación, incorporación al producto).

- Sistemas de tratamiento internos o externos (Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR).
- Puntos de descarga y cuerpos receptores (ríos, acuíferos, drenajes municipales).

Requisitos de calidad de los datos

Los datos primarios de volumen deben provenir de medidores calibrados con registros continuos de al menos 12 meses consecutivos para amortiguar variaciones estacionales. Los datos de calidad del agua (DBO, DQO, SST, metales pesados) deben provenir de laboratorios acreditados ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y la CONAGUA.

4.2. Análisis de Inventario de la Huella Hídrica

Consiste en la cuantificación detallada de todas las entradas y salidas de agua dentro de los límites del sistema. Cada flujo debe clasificarse geográficamente y por tipo de fuente. Las definiciones y ecuación fundamental del balance hídrico son las que se mencionan en la Tabla 12.

El balance hídrico general del sistema se rige por la ecuación:

$$\sum \boldsymbol{V_{entradas}} = \sum \boldsymbol{V_{salidas}}$$

$$\left(\boldsymbol{V_{Ext\ sup}} + \boldsymbol{V_{Ext\ sub}} + \boldsymbol{V_{Reúso}}\right) = \left(\boldsymbol{V_{Evap}} + \boldsymbol{V_{Prod}} + \boldsymbol{V_{Des}} + \boldsymbol{V_{Pérdidas}}\right)$$

4.3. Cuantificación de la Huella Hídrica Circular (HHC)

La simple cuantificación de volúmenes no constituye una huella hídrica bajo ISO 14046. Es estrictamente necesario evaluar los impactos ambientales potenciales empleando indicadores de caracterización que reflejen la escasez local y la degradación de la calidad del recurso. Para ello, se deberán cuantificar los siguientes dos aspectos:

Huella de Disponibilidad / Escasez de Agua

Para ponderar la escasez del agua extraída, se debe utilizar el índice estandarizado internacionalmente **AWARE (*Available Water Remaining*)** o, en su defecto para México, el índice de estrés hídrico por cuenca/acuífero publicado oficialmente por la CONAGUA.

El factor de caracterización ($\boldsymbol{FC_{escasez}}$) varía geográficamente según la disponibilidad relativa del recurso:

$$Huella\ de\ Escasez\ (m^3 eq)\ =\ Consumo\ de\ Agua\ (m^3)\ \times\ FC_{escasez}$$

Huella de Degradación del Agua

Mide el impacto de la contaminación generada por las descargas de agua residual. Se calcula evaluando la carga de contaminantes liberada frente a la

capacidad de dilución teórica del cuerpo receptor para alcanzar los umbrales ecotoxicológicos o normativos nacionales (NOM-001-SEMARNAT-2021).

Caudal ecológico

Cantidad, calidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos de acuerdo con la normatividad nacional aplicable (NMX-AA-159-SCFI-2012).

Tabla 12. Variables necesarias para considerar para el balance hídrico.

Flujo de Entrada / Salida	Símbolo	Descripción Metodológica e Integración LGEC
Volumen de extracción superficial	$\mathbf{V}_{Ext\ sup}$	Volumen total extraído de ríos, lagos o embalses.
Volumen de extracción subterránea	$\mathbf{V}_{Ext\ sub}$	Volumen extraído de acuíferos mediante pozos profundos.
Volumen de reúso interno	$\mathbf{V}_{Reúso}$	Flujo recirculado que cumple con los criterios de calidad interna de proceso.
Volumen evaporado	$\mathbf{V}_{Evap}$	Pérdida de agua hacia la atmósfera en torres de enfriamiento o procesos abiertos.
Volumen incorporado al producto	$\mathbf{V}_{Prod}$	Agua contenida físicamente en el bien final comercializado.
Volumen de descarga reintegrada	$\mathbf{V}_{Des}$	Volumen devuelto al medio ambiente tras su depuración en PTAR.
Volumen de pérdidas	$\mathbf{V}_{Pérdidas}$	Cantidad de agua que se pierde por fugas u otra índole

Huella Hídrica Circular (HHC)

Con el fin de operacionalizar la instrucción de la LGEC, la Huella Hídrica de la unidad funcional no se expresará únicamente como un volumen consuntivo abstracto, sino que se integrará en una función condicionada por factores de penalización ambientales y operativos vinculados directamente a la circularidad del recurso.

Para un sistema de procesos bajo los principios de la LGEC, la **Huella Hídrica Circular** neta por unidad funcional se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{HHC} = \left[\left(\mathbf{V}_{\boldsymbol{Ext\ sup}} \times \boldsymbol{F_{CE}}\right) + \left(\boldsymbol{V_{Ext\ sub}} \times F_{Acf}\right)\right] \times \boldsymbol{FC_{Escasez}} - \left[\boldsymbol{V_{Reúso}} \times \left(1 - \left(\frac{\boldsymbol{E_{PTAR}}}{100}\right)\right)\right] + \left[\boldsymbol{V_{Descarga}} \times \boldsymbol{F_{Degradación}}\right]$$

Donde cada término y factor se describe y parametriza a continuación:

Factor de Caudal Ecológico ($\boldsymbol{F_{CE}}$)

Este factor penaliza las extracciones superficiales si estas comprometen el régimen hídrico biológicamente necesario del río:

$\boldsymbol{F_{CE}} = \mathbf{1.0}$: Si se demuestra técnicamente (con base en la NMX-AA-159-SCFI-2012) que la extracción se realiza respetando plenamente el caudal ecológico de la cuenca en cualquier época del año.

$\boldsymbol{F_{CE}} = \mathbf{1.5}\ \boldsymbol{a}\ \mathbf{3.0}$: Si la extracción ocurre en una cuenca con veda hídrica o si reduce el flujo remanente por debajo del umbral crítico de subsistencia del ecosistema acuático.

Factor de Sustentabilidad del Acuífero (F_{Acf})

Este factor evalúa el estado del cuerpo de agua subterráneo de donde proviene el recurso:

$\boldsymbol{F_{Acf}} = \mathbf{1.0}$: Si el acuífero fuente se encuentra en equilibrio hidrogeológico (Disponibilidad Media Anual positiva publicada en el Diario Oficial de la Federación).

$\boldsymbol{F_{Acf}} = \mathbf{2.0}$: Si la extracción proviene de un acuífero clasificado oficialmente por CONAGUA como **sin disponibilidad, en estado de sobreexplotación o con intrusión salina**, violando el principio de resiliencia de los ciclos hidrológicos de la LGEC.

