



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE  
HIDALGO**



**FACULTAD DE BIOLOGÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y FACULTAD DE  
INGENIERÍA QUÍMICA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

*“Análisis de ciclo de vida de la asistencia renal artificial en una clínica de atención  
ambulatoria”*

**Alumno:** L.S.P. Marco Tulio Hernández de Anda

**Director:** Dra. Liliana Márquez-Benavides

**Co-director:** Dra. Hilda R. Guerrero García Rojas

Morelia, Michoacán. Septiembre de 2018



## CONTENIDO

TABLAS .....	5
FIGURAS .....	6
ECUACIONES .....	7
ACRÓNIMOS .....	8
INDICADORES Y UNIDADES .....	9
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
1. MARCO TEÓRICO .....	5
1.1 Antecedentes de la evaluación de impacto ambiental .....	5
1.2 Herramientas para la identificación y la evaluación del impacto ambiental .....	6
1.3 Análisis de ciclo de vida .....	7
1.3.1 Marco normativo del análisis de ciclo de vida .....	8
1.3.2 Descripción de las etapas del análisis del ciclo de vida .....	9
1.4 Métodos para la evaluación de impacto del ciclo de vida .....	10
1.4.1 CML .....	11
1.4.2 Eco-indicador .....	11
1.4.3 ILCD .....	11
1.4.4 IMPACT 2002+ .....	12
1.4.5 ReCiPe .....	12
1.5 Potenciales impactos ambientales de la evaluación de impacto de ciclo de vida .....	15
1.5.1 Potencial de cambio climático .....	15
1.5.2 Potencial de agotamiento o destrucción de la capa de ozono .....	15
1.5.3 Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos .....	16
1.5.4 Potencial de radiación ionizante .....	16
1.5.5 Formación de material particulado .....	16
1.5.6 Potencia de toxicidad humana y ecotoxicidad .....	17
1.5.7 Potencia de acidificación .....	17
1.5.8 Potencia de eutrofización .....	17
1.5.9 Potencia de escasez o agotamiento de agua .....	18
1.5.10 Potencial de uso de suelo .....	18
1.5.11 Potencial de agotamiento o escasez de recursos minerales .....	19
1.5.12 Potencial de agotamiento o escasez de recursos fósiles .....	19
1.6 El impacto ambiental de los servicios de salud .....	19
1.6.1 Asistencia renal artificial .....	20
1.6.2 Impacto ambiental de la asistencia renal artificial .....	21



1.7 Costos ambientales de la asistencia renal artificial .....	22
1.7.1 Valoración económica de los impactos ambientales.....	22
1.7.2 Métodos para la valoración económica de los costos ambientales .....	23
1.7.3 Evaluación económica .....	26
1.7.4 Análisis de costo-beneficio .....	26
2. ANTECEDENTES .....	29
2.1 La huella de carbono de los servicios de salud.....	29
2.2 Análisis de ciclo de vida en los servicios de salud.....	29
2.3 Impacto ambiental de la asistencia renal.....	29
3. JUSTIFICACIÓN .....	31
4. PLAN GENERAL DE TRABAJO .....	32
CONCEPTUALIZACIÓN.....	33
Problema de investigación.....	33
Pregunta de investigación.....	33
OBJETIVOS .....	33
Objetivo General .....	33
Objetivos particulares.....	33
HIPÓTESIS .....	33
5. DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA .....	35
5.1 Definición del objetivo y alcance.....	35
5.1.1 Objetivo.....	35
5.1.2 Alcance.....	35
5.2 Análisis del inventario de ciclo de vida.....	41
5.2.1 Transporte de materiales .....	41
5.2.2 Servicio renal .....	42
5.2.3 Fin de vida.....	49
5.3 Evaluación de impacto del ciclo de vida .....	51
5.3.1 Caracterización del impacto ambiental global de la asistencia renal artificial .....	51
5.3.2 contribución de proceso por categoría .....	54
5.4 Interpretación del impacto del ciclo de vida.....	63
5.4.1 Identificación de aspectos significativos sobre el impacto ambiental .....	63
5.4.2 Análisis de influencia .....	65
5.4.3 Análisis de incertidumbre .....	68
5.4.4 Conclusiones del análisis de ciclo de vida .....	75
5.4.5 Limitaciones y recomendaciones del análisis de ciclo de vida.....	76
6. EVALUACIÓN DE COSTOS AMBIENTALES .....	78
6.1 Perfil socioeconómico de la asistencia renal artificial .....	78
6.1.1 Desarrollo del análisis socioeconómico.....	78
6.1.2 Resultados del perfil socioeconómico.....	79