Término de reutilización y eficiencia de la PTAR ($\boldsymbol{V_{Reúso}} \times \left(\mathbf{1} - \left(\frac{\boldsymbol{E_{PTAR}}}{\mathbf{100}}\right)\right)$)

Este bloque representa un crédito positivo (reducción de la huella total) condicionado a la eficiencia de remoción de contaminantes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales interna $\boldsymbol{E_{PTAR}}$, expresada en porcentaje de remoción de DBO/DQO):

Si la PTAR limpia el agua a un nivel óptimo ($\boldsymbol{E_{PTAR}} \approx \mathbf{100}\%$), el sustraendo es máximo, reduciendo significativamente la huella hídrica general debido al reemplazo efectivo de agua de primer uso.

Si el reúso se hace con agua de baja calidad sin tratamiento previo adecuado, la eficiencia disminuye, restando menos valor y penalizando indirectamente el indicador de circularidad.

Factor de degradación debido a la descarga ($F_{Degradación}$)

Evalúa las condiciones en las que el recurso es devuelto a la naturaleza:

$F_{Degradación} = 0$ **Huella Neutra por Descarga Limpia.** Se alcanza exclusivamente si los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua descargada igualan o mejoran las condiciones naturales del cuerpo receptor y cumplen estrictamente con los límites más restrictivos de la **NOM-001-SEMARNAT-2021**, garantizando que no se causa daño a los ecosistemas ni a la salud pública.

$F_{Degradación} > 1.0$ Si la descarga presenta concentraciones contaminantes que requieran un volumen de dilución ambiental en el cuerpo receptor, provocando impactos de eutrofización o ecotoxicidad acuática.

Bajo la ecuación de cálculo de la **Huella Hídrica Circular**, para que un producto o servicio ostente una huella neutra, se debe demostrar documental y analíticamente que:

$F_{CE} = 1.0$ y $F_{Acf} = 1.0$ (cero afectación a fuentes de agua nacionales).

$F_{Degradación} = 0$ (el agua reintegrada es perfectamente limpia y segura).

Cabe aclarar que la tasa de reúso interno tiende al máximo técnico posible disminuyendo las extracciones.

Cualquier remanente de consumo irreversible (por evaporación o incorporación al producto) es compensado mediante obras directas de recarga artificial de acuíferos o restauración hidrológica forestal en la misma subcuenca por un volumen equivalente indexado por el índice de escasez local.

Compensación hídrica

Cuando el sistema foco agote todas las vías de eficiencia, reducción y reúso interno, el volumen de consumo irreversible remanente podrá ser neutralizado exclusivamente mediante mecanismos de compensación física directa.

Para que el sistema alcance la Huella Hídrica Circular Neutra ($HHC = 0$), el volumen compensado debe ser equivalente al impacto generado, calculado mediante la siguiente ecuación:

$$V_{comp} = (V_{Eva} + V_{Prod} + V_{Pérdidas}) \times FP_{Origen}$$

Donde:

$V_{comp} =$ Volumen objetivo por compensar mediante infiltración, recarga al acuífero de origen o corriente superficial (m^3).

$(V_{Eva} + V_{Prod} + V_{Pérdidas})$ = Sumatoria de volúmenes de consumo consuntivo (m^3).

$\boldsymbol{FP_{Origen}}$ = (Factor de Penalización de Origen). Es un coeficiente que traslada el impacto ecosistémico de la extracción al requisito de compensación. Se calcula como el promedio ponderado de las penalizaciones de las fuentes de entrada del sistema:

$$FP_{Origen} = \frac{(V_{Ext\ sup} \times FCE) + (V_{Ext\ sub} \times F\ Acf)}{V_{Ext\ sup} + V_{Ext\ sub}} \times FC_{Escasez}$$

El impacto deber ser en la misma cuenca o cuencas que la alimentan dentro de los límites geográficos definidos para el sistema en foco. Además, se deben considerar los siguientes principios:

Prohibición estricta de trasvase de cuencas. La compensación (recarga artificial, pozos de absorción, restauración forestal, infraestructura verde) debe realizarse geográficamente dentro de la misma subcuenca o acuífero de donde se extrajo el recurso. No se reconocerán compensaciones realizadas en acuíferos con mayor disponibilidad para mitigar impactos en zonas de alto estrés hídrico.

Prohibición de compensación puramente monetaria. El pago de cuotas, multas, donaciones a fondos genéricos internacionales o la compra de "*certificados hídricos*" sin un proyecto físico y auditable vinculado directamente a la recarga de la subcuenca impactada, carece de validez para el cálculo de la HHC. La compensación debe ser volumétrica y demostrable en campo.

Equivalencia cualitativa (calidad del agua). El agua infiltrada o inyectada artificialmente al acuífero para fines de compensación debe cumplir con parámetros fisicoquímicos y microbiológicos iguales o superiores a la calidad natural del cuerpo receptor, evitando estrictamente la contaminación subterránea (conforme a la normatividad nacional aplicable).

Adicionalidad. Las obras de compensación deben ser adicionales a las obligaciones regulatorias básicas de la organización. No se podrá contabilizar como compensación el tratamiento primario o secundario de descargas ya exigidas por la LGEC.

4.4. Interpretación de resultados y mejora continua

Los resultados derivados de la ecuación de la Huella Hídrica Circular (HHC) deben analizarse en función de los puntos críticos (*hotspots*) identificados en el inventario. Se deben priorizar en el sistema analizado las siguientes acciones estructuradas de economía circular hídrica:

Sustitución de fuentes. Migrar de extracciones de primer uso subterráneo a líneas de suministro de agua residual tratada externa o captación de agua de lluvia.

Optimización tecnológica interna. Implementación de ciclos cerrados de enfriamiento, lavado a contracorriente y segregación de corrientes de agua residual según su carga contaminante para facilitar tratamientos específicos de bajo consumo energético.

Gobernanza del agua. Participación activa en los Consejos de Cuenca y autoridades locales (estatales y municipales) del agua, para asegurar la inclusión social y comunitaria en las decisiones sobre el destino del recurso hídrico empleado en la producción de bienes y servicios.

4.5. Informes del estudio y declaraciones públicas

Cualquier informe de Huella Hídrica Circular destinado a ser comunicado externamente debe ser transparente y exhaustivo. De preferencia, la publicación debe realizarse páginas oficiales de la empresa, industria, organización o sector responsable de la evaluación de la circularidad del producto o servicio, en redes sociales estructuradas donde los documentos deben estar a disposición del público en general, de forma gratuita.

Para evitar “*greenwashing”* o “*circular washing*”, queda estrictamente prohibido emitir declaraciones de "*neutralidad hídrica*" o "*huella hídrica cero*" sin una verificación de tercera parte independiente que valide el cumplimiento de los balances de masa, la aplicación de factores de caracterización locales y las constancias de cumplimiento normativo vigentes ante la CONAGUA y la SEMARNAT.

Anexo IV. Cálculo de Aprovechamiento Energético Circular

1. Objeto

El presente Anexo establece el marco metodológico y procedimental para la cuantificación y evaluación del **Índice de Aprovechamiento Energético Circular (IAEC)** de un producto, servicio o sistema. Debido a la ausencia de referencias normativas nacionales o internacionales previas para medir de manera específica la circularidad energética, este índice se introduce como una métrica original y obligatoria dentro del Índice de Economía Circular exigido por la legislación mexicana.

El objeto primordial del IAEC es evaluar la capacidad de un sistema productivo para abastecer su demanda mediante fuentes energéticas renovables, penalizando la dependencia de recursos fósiles finitos. El resultado se expresa como un valor adimensional acotado estrictamente en un rango de entre **-1 y 1**, donde los valores negativos denotan una operación lineal o destructiva, y los valores positivos validan un desempeño circular.

2. Definición de las fronteras del sistema

La evaluación del aprovechamiento energético debe realizarse utilizando un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), permitiendo al evaluador definir de manera explícita las fronteras del sistema, ya sea bajo un alcance restringido "puerta a puerta" (*gate-to-gate*) o un análisis expandido "cuna a cuna" (*cradle-to-cradle*).

3. Modelado de escenarios

La validación del desempeño energético circular exige la construcción y contrastación obligatoria de exactamente dos escenarios bajo el principio de equivalencia funcional estricta:

- **Escenario BAU (*Business As Usual*).** Refleja la línea base del proceso convencional o lineal, caracterizado por un suministro energético con alta intensidad de carbono y una matriz de consumo típicamente dominada por combustibles fósiles y electricidad de red comercial convencional.
- **Escenario Circular.** Representa la alternativa de transformación sistémica donde se incorporan mecanismos de eficiencia térmica, y esquemas de generación o autoconsumo renovable *in situ*.

4. Cuantificación de flujos: medir los ingresos de energía primaria

Conforme a la **Etapa 5** de la metodología general, se debe recopilar y cuantificar de manera exhaustiva todo ingreso físico de energía primaria y portadores auxiliares necesarios para cumplir con la unidad funcional. Los flujos identificados se clasificarán rigurosamente en dos grandes categorías basándose en escalas de tiempo no geológicas:

Fuentes Renovables ($e_{renovable}$). Energía proveniente de recursos que no se agotan en la escala temporal económica humana, tales como radiación solar, energía eólica, biomasa sostenible certificada y calor geotérmico.

Fuentes No Renovables / Fósiles ($e_{fósil}$). Combustibles fósiles (diésel, gas natural, combustóleo), carbón y electricidad de red cuya combinación energética provenga de recursos finitos.

Energía específica renovable ($e_{renovable}$):

$$e_{renovable} = \frac{E_{renovable}}{nUnidad\ funcional}$$

Energía específica fósil ($e_{fósil}$):

$$e_{fósil} = \frac{E_{fósil}}{nUnidad\ funcional}$$

Energía específica total del sistema:

$$e_{fósil} = e_{renovable} + e_{fósil}$$

Índice de Aprovechamiento Energético Circular (IAEC):

Una vez obtenidas las energías específicas (expresadas consistentemente en unidades como MJ /unidad funcional), se aplica la ecuación corregida del

Índice de Aprovechamiento Energético Circular (IAEC), cuyos valores oscilarán en un rango adimensional de -1 a 1.

$$IAEC = \frac{e_{renovable} - e_{fósil}}{e_{total}}$$

Donde:

$e_{renovable}$ = Energía específica renovable por unidad funcional.

$e_{fósil}$ = Energía específica fósil por unidad funcional.

e_{total} =Energía específica total del sistema ($e_{renovable} + e_{fósil}$).

Al normalizar todas las energías a la misma unidad funcional desde el principio, el denominador y el numerador mantienen consistencia y el índice resultante permanece puramente adimensional.

5. Interpretación

La estructura matemática de la ecuación del IAEC fuerza un comportamiento asintótico que permite clasificar el metabolismo del sistema según los siguientes límites analíticos:

$\boldsymbol{IAEC = 1}$ **(Circularidad Pura Autónoma).** El sistema opera al 100% con fuentes renovables ($e_{fósil}$ = 0).

$\boldsymbol{0 < IAEC < 1}$ **(Circularidad en Transición).** El suministro renovable supera al consumo fósil.

$\boldsymbol{IAEC = 0}$ **(Punto de Equilibrio Lineal).** El consumo de energía específica renovable equivale exactamente al consumo de energía fósil.

$\boldsymbol{-1 < IAEC < 0}$ **(Operación Lineal).** La demanda fósil supera a la renovable.

$\boldsymbol{IAEC = -1}$ **(Linealidad Absoluta).** El sistema depende de forma exclusiva de combustibles fósiles o fuentes no renovables.

Anexo V. Cálculo de Huella Ambiental

El cálculo de la Huella Ambiental debe realizarse mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), guiado fundamentalmente por las normas de la familia ISO 14040, y realizado en un ambiente computacional con certificación internacional (ejemplo: *SimaPro* y otras opciones mostradas en la Tabla 1 de este documento).

La ISO 14040 define el marco conceptual del ACV mientras que la ISO 14044 convierte ese marco en requisitos metodológicos. Integradas, ambas normas exigen que todo cálculo ambiental sea relativo a una unidad funcional, cubra el ciclo de vida definido, use datos trazables, aplique reglas claras de asignación, convierta inventarios en impactos mediante factores de caracterización y someta los resultados a interpretación, sensibilidad, incertidumbre y revisión crítica cuando corresponda.

1. Objeto y campo de aplicación

Las normas ISO aplican a estudios de circularidad haciendo un ACV completo, que incluya la conformación y/o uso de Inventarios de Ciclo de Vida (ICV o LCI por sus siglas en inglés). Su finalidad es evaluar cargas ambientales asociadas a un producto, servicio, proceso u organización, desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida, incluyendo la inclusión de todas las *8 Rs* especificadas en la LGEC. La aplicación de resultados —por ejemplo, ecodiseño, compras verdes, declaraciones ambientales o comparación de productos— debe definirse desde el objetivo y alcance.

El ACV no es, por sí mismo, una evaluación económica ni social, aunque su lógica de ciclo de vida puede integrarse con análisis de costos, riesgo y/o desempeño social.

2. Términos y conceptos centrales

El concepto base es el **sistema de producto**, o ***sistema en foco*** si se aplica la terminología de la ISO 59020, entendido como el conjunto de procesos unitarios conectados por flujos de materia, energía, productos, coproductos, residuos y emisiones (Tabla 13).

Tabla 13. Elementos clave para el cálculo de la Huella Ambiental.