6.1.3 Conclusión del perfil socioeconómico .....	83
6.2 Análisis costo-beneficio de los impactos ambientales de la asistencia renal artificial.....	85
6.2.1 Desarrollo del análisis costo-beneficio .....	85
6.2.2 Resultados del análisis de costos y beneficios económicos.....	90
6.2.3 Resultados del análisis de costos y beneficios ambientales.....	93
6.2.4 Resultados de la relación beneficio costo de la asistencia renal artificial.....	95
6.2.5 Conclusión del análisis costo-beneficio.....	98
7. DISCUSIÓN .....	99
7.1. Limitaciones .....	102
8. CONCLUSIONES .....	104
8.1. Recomendaciones.....	105
9. VALIDACIÓN DE OBJETIVOS.....	106
10. VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS .....	107
11. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES .....	108
BIBLIOGRAFÍA .....	109
Anexo 1. Marco conceptual para el análisis de ciclo de vida .....	115
Anexo 2. Procedimientos y cálculos para el desarrollo del inventario de ciclo de vida.....	116
Anexo 3. Perfil de consumo eléctrico .....	119
Anexo 4. Perfil de consumo de agua en el servicio renal .....	120
Anexo 5. Estudio de caracterización de residuos sólidos municipales .....	121

**TABLAS**

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las herramientas de evaluación de impacto ambiental.....	7
Tabla 2. Categorías de impacto de los métodos de evaluación del ciclo de vida .....	13
Tabla 3. Tipos y fuentes de datos.....	39
Tabla 4. Indicadores de calidad. Matriz de Pedigree .....	40
Tabla 5. Inventario de ciclo de vida. Transporte de materiales .....	42
Tabla 6 Inventario de ciclo de vida. Servicio renal .....	45
Tabla 7. Inventario de ciclo de vida. Fin de vida.....	51
Tabla 8. Caracterización del impacto ambiental de la asistencia renal artificial .....	52
Tabla 9. Principales variables de impacto ambiental del ciclo de vida de la asistencia renal artificial.....	64
Tabla 10. Análisis de influencia de la asistencia renal artificial.....	66
Tabla 11. Escenarios hipotéticos para la mejora del desempeño ambiental de la asistencia renal artificial .....	67
Tabla 12. Análisis de incertidumbre con respecto al inventario de ciclo de vida.....	69
Tabla 13. Comparación de la incertidumbre entre los métodos de evaluación de impacto de ciclo de vida.....	72
Tabla 14. Escenarios de mejora del desempeño ambiental de la asistencia renal artificial.....	88
Tabla 15. Costos y beneficios económicos del escenario 1. Materias primas .....	90
Tabla 16. Costos y beneficios económicos del escenario 2. Energía eléctrica .....	91
Tabla 17. Costos y beneficios económicos del escenario 3. Agua potable.....	92
Tabla 18. Disminución del impacto ambiental por escenario de inversión .....	94
Tabla 19. Análisis costo-beneficio por alternativa de mejora ambiental de la asistencia renal artificial .....	97
Tabla 20. Antecedentes de la huella de carbono de la asistencia renal artificial .....	99

**FIGURAS**

Figura 1. Límites del sistema-producto .....	36
Figura 2. Transporte de materiales.....	36
Figura 3. Servicio renal.....	37
Figura 4. Fin de vida .....	38
Figura 5. Huella ambiental del ciclo de vida de la asistencia renal artificial.....	53
Figura 6. Contribución de proceso para los impactos sobre la salud humana .....	56
Figura 7. Contribución de proceso para los impactos sobre la calidad de los ecosistemas naturales.....	60
Figura 8. Contribución de proceso para los impactos sobre la disponibilidad de recursos .....	62
Figura 9. Análisis de incertidumbre con respecto al método de evaluación de impacto de ciclo de vida.....	71
Figura 11. Comparación del impacto ambiental. Escenario actual vs escenario de mejora ambiental .....	74
Figura 11. Condiciones socio-demográficas. Edad y sexo .....	79
Figura 12. Condiciones socio-demográficas. Educación y ocupación .....	80
Figura 13. Condiciones socio-demográficas. Residencia y condiciones de vivienda.....	81
Figura 14. Situación económica. Ingreso mensual y financiamiento del tratamiento .....	82
Figura 15. Situación económica. Gastos para el tratamiento de la enfermedad renal crónica .....	82
Figura 16. Situación de salud. Seguridad social, régimen y tiempo de tratamiento .....	83
Figura 17. Correlación entre la cantidad de pacientes $\text{mes}^{-1}$ y las variables de estudio .....	86
Figura 18. Impacto ambiental por escenario de costo-beneficio .....	93
Figura 19. Relación beneficio-costos de los escenarios de mejora para la asistencia renal.....	96



## ECUACIONES

Ecuación 1. Método de cálculo de la relación costo-beneficio.....	27
Ecuación 2. Cálculo del valor actual neto.....	28
Ecuación 3. Cálculo de las toneladas-kilómetro.....	41
Ecuación 4. Costos ambientales de a asistencia renal artificial.....	85
Ecuación 5. Cálculo del costo de los materiales.....	86
Ecuación 6. Beneficios económicos de la asistencia renal artificial.....	87
Ecuación 7. Beneficios ambientales de la asistencia renal artificial.....	87



## ACRÓNIMOS

A: Administración

ACB: Análisis costo-beneficio

ACV: Análisis de ciclo de vida

AR: Agua residual

E: Esterilización

EC: *European Comission* (Comisión Europea)

EIA: Evaluación de impacto ambiental

EICV: Evaluación de impacto del ciclo de vida

ERC: Enfermedad Renal Crónica

GRPBI: Gestión de residuos peligrosos biológico Infecciosos

GRSM: Gestión de residuos sólidos municipales

HD: Hemodiálisis

HF: Higienización de filtros

ICV: Inventario de ciclo de vida

ILCD: *International Reference Life Cycle Data-System* (Sistema Internacional de datos de referencia para el ciclo de vida)

IPCC: *Interntional Panel of Climate Change* (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático)

ISO: *International Standar Organization* (Organización Internacional para la Estandarización)

JRC: *Joint Research Centre* (Centro Colectivo de Investigación)

NOM: Norma Oficial Mexicana

PA: Procesamiento de ácidos

ReSa: Relleno sanitario

RPBI: Residuos peligrosos biológico-infecciosos

RSM: Residuos sólidos municipales

SETAC: *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (Sociedad de Toxicología y Química Ambiental)

TA: Tratamiento de agua

TAR: Tratamiento de agua residual

Tkm: toneladas-kilómetro

TM: Transporte de materiales

UF: Unidad funcional





## INDICADORES Y UNIDADES

AA: Agotamiento de agua ( $m^3$ : metros cúbicos)

ACO: Agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq: kilogramos de clorofluorocarbono-11 equivalentes)

ARF: Agotamiento de recursos fósiles (kg oil eq: kilogramos de petróleo equivalentes)

ARM: Agotamiento de recursos minerales (kg Fe eq: kilogramos de hierro equivalentes)

AT: Acidificación terrestre (kg  $SO_2$  eq: kilogramos de dióxido de azufre equivalentes)

CC: Cambio climático (kg  $CO_2$  eq: kilogramos de dióxido de carbono equivalentes)

EAF: Eutrofización en agua fresca (kg P eq: kilogramos de fósforo equivalentes)