Concepto	Significado práctico
Unidad funcional	Referencia cuantificada del servicio prestado
Flujo de referencia	Cantidad de producto necesaria para cumplir la unidad funcional
Límite del sistema	Procesos incluidos y excluidos
Proceso unitario	Mínima unidad modelada
Entrada	Materia, energía, agua, combustibles
Salida	Producto, coproducto, residuo, emisión
Categoría de impacto	Cambio climático, acidificación, eutrofización, toxicidad, uso de agua, etc.

Ejemplo:

Unidad funcional: producir y entregar 1 tonelada de mezcla asfáltica sustentable.

Flujo de referencia: 1,000 kg de mezcla.

Sistema: fabricación de agregados derivados de llantas usadas, producción de mezcla asfáltica, transporte, colocación y fin de vida.

3. Principios del Análisis de Ciclo de Vida

La ISO 14040 establece principios rectores: perspectiva de ciclo de vida, enfoque ambiental, enfoque relativo a la unidad funcional, transparencia, integridad, prioridad científica y carácter iterativo.

En términos prácticos, esto significa que el cálculo debe evitar desplazar impactos de una etapa a otra. Por ejemplo, una alternativa puede reducir residuos, pero aumentar consumo energético o emisiones de transporte.

4. Definición de objetivo y alcance

Para iniciar el ACV, se debe definir **para qué se hace el estudio**, **quién lo usará**, **qué decisiones apoyará**, **qué sistema se analizará** y **qué nivel de precisión se requiere**. Deben considerarse los elementos que se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Elementos para incluir en la definición del objetivo y el alcance del ACV.

Elemento	Contenido
Objetivo	Propósito del estudio
Aplicación prevista	Diseño, comparación, regulación, certificación, reporte
Público objetivo	Empresa, autoridad, consumidor, terceros
Unidad funcional	Servicio medible
Límites del sistema	Cuna a puerta, cuna a tumba, cuna a cuna
Criterios de corte	Masa, energía, relevancia ambiental
Reglas de asignación	Masa, energía, valor económico u otra relación física
Calidad de datos	Temporal, geográfica, tecnológica
Método LCIA	IPCC, ReCiPe, TRACI, CML, USEtox, AWARE, etc.
Revisión crítica	Obligatoria si hay aseveraciones comparativas públicas

Cálculo base de unidad funcional

$$Impacto\ unitario = \frac{Impacto\ total}{Unidad\ funcional}$$

Ejemplo:

Si una planta emite: $2{,}500\ kgCO_2e$ para producir: $10\ toneladas$
entonces:

$$\frac{2{,}500}{10} = 250\ kgCO_2e/t$$

5. Inventarios de Ciclo de Vida (ICV)

La ISO 14044:2006 detalla que el inventario implica recopilación de datos, validación, relación de datos con procesos unitarios y agregación de entradas y salidas (Tabla 15).

Tabla 15. Elementos que deben registrarse en los ICV.

Tipo de flujo	Ejemplos
Materias primas	kg de acero, plástico, cemento, agregados
Energía	kWh, MJ, litros de diésel, m^3 de gas natural
Agua	m^3 extraídos, consumidos o descargados
Emisiones al aire	CO_2, CH_4, N_2O, NOx, SO_2, $PM_{2.5}$
Emisiones al agua	DQO, N, P, metales, hidrocarburos
Residuos	kg peligrosos, no peligrosos, reciclables
Productos y coproductos	kg o unidades producidas

Balance general de masa

$$\sum Entradas = \sum Salidas + \Delta Inventario$$

Ejemplo:

Entradas: $1{,}000\ kg\ materias\ primas + 50\ kg\ agua = 1{,}050\ kg$

Salidas: $950\ kg\ producto + 80\ kg\ residuos + 20\ kg\ emisiones = 1{,}050\ kg$

El balance se cierra mediante los siguientes cálculos en el ambiento o plataforma de cálculo computacional escogido (ej. *SimaPro*):

Cálculo de consumo específico

$$Consumo\ específico = \frac{Consumo\ total}{Unidad\ funcional}$$

Ejemplo:

$$\frac{500kWh}{10\ toneladas} = 50\ kWh/t$$

Cálculo de emisiones por factor

$$Emisiones = Actividad \times Factor\ de\ emisión$$

Ejemplo: $100\ litros\ diésel \times 2.68 \frac{kgCO_2}{litro} = 268 kgCO_2$

6. Asignación de impactos ambientales

La asignación de impactos funcionales se debe realizar en relación del producto o servicio que se está evaluando.

Los principales indicadores que las normas ISO 14040 y 14044 incluyen para diagnosticar los impactos ambientales se listan en la Tabla 16, indicando cuáles son obligatorios (color **guinda**) en esta Metodología y cuáles complementarios (color **verde**). No se incluyen los índices e indicadores de la Huella de Carbono, Huella Hídrica, Índice de Aprovechamiento Energético Circular y Huella de Agua, considerados en los Anexos II, III, IV y VII respectivamente.

Cabe destacar que el primer índice referido en la Tabla 16, el **Índice de Agotamiento de Recursos Abióticos,** se refiere a la reducción de la disponibilidad futura de recursos no vivos presentes en la corteza terrestre, tales como:

- Minerales metálicos (cobre, hierro, aluminio, litio, cobalto, etc.).
- Minerales no metálicos (fosfatos, arena sílica, yeso, etc.).
- Combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón).

El método más empleado para medir este índice es el desarrollado por la Universidad de Leiden, expresado en kg Sb-eq (kilogramos equivalentes de antimonio) para minerales y metales y/o MJ o barriles de petróleo equivalentes para recursos energéticos fósiles.

$$ADP = \sum m_i \times CF_i$$

Donde:

m_i = cantidad extraída del recurso i (kg).
CF_i = factor de caracterización del recurso i, calculado a partir de las reservas conocidas y la tasa de extracción.

Los demás índices de la Tabla 16, son comúnmente utilizados en inventarios de emisiones, estudios de epidemiología y/o calidad del aire.

Tabla 16. Indicadores obligatorios y complementarios del ACV.

Índice / Indicador	Unidad típica	Categoría de impacto ambiental	Observaciones
Agotamiento de recursos abióticos (ADP)	kg Sb-eq	Agotamiento de recursos minerales	Basado en escasez geológica
Toxicidad humana	CTUh	Toxicidad humana	Unidad tóxica comparativa para seres humanos
Ecotoxicidad	CTUe	Ecotoxicidad acuática/terrestre	Unidad tóxica comparative para ecosistemas
Cambio de uso del suelo	m^2·año	Transformación de ecosistemas originales/ocupación del suelo	Relacionado con biodiversidad
Potencial de Agotamiento de Ozono (ODP)	kg CFC-11-eq	Agotamiento de capa de ozono	Relacionado con emisiones halogenadas
Potencial de Formación de Ozono Fotoquímico (POCP)	kg C_2H_4-eq o kg NMVOC-eq	Smog fotoquímico	Formación de ozono troposférico
Partículas respirables	kg $PM_{2.5}$-eq	Salud humana / calidad del aire	En métodos recientes de LCIA

FUENTE: ISO 14040/14044 Gestión Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida.