EcAF: Ecotoxicidad en agua fresca (kg 1,4-DB eq: kilogramos de 1,4-diclorobenceno equivalentes)

EcM: Ecotoxicidad marina (kg 1,4-DB eq: kilogramos de 1,4-Diclorobenceno equivalentes)

EcT: Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DB eq: kilogramos de 1,4-Diclorobenceno equivalentes)

EM: Eutrofización marina (kg P eq: kilogramos de fósforo equivalentes)

FMP: Formación de material particulado (kg  $PM_{10}$  eq: kilogramos de material particulado <10  $\mu m$  equivalentes)

FOF: Formación de oxidantes fotoquímicos (kg NMVOC: kilogramos de compuestos orgánicos volátiles no-metano)

RI: Radiación ionizante (kBq  $U_{235}$  eq: kilo-becquerel de Uranio 235)

TH: Toxicidad humana (kg 1,4-DB eq: kilogramos de 1,4-diclorobenceno equivalentes)

US: Uso de suelo ( $m^2$ : metros cuadrados)

USA: Uso de suelo agrícola ( $m^2$ : metros cuadrados)

USU: Uso de suelo urbano ( $m^2$ : metros cuadrados)



## RESUMEN

Todas las acciones humanas dejan una huella sobre el medio ambiente y la atención a la salud y específicamente la hemodiálisis (HD) no están exentas de esto. Las consecuencias ambientales de la HD se deben al uso de agua, energía y materiales, así como a los residuos y descargas que genera. El objetivo de este trabajo fue identificar las variables implicadas en el impacto ambiental y económico del ciclo de vida de la HD como modalidad de asistencia renal artificial. Se desarrolló un análisis de ciclo de vida (ACV) con forme a los estándares internacionales ISO 14040 e ISO 14044 para identificar el impacto ambiental y las variables implicadas. Además, se empleó el análisis costo-beneficio (ACB) para identificar las variables económicas que influyen en los impactos ambientales. Con el ACV se identificó que la HD y el tratamiento del agua residual (TAR), fueron las etapas del ciclo de vida que concentraron la mayor proporción del impacto ambiental. Las principales variables ambientales fueron la carboxi-metil-celulosa (*Carboxymethyl cellulose, powder*), de la solución dializadora, y el agua residual (*Waste water untreated*) descargada durante el servicio renal. Con el ACB, se identificaron los beneficios económicos y ambientales de las acciones de mejora propuestas, estimando índices de rentabilidad de 2.8 unidades para la gestión de las materias primas, 2.4 para la procesadora automática de filtros, 1.5 para el nuevo esterilizador y 1.1 para las luminarias LED. Además, con la implementación de estas acciones se disminuiría entre el 5-19% del impacto ambiental. La conjunción entre el ACV y el ACB ha brindado una óptica amplia en cuanto al comportamiento y los costos ambientales de un servicio de salud, generando información pertinente para explorar una perspectiva sustentable y sostenible para la asistencia renal artificial.

**Palabras clave:** hemodiálisis; análisis de ciclo de vida; análisis beneficio-costos.



## ABSTRACT

Human actions leave a footprint on the environment and health care and specifically hemodialysis (HD) are not exempt from this. The environmental consequences of HD due to the use of water, energy and materials, as well as waste and discharges it generates. The aim of this study is to identify the variables involved in the environmental and economic impact of the life cycle of HD as a form of artificial renal care. A life cycle analysis (LCA) was developed in accordance with the international standards ISO 14040 and ISO 14044 to identify the environmental impact and the variables involved. Also, the cost-benefit analysis (CBA) was used to identify the economic variables that influence the environmental impacts. LCA identified that HD and wastewater treatment (WWT) were stages of life cycle that concentrated the largest proportion of environmental impact. The major environmental variables were “*Carboxymethyl cellulose, powder*” of the dialyzer solution, as well as residual water from the renal service. The CBA, the economic and environmental benefits of the proposed improvement actions were identified, estimating profitability ratios of 2.8 units for the management of raw materials, 2.4 for the automatic filter processor, 1.5 for the new sterilizer and 1.1 for the luminaires LED. In addition, the implementation of these actions would represent a decrease of between 5-19% of the environmental impact. The association between the ACV and the CBA has expanded the vision on the environmental and economic behavior of a health service, generating relevant information to explore a sustainable and sustainable perspective for artificial kidney care.

**Keywords:** hemodialysis; life-cycle assessment; cost-benefit analysis.



## INTRODUCCIÓN

La enfermedad renal crónica (ERC) es un síndrome caracterizado por la pérdida progresiva de la función renal, asociada con enfermedades de tipo metabólico y cardiovascular (Méndez-Durán et al. 2014). En México, la ERC es una de las diez primeras causas de muerte y aunque no se cuenta con un registro oficial, se estima una prevalencia de casos de 1,653.5 por cada millón de habitantes (Mercado-Martínez & Correa-Mauricio 2015).

Como alternativa de tratamiento, la hemodiálisis (HD) es una terapia de reemplazo renal de modo artificial que remueve las toxinas y el exceso de líquidos del cuerpo mediante una máquina y un filtro dializador (Tirado-Gómez et al. 2011). Actualmente es la opción más común para el tratamiento de la ERC, con una demanda aproximada de 52,000 pacientes anuales (USRDS 2015), cantidad que se espera siga incrementando con los años (Méndez-Durán et al. 2010; Durán-Arenas et al. 2011). Esto convierte a la asistencia renal en un problema grave de salud pública por la alta prevalencia de enfermedades crónicas; económico por los altos costos del tratamiento y ambiental por los recursos naturales que utiliza y los residuos y descargas que genera (García et al. 2017).

Como problema ambiental, se ha estudiado la huella de carbono de los servicios renales y se estima que la asistencia renal representa de 1.8-10 t de CO<sub>2</sub> eq por paciente-año<sup>-1</sup> en el Reino Unido, China y Australia (Connor et al. 2010; 2011; Lim et al. 2013; Chen et al. 2016b). Si bien es importante conocer el impacto al cambio climático de las actividades sanitarias, es aún más importante considerar un análisis completo de la huella ambiental a través de todo su ciclo de vida. El objetivo de este trabajo es identificar las variables responsables de los mayores impactos ambientales y económicos del ciclo de vida de la asistencia renal artificial mediante la HD.



# CAPÍTULO I.

## ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

- MARCO TEÓRICO
- ANTECEDENTES
- JUSTIFICACIÓN
- CONCEPTUALIZACIÓN



## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Antecedentes de la evaluación de impacto ambiental

Los últimos dos siglos resaltan en la historia del equilibrio ambiental global. El incremento acelerado de la población, los conflictos bélicos internacionales y el desarrollo económico e industrial; son algunas de las causas de que hoy en día la contaminación del suelo, agua y aire representen las preocupaciones ambientales más importantes (Achieng O. 2007).

El término impacto proviene del latín “*impactus = chocar*” y dependiendo del contexto, se le ha otorgado el figurativo de acción fuerte y perjudicial. En conjunción con la palabra ambiental, se le dio un significado de efecto producido en el ambiente y los procesos naturales por la actividad humana en un espacio y tiempo determinados. De este modo el impacto ambiental implica los efectos adversos sobre los ecosistemas, el clima y la sociedad, debido a la extracción excesiva de recursos naturales, la disposición inadecuada de residuos, la emisión de contaminantes y el cambio de uso del suelo, entre otros (Perevochtchikova 2013).

A causa de la complejidad en el concepto de impacto ambiental, la evaluación de impacto ambiental (EIA), es un estudio que sirve para identificar, predecir e interpretar el impacto ambiental, así como para prevenir las consecuencias sobre la salud, la sociedad y el equilibrio ecológico (Perevochtchikova 2013).