Asignaciones

Cuando un proceso genera más de un producto, la ISO 14044:2006 recomienda evitar la asignación cuando sea posible, por ejemplo, mediante subdivisión del proceso o expansión del sistema. Cuando no sea posible, se asignan cargas según una relación física (ej. masa) o económica, previamente definidas en las etapas anteriores, como a continuación se ilustra:

Asignación por masa

$$Factor_i = \frac{Masa_i}{\sum Masa}$$

Ejemplo:

$$Producto\ A\ =\ 700\ kg$$

$$Producto\ B\ =\ 300\ kg$$

$$Emisiones\ totales\ =\ 1{,}000\ kg\ CO_2e$$

$$A = \frac{700}{1{,}000} = 0.70$$

$$B = \frac{300}{1{,}000} = 0.30$$

$$Impacto_A = 1{,}000 \times 0.70 = 700\ kgCO_2e$$

$$Impacto_B = 1{,}000 \times 0.30 = 300\ kgCO_2e$$

Asignación económica

$$Factor_i = \frac{Valor_i}{\sum Valor}$$

Si A vale 80,000 USD y B vale 20,000 USD:

$$A = 80\%$$

$$B = 20\%$$

7. Evaluación de impacto del ciclo de vida

La evaluación de impacto convierte los flujos del inventario en categorías ambientales. Según la ISO 14044:2006, incluye elementos obligatorios como selección de categorías, clasificación y caracterización; y elementos opcionales como normalización, agrupación y ponderación.

Clasificación

Cada emisión se asigna a una categoría, tal como lo muestra la Tabla 17.

Tabla 17. Categoría en función del flujo para la evaluación de impacto de ciclo de vida.

Flujo	Categoría
CO_2, CH_4, N_2O, BC	Cambio climático
SO_2, NOx, NH_3	Acidificación
NOx, fósforo, nitrógeno	Eutrofización
$PM_{2.5}$, PM_{10}	Salud humana
COV, NOx	Ozono troposférico
Metales pesados	Toxicidad

Caracterización

$$Impacto_j = \sum(Carga_i \times Factor_{i,j})$$

Ejemplo cambio climático:

$$CO_2e = CO_2 \times 1 + CH_4 \times GWP_{CH4} + N_2O \times GWP_{N2O}$$

$$1{,}000\ kgCO_2 \times 1 = 1{,}000\ kgCO_2e$$

$$10\ kgCH_4 \times 27.2 = 272\ kgCO_2e$$

$$2\ kgN_2O \times 273 = 546\ kgCO_2e$$

$$Total = 1{,}818\ kgCO_2e$$

8. Normalización, agrupación y ponderación

La normalización de resultados, así como la agrupación y ponderación de impactos, si bien se consideran en las normas ISO como opcionales, es necesario realizarlas pues agrega elementos de análisis que incrementan la comprensión de la circularidad real del producto o servicio bajo evaluación. Cabe destacar que es fundamental que estas tareas se reporten detalladamente con transparencia porque incorporan juicios de valor (véase el ejemplo de la Tabla 18).

Normalización

$$Resultado\ normalizado = \frac{Impacto\ del\ sistema}{Impacto\ de\ referencia}$$

Ejemplo:

$$\frac{1{,}818\ kgCO_2e}{10{,}000\ kgCO_2e/persona/año} = 0.1818$$

Ponderación

$$Puntaje\ total = \sum(Impacto\ normalizado_j \times Peso_j)$$

Tabla 18. Ejemplo de cálculo de normalización y ponderación de resultados.

Categoría	Normalizado	Peso	Resultado
Cambio climático	0.18	0.40	0.072
Acidificación	0.05	0.20	0.010
Eutrofización	0.08	0.20	0.016
Toxicidad	0.03	0.20	0.006

$$Score = 0.072 + 0.010 + 0.016 + 0.006 = 0.104$$

9. Interpretación

La interpretación de los datos obtenidos en lo individual y en conjunto, debe incluir la identificación de resultados significativos mediante el cálculo de la contribución porcentual de cada impacto, la verificación de su consistencia y el análisis de la sensibilidad e incertidumbre de estos (ver Apartado **11. Análisis de sensibilidad** de este Anexo), como mínimo, para poder formular conclusiones coherentes con el objetivo del estudio. Debe responder, entre otras, las preguntas de la Tabla 19.

Contribución porcentual de impactos

$$Contribución_i = \frac{Impacto_i}{Impacto\ total} \times 100$$

Ejemplo:

$$Producción\ =\ 1{,}200\ kg\ CO_2e$$
$$Transporte\ =\ 300\ kg\ CO_2e$$
$$Uso\ =\ 200\ kg\ CO_2e$$
$$Fin\ de\ vida\ =\ 100\ kg\ CO_2e$$
$$Total = 1{,}800\ kgCO_2e$$
$$Producción = \frac{1{,}200}{1{,}800} \times 100 = 66.7\%$$

Tabla 19. Planteamiento de preguntas para la explicación de datos en el cálculo de la Huella Ambiental.

PREGUNTA	PROPÓSITO
¿Qué etapa domina el impacto?	Identificar componentes, procesos o etapas críticos (*hotspots*)
¿Qué flujo explica el resultado?	Entender el orden de magnitud y relevancia de la energía, la movilidad o transporte, las materias primas o transformadas, la contaminación, los residuos, etc.
¿Qué datos son más sensibles?	Priorizar mejora de datos
¿Las conclusiones son robustas?	Evitar decisiones engañosas
¿Hay desplazamiento de impactos?	Evitar *burden shifting*

10. Calidad de datos

La ISO 14044:2006 exige documentar la calidad de los datos según cobertura temporal, geográfica, tecnológica, precisión, representatividad, consistencia, reproducibilidad e incertidumbre.

Se deberá construir una matriz práctica y de fácil lectura que incluya los elementos de la Tabla 20.

11. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es fundamental cuando los ACV se hacen a través de ambientes computacionales como el *SimaPro* o los que se indican en la Tabla 1 de este documento; sirve para probar si una conclusión cambia cuando cambian supuestos o datos clave, igualmente sirve para detectar errores en las ligas de las bases de datos de los inventarios de Ciclo de Vida (ICV) o en la asignación de flujos entre las distintas componentes del sistema.

Tabla 20. Componentes y criterios para asegurar la calidad de los datos.