El origen de la EIA se encuentra en la década de los 50's. Los primeros estudios se basaron en el análisis de costo-beneficio, posteriormente se incorporó el análisis del costo-eficiencia, y finalmente se desarrolló en el análisis de impacto social y riesgo ambiental para los 70's. Formalmente, la EIA se estableció en 1970 cuando en los EUA se promulgó



la “*National Environmental Policy Act*”. Sin embargo, fue durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en 1992, cuando el mecanismo de la EIA fue aceptado y divulgado ampliamente a nivel mundial, exigiendo su incorporación en las agendas políticas de los países. Para los 20 años siguientes, los 191 países miembros del Consejo de las Naciones Unidas han adoptado la EIA como herramienta indispensable de política pública ambiental (Coria 2008; Perevochtchikova 2013).

## **1.2 Herramientas para la identificación y la evaluación del impacto ambiental**

Dado que el tema de la EIA es un asunto de especial relevancia, actualmente se cuenta con varias herramientas auxiliares en la identificación, valoración y la EIA de productos o proyectos. Principalmente, estas herramientas se apoyan en estudios de impacto ambiental, y sirven como base para la declaración o manifestación de impacto (Coria 2008; Mijangos-Ricardez & López L. 2013; Soriano P. et al. 2015).

Entre las principales herramientas de identificación y EIA se encuentran:

- Matrices de impacto: matriz de Leopold y Batelle-Columbus
- Cartografías
- Checklist-listas de verificación
- Métodos de indicadores: método de Holmes, método de la Universidad de Georgia, método de Hill-Schechter y método de Fisher-Davis.
- Análisis de ciclo de vida

La Tabla 1, presenta un análisis comparativo entre las ventajas y desventajas de las herramientas de valoración identificación y EIA.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las herramientas de evaluación de impacto ambiental

Método	Ventajas	Desventajas
Matrices de impacto	Identifica relación causa-efecto. Permite la valoración ambiental con una escala numérica. Permite la comparación entre proyectos. Apoya la toma de decisiones.	Alto grado de subjetividad en el análisis. No evalúa impactos indirectos. Requiere de amplio entrenamiento sobre los factores ambientales y sus relaciones causales.
Cartografías	Facilita la proyección espacial del impacto ambiental. Analiza el impacto con variables sociodemográficas. Económico.	Alto grado de subjetividad en el análisis. No cuenta con un indicador cuantitativo del impacto ambiental. No analiza impactos ambientales al aire/atmósfera.
Checklist	Permite la valoración ambiental con una escala numérica. Analiza impactos ambientales al agua, suelo, atmósfera, flora, fauna, recursos naturales, entre otros. Económico.	Alto grado de subjetividad en el análisis. Requiere de amplio entrenamiento sobre los factores ambientales y sus relaciones causales.
Análisis de ciclo de vida	Enfoque de EIA desde la cuna hasta la tumba. Expresa el impacto ambiental en categorías de impacto al agua, suelo y aire. Pondera el impacto ambiental en categorías de daño a la salud humana, los ecosistemas y los recursos naturales. Prioridad al enfoque científico. Apoya la toma de decisiones. Promueve la transparencia en la información. Criterios de calidad de los datos. Compatible para productos, procesos o servicios. Método estandarizado por ISO.	Incertidumbre en modelos de caracterización. Requiere de amplio entrenamiento multidisciplinario. Costoso.

Elaboración propia a partir de: (Ayres 1995; ISO 2006b; Coria 2008; Mijangos-Ricardez & López L. 2013; Soriano P. et al. 2015).

Además de estos métodos de EIA, existen otros complementarios como los diagramas de flujos, redes y cuestionarios. Sin embargo, la elección de la herramienta para la EIA depende de los alcances y los objetivos del estudio. Por esta razón, en este trabajo se empleará el enfoque de ACV para la valoración ambiental de la asistencia renal artificial.

### 1.3 Análisis de ciclo de vida

El ACV surge de dos líneas de pensamiento originadas en la crisis energética de los 70's y la preocupación ambiental sobre la disposición de los residuos industriales. Se diseñó originalmente como herramienta de planeación económica, denominándose análisis "input-





*output*” (insumo-producto) y posteriormente se utilizó con fines de EIA, cuando se conoció la relación del efecto invernadero con los gases emitidos por la industria (Ayres 1995; Guevara et al. 1997).