CRITERIO	PREGUNTA
Temporal	*¿Los datos son recientes?*
Geográfico	*¿Corresponden al país o región?*
Tecnológico	*¿Representan la tecnología real?*
Precisión	*¿Provienen de medición, estimación o literatura?*
Completitud	*¿Incluyen todos los flujos relevantes?*
Consistencia	*¿Se aplicaron los mismos supuestos?*
Incertidumbre	*¿Se cuantificó su variabilidad?*

El análisis de sensibilidad puede realizarse cambiando supuestos o sustituyendo los valores clave por cero y por el valor extremo posible. Por ejemplo, si no se usa energía *¿el valor del impacto permanece igual?* O si la energía total utilizada es renovable *¿las emisiones contaminantes disminuyen?* A continuación, se muestra la fórmula genérica para analizar cambios relativos que son característicos en análisis de impacto y riesgo ambiental y aplicables a la evaluación de la circularidad:

$$Cambio\ relativo = \frac{Resultado_{nuevo} - Resultado_{base}}{Resultado_{base}} \times 100$$

Ejemplo:

Resultado base: $1{,}800\ kgCO_2e$

Resultado aumentando el uso de energías renovables: $1{,}200\ kgCO_2e$

$$\frac{1{,}200 - 1{,}800}{1{,}800} \times 100 = -33.3\%$$

La reducción sería de **33.3%**.

12. Incertidumbre

La incertidumbre puede evaluarse con rangos, escenarios o simulación Monte Carlo.

Ejemplo simple por rango:

$$Impacto = Actividad \times Factor$$

Si asignamos los siguientes valores:

$$Actividad = 100 \pm 10\ litros$$

$$Factor = 2.68 \pm 0.20 kgCO_2/litro$$

El resultado central es: $268\ kgCO_2$

Rango bajo: $90 \times 2.48 = 223.2\ kgCO_2$

Rango alto: $110 \times 2.88 = 316.8\ kgCO_2$

Resultado: $268\ kgCO_2 rango: 223.2 - 316.8\ kgCO_2$

13. Reporte

El reporte debe ser transparente, trazable y suficiente para reproducir el estudio. Debe incluir objetivo, alcance, unidad funcional, límites, fuentes de datos, supuestos, reglas de asignación, método LCIA, resultados, interpretación, limitaciones y conclusiones.

Para estudios comparativos divulgados públicamente, la revisión crítica es especialmente relevante. La revisión crítica verifica que:

- Los métodos sean consistentes con ISO 14040/14044;
- Los datos sean apropiados;
- Las interpretaciones reflejen las limitaciones;
- El reporte sea transparente;
- Las comparaciones públicas sean justificables.

14. Fórmula integrada del ACV

En forma sintética, el cálculo completo puede expresarse así:

$$Impacto\ total = \sum_{etapas} \sum_{flujos} (Actividad_i \times Factor_{emisión,i} \times Factor_{caracterización,i})$$

Y por unidad funcional:

$$Impacto\ por\ unidad\ funcional = \frac{Impacto\ total}{Cantidad\ de\ servicio\ entregado}$$

$$\boldsymbol{Total} = 1{,}850\ kgCO_2e$$

Si la unidad funcional es 10 toneladas:

$$\frac{1{,}850}{10} = 185\ kgCO_2e/t$$

Tabla 21. Ejemplo final de integración de huella de carbono por etapas del ciclo de vida de un producto.

ETAPA	IMPACTO HUELLA DE CARBONO (kg CO_2e)
Materias primas	1,000
Producción	500
Transporte	200
Uso	100
Fin de vida	50

15. Representación de la Huella Ambiental

Es importante, por lo indicado en la LGEC, que la Huella Ambiental se reporte gráficamente, construyendo un diagrama de radar (ejecutable en el software comercial conocido como *Microsoft Excel*) que muestre el **Escenario BAU** *versus* el **Escenario Circular**, a través de los índices e indicadores obligatorios, como se mostró en la Figura 9, misma que se vuelve a reproducir en este Anexo.

Cada índice e indicador posee su propia métrica, pero todos deben expresarse de manera creciente y positiva, para facilitar la comprensión del diagrama. Los índices de circularidad material y funcional, por ejemplo, deben manejarse a la inversa para cumplir este requisito visual.

El diagrama puede ampliarse con indicadores complementarios o con aquellos que sean particularmente relevantes para la evaluación. Asimismo, pueden realizarse múltiples diagramas por etapas del ciclo de vida de un producto, por los niveles de evaluación o por temáticas, de acuerdo con los resultados de modelos tipo *SimaPro*, por ejemplo.

Figura 9. Diagrama de la Huella Ambiental resultante.



Anexo VI. Cálculo del Indicador de Circularidad Material

El **Indicador de Circularidad Material** (por sus siglas en inglés MCI o *Material Circularity Indicator*) desarrollado por la Fundación Ellen MacArthur evalúa la proporción de materiales restaurativos frente a materiales lineales y la utilidad funcional del producto (ver Tabla 2).

Este indicador se construye a partir de tres variables fundamentales: la masa de material virgen utilizada, la masa de residuos no recuperables asociados al producto y un factor de utilidad que refleja cuánto tiempo e intensamente se usa el producto frente a un promedio sectorial, como se indica a continuación:

Variables Básicas

Entradas (*inputs*):

F_v :fracción de material virgen (no reciclado ni reutilizado).

F_r :fracción de material reciclado (post-consumo) o reutilizado.

F_{bio} :fracción de material renovable (biológico sostenible).

Salidas (*outputs*):

C_r :proporción de material que se recicla efectivamente al final de vida.

C_{reuse} :fracción de componentes/productos que se reutilizan.

L: pérdida lineal al final de la vida útil, medida como fracción de material que termina en vertedero/incineración sin recuperación.

Duración de vida útil:

$L_{product}$:vida útil real del producto.

$L_{industry}$:vida útil promedio en la industria.

Pasos de Cálculo

Paso 1. Calcular el **Índice de Flujo Lineal ($\boldsymbol{LFI}$)**, que mide cuánto del producto sigue un modelo lineal:

$$\boldsymbol{LFI} = \frac{F_v + L}{2}$$

Paso 2. Ajustar el resultado considerando la **vida útil relativa**:

$$X = \frac{L_{product}}{L_{industry}}$$

Si un producto dura el doble que la media, su circularidad mejora.

Paso 3. Calcular el $\boldsymbol{MCI}$:

$$\boldsymbol{MCI} = 1 - (LFI\ x\ factor\ de\ corrección\ por\ vida\ útil)$$

La fórmula más completa del manual de EMF incluye correcciones adicionales por **eficiencia del reciclaje, calidad de los materiales y pérdidas en procesos**.

Anexo VII. Cálculo de Huella de Agua

Esta sección aborda la evaluación integral de la Huella de Agua (HA) mediante un enfoque multicriterio basado en el Análisis de Ciclo de Vida, según las normas ISO 14046 e ISO 59020. A diferencia del cálculo puramente volumétrico, este método cuantifica exhaustivamente los impactos ambientales potenciales indirectos y directos de toda la cadena de valor. El análisis examina la degradación de los ecosistemas locales a través de métricas de escasez geográfica y factores de caracterización críticos para la sustentabilidad, como la eutrofización y ecotoxicidad acuática.

El cálculo de la HA tiene un enfoque de impacto y ciclo de vida con base en varios criterios.

1. Objetivo y campo de aplicación

Este enfoque abarca desde la cuna hasta la tumba (o de la cuna a la puerta). Es **multicriterio**, lo que significa que el volumen es solo el dato de partida; el objetivo final es evaluar la degradación de la calidad del ecosistema y la escasez geográfica provocada por toda la cadena de valor (impactos directos + indirectos).

2. Referencias normativas

La definición de HA se basa en las normas que a continuación se enlistan:

- **ISO 14046:2014:** *Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines*.
- **ISO/TR 14073:2016:** *Environmental management — Water footprint — Illustrative examples on how to apply* ISO 14046.

3. Indicadores de la Huella de Agua

Los principales índices e indicadores que se especifican en la normas de referencia se enlistan en la

Tabla **22** y la Tabla 23, destacando que el indicador obligatorio (en color **guinda**) es el de Huella de Agua, medido como m^3 H_2O eq.

Tabla 22. Índice obligatorio e indicadores de la norma ISO 14046 Huella de Agua.

Índice / Indicador	Unidad típica	Categoría de impacto ambiental	Observaciones
Huella de Agua	m^3 H_2O-eq o perfil multicriterio	Impactos ambientales relacionados con agua	Indicador principal de la norma
Perfil de Huella de Agua	conjunto de indicadores	Multicategoría	Representa múltiples impactos hídricos
Escasez hídrica	m^3 H_2O-eq	Escasez hídrica	Evalúa presión sobre disponibilidad
Eutrofización hídrica	kg PO_4^{3-}-eq o kg N-eq	Eutrofización acuática	Impacto por nutrientes
Ecotoxicidad acuática	CTUe	Ecotoxicidad acuática	Impactos sobre ecosistemas
Acidificación hídrica	kg SO_2-eq	Acidificación acuática	Alteración química del agua
Disponibilidad del agua	variable regional (m^3 disponibles)	Recursos hídricos	Suficiencia hídrica para humanos/ecosistemas
Escasez de agua	índice adimensional o m^3 deficitarios	Estrés hídrico	Relación demanda/reabastecimiento
Consumo de agua	m^3	Uso de recursos hídricos	Agua no retornada a la cuenca
Extracción de agua	m^3	Uso de agua	Remoción antropogénica del recurso
Degradación del agua	indicador cualitativo o cuantitativo	Calidad del agua	Cambios negativos en calidad hídrica
Calidad del agua	mg/L, °C, pH, conductividad, etc.	Calidad ambiental hídrica	Aptitud para uso humano/ecosistemas

Tabla 23. Índices e indicadores de la ISO/TR 14073 Huella de Agua – ejemplos de cómo aplicar la ISO 14046.

Índice / Indicador	Unidad típica	Categoría de impacto ambiental	Observaciones
Huella de escasez de agua	adimensional	Escasez hídrica	Índice regional de estrés hídrico
Uso de agua	m^3	Uso consuntivo de agua	Agua no retornada al sistema
Degradación de agua por uso	m^3	Degradación hídrica	Agua afectada en calidad
Volumen crítico de agua	m^3	Calidad/escasez de agua	Volumen crítico para dilución y cumplimiento de normas
Fracción porcentual de pérdida de especies (PDF)	PDF·m^2·año	Biodiversidad/ecotoxicidad	Pérdida potencial de especies
Fracción porcentual de especies afectadas (PAF)	fracción de especies afectadas	Ecotoxicidad	Impacto sobre ecosistemas
Años de Vida perdidos por Discapacidad	DALY*	Salud humana	Carga de enfermedad
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	mg/L o kg O_2	Calidad del agua	Contaminación orgánica
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L o kg O_2	Calidad del agua	Oxidación química de contaminantes
Carbono Orgánico Total (COT)	mg/L	Calidad del agua	Materia orgánica disuelta
Evapotranspiración (ET)	mm o m^3	Balance hídrico	Agricultura y uso del suelo
Unidad comparativa de toxicidad (CTUh / CTUe)	CTU	Toxicidad humana/ecosistemas	Integrado con USEtox
Factor de caracterización (FC)	variable	LCIA	Conversión inventario-impacto

*DALY, *Disability Adjusted Life Years*.

4. Inventario de la Huella de Agua (fase de datos)

Se cuantifican todos los flujos de agua consumidos y contaminados en cada etapa del ciclo de vida (extracción de insumos, transporte, manufactura y uso) usando los indicadores de las normas de referencia:

$$V_{IN_total} = V_{IN_Directo} + \sum_{j}^{n} V_{IN_{Indirecto},j}$$

Donde:

$V_{IN_{Indirecto},j}$ = Volumen de agua utilizado por el proveedor *j* para producir la materia prima o energía consumida en el sistema en foco.

Ejemplos de ecuaciones de caracterización de impactos (evaluación de sostenibilidad)

- **Escasez hídrica ($HA_{Escasez}$)**

  Pondera el volumen consumido según la situación crítica de estrés hídrico de la cuenca específica donde ocurre la extracción (no vale lo mismo consumir 1 m^3 en una zona desértica que en una con abundancia de agua):

$$HA_{Escasez} = \sum_{i}^{n} (V_{Consumo,i} * FC_{AWARE,i})$$

  Donde:

  $HA_{Escasez}$ =Huella de Escasez hídrica

  $V_{Consumo,i}$ =Volumen de agua consumido en la zona geográfica (m^3)

  $FC_{AWARE,i}$ = Factor de caracterización *AWARE* (*Available Water Remaining*) para la zona *i*. Varía en un rango de 0.1 a 100 (expresado en m^3 equivalentes por m^3 consumido)

- **Eutrofización Hídrica ($HA_{Eutrofización}$)**

  Impacto por descarga de nutrientes (nitrógeno, N; y fósforo, P):

$$HA_{Eutrofización} = \sum_{k}^{n} (m_k * FC_{Eutro,k})$$

  Donde:

  m_k = Masa de la sustancia contaminante *k* emitida al agua (kg)

$FC_{Eutro,k}$ = Factor de caracterización de eutrofización (expresado en kg de PO_4^{3-}eq o kg P eq)

- **Ecotoxicidad Acuática (HA_{Ecotox})**

  Impacto de metales pesados o químicos en la vida acuática:

$$HA_{Ecotox} = \sum_{k}^{n} (m_m * FC_{Eutro,k})$$

Donde:

m_m = Masa de la sustancia contaminante *m* emitida al agua (kg)

$FC_{Eutro,k}$ = Factor de expresado en kg de 1,4-diclorobenceno (1,4-DCB) eq.

IV. Referencias

Abdillah, S. F. I., You, S.-J., Wang, J., & Wang, Y.-F. (2026). *Anthropogenic black carbon as short-lived climate pollutants: Critical advancements in global-regional monitoring, characterization, emission inventory, and impact analysis*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 226*, Article 116284. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116284.

Asociación Española de Normalización. (2019). *UNE-EN ISO 14067:2019. Gases de efecto invernadero—Huella de carbono de productos—Requisitos y directrices para la cuantificación (ISO 14067:2018)*. https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0062518.

Comisión Europea. (2021, 30 de diciembre). *Recomendación (UE) 2021/2279 de la Comisión de 15 de diciembre de 2021 sobre el uso de los métodos de la huella ambiental para medir y comunicar el comportamiento ambiental de los productos y las organizaciones a lo largo de su ciclo de vida*. Diario Oficial de la Unión Europea, L471/1

Ellen MacArthur Foundation, 2019. *Circularity Indicators: An approach to measuring circularity - Methodology.* https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/5df196c8314ff61f/original/Circularity-Indicators-Project-Overview.pdf.

Ellen MacArthur Foundation. (2021). *Glosario de economía circular*. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/temas/presentacion-economia-circular/glosario.

Greenhouse Gas Protocol. (2011). *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard: Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard*. World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporing-Standard_041613_2.pdf

International Organization for Standardization. (2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework* (ISO 14040:2006). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines* (ISO 14044:2006). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2006). *Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures* (ISO 14025:2006). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2014). *Environmental management — Life cycle assessment — Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006* (ISO/TS 14071:2014). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2014). Gestión ambiental — Huella de agua — Principios, requisitos y directrices (ISO 14046:2014). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2017). *Environmental management - Water footprint - Illustrative examples on how to apply ISO 14046* (ISO/TR 14073:2017). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2018). *Gases de efecto invernadero — Huella de carbono de productos — Requisitos y directrices para la cuantificación* (ISO 14067:2018). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2024). *Circular economy — Vocabulary, principles and guidance for implementation* (ISO 59004:2024). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2024). *Circular economy — Review of existing value networks* (ISO/TR 59032:2024). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2024). *Circular economy - Product circularity data sheet* (ISO 59040:2024). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2026). *Circular economy — Performance-based approach — Analysis of case studies* (ISO/TR 59031:2026). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2024). *Economía circular — Medición y evaluación del desempeño circular* (ISO 59020:2024). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2024). *Environmental management and circular economy — Sustainability and traceability of the recovery of secondary materials — Principles, requirements and guidance* (ISO 59014:2024). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2024). *Environmental management — Life cycle assessment — Critical review processes and reviewer competencies* (ISO 14071:2024). https://www.iso.org/.

International Organization for Standardization. (2024). *Economía circular — Orientación para la transición de modelos de negocios y redes de valor* (ISO 59010:2024). https://www.iso.org/.

Ley de Aguas Nacionales. (1992, 1 de diciembre). Diario Oficial de la Federación (Última reforma publicada el 11 de mayo de 2022).

Ley General de Cambio Climático. (2012, 6 de junio). *Diario Oficial de la Federación* (Última reforma publicada el 01 de abril de 2024).

Ley General de Economía Circular. (2026, 19 de enero). *Diario Oficial de la Federación.*

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (1988, 28 de enero). *Diario Oficial de la Federación* (Última reforma publicada el 19 de enero de 2026).

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (2003, 8 de octubre). *Diario Oficial de la Federación (Última reforma publicada el 19 de enero de 2026)*.

Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Schaubroeck, T., Wieser, H., de Meester, S., & Dewulf, J. (2019). *Circular economy indicators: What do they measure? Resources, Conservation and Recycling, 146,* 452–461. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045.

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2021). *The OECD inventory of circular economy indicators*. https://static1.squarespace.com/static/6399096d4f946e597b746d34/t/65cea2a167f6325a01f637ac/1708040870562/InventoryCircularEconomyIndicators.pdf.

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). *Monitoring progress towards a resource-efficient and circular economy*. https://doi.org/10.1787/3b644b83-en.

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2025). *Environmental outlook on the triple planetary crisis: Stakes, evolution and policy linkages*. https://doi.org/10.1787/257ffbb6-en.

Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (2010, 13 de abril). *Diario Oficial de la Federación* (Última reforma publicada el 31 de octubre de 2014).

Rigamonti, L. & Mancini, E. (2021). *Life cycle assessment and circularity indicators. The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 1937–1942. https://doi.org/10.1007/s11367-021-01966-2.

Samset, B. H., Lund, M. T., & Aamaas, B. (2023). *Climate effects of Black Carbon emissions: Updated GWP and GTP values after the IPCC AR6*. CICERO Center for International Climate Research.

Secretaría de Economía y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013, 20 de septiembre). Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. *Diario Oficial de la Federación*.

Secretaría de Economía. (2021). *Análisis de ciclo de vida - Huella hídrica - Principios, requisitos y directrices* (Norma Mexicana NMX-AA-184-SCFI-2021). Diario Oficial de la Federación.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1997, 6 de enero). *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales* (Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996). Diario Oficial de la Federación.

Szopa, S., Naik, V., y Prather, M. J. (2026). Perspectives on IPCC assessment of SLCF role in climate. *npj Clean Air*, *2*(1), Artículo 5. https://doi.org/10.1038/s44407-025-00046-1.

United Nations Economic Commission for Europe. (2023). *Guidelines for measuring circular economy. Part A: Conceptual framework, indicators and measurement framework* (ECE/CES/STAT/2023/5). Conference of European Statisticians. https://unece.org/sites/default/files/2024-02/ECECESSTAT20235_WEB.pdf.

United Nations Economic Commission for Europe. (2026). *Guidelines for measuring circular economy. Part B: Practical guide for measuring progress toward a circular economy* (ECE/CES/BUR/2026/FEB/15). Conference of European Statisticians. https://unece.org/sites/default/files/2026-03/15_Measuring_CE_Part_B_0.pdf.

United Nations Environment Programme, y Society of Environmental Toxicology and Chemistry. (2011). *Global guidance principles for life cycle assessment databases: A "Shonan Guidance" publication*. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative.

WRI/WBCSD (2011). Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standards. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.


CPS
COORDINACIÓN POLITÉCNICA
PARA LA SUSTENTABILIDAD