Con el tiempo la popularidad del ACV se incrementó y para finales de los 80’s, ya se contaba con varios estudios de compañías privadas en Suecia, Suiza y EUA. No obstante, los estudios realizados crecían de un marco común, situación que cambió hasta 1997 cuando el método se normalizó por la “*International Organization for Standardization*” (ISO), publicando las primeras normas internacionales (Ruiz 2007). Actualmente la metodología de ACV cuenta con dos principales estándares internacionales bajo la familia de normas ISO-14001, con las normas ISO-14040 y 14044 (ISO 2006a; ISO 2006b) .

### **1.3.1 Marco normativo del análisis de ciclo de vida**

El ACV se deriva de la familia normas internacionales para la gestión ambiental. Este marco normativo incluye las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044.

#### ***1.3.1.1 Norma internacional ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida: principios y marco de referencia***

Esta norma internacional describe los principios y el marco de referencia para el ACV. De acuerdo con esta norma, el ACV se estructura en cuatro etapas principalmente:

1. Definición de objetivo y alcance.
2. Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV).
3. Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV).
4. Interpretación.



### ***1.3.1.2 Norma internacional ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida: requisitos y directrices***

Esta norma internacional especifica los requisitos y directrices metodológicas para el ACV. Describe detalladamente los prerrequisitos de cada etapa del ACV.

## **1.3.2 Descripción de las etapas del análisis del ciclo de vida**

### ***1.3.2.1 Definición del objetivo y alcance***

En esta etapa se establecen los cimientos sobre los cuáles se construirá el ACV. El objetivo del ACV debe declarar el ámbito y las razones del estudio, la audiencia y si se trata de un estudio comparativo. El alcance describe el sistema-producto y sus límites, la unidad funcional, los procedimientos de asignación, criterios de cohorte, suposiciones, los tipos y fuentes de datos y la metodología de EICV, entre otros (ISO 2006a; ISO 2006b).

Para el mejor entendimiento de los conceptos de esta etapa, el Anexo I presenta las definiciones y conceptos principales del ACV.

### ***1.3.2.2 Análisis del inventario del ciclo de vida***

Esta fase consiste en el desarrollo de una base de datos que se compone por todos los flujos de entrada y salida de materia y energía en el sistema-producto. Los datos que componen el ICV deben ser referidos a la unidad funcional determinada y deben cumplir con los requisitos de calidad. Además, los tipos, fuentes, cálculos y métodos de obtención de los datos deberán describirse detalladamente (ISO 2006a; ISO 2006b).

### ***1.3.2.3 Evaluación de impacto del ciclo de vida***

En esta fase se examinan las implicaciones ambientales del sistema-producto, y puede ser realizada en dos niveles dependiendo del objetivo y alcance del estudio.



El primer nivel de EICV involucra a los elementos obligatorios:

- Clasificación: se refiere a la asignación de los resultados del ICV a categorías de impacto de punto medio y/o punto final.
- Caracterización: traduce los resultados del ICV a impactos ambientales de punto medio y punto final empleando los modelos de caracterización de los métodos de EICV.

El segundo nivel consta de la utilización de elementos opcionales: normalización, agrupación y ponderación, los cuales permiten transformar el impacto ambiental en una puntuación única, cuyo objetivo es brindar información sobre la magnitud del impacto ambiental. Adicionalmente, en este nivel involucra el empleo de los análisis de la calidad de los datos tales como: análisis de incertidumbre y sensibilidad (ISO 2006a; ISO 2006b).

#### ***1.3.2.4 Interpretación del impacto del ciclo de vida***

En esta etapa se combina la información obtenida en las fases anteriores para identificar las variables significativas, las etapas y procesos unitarios con mayores impactos ambientales, así como los asuntos potencialmente modificables para disminuir el impacto. Los resultados de esta interpretación pueden adquirir la forma de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones. Es recomendable emplear análisis de calidad de los datos para conocer la influencia de las suposiciones más importantes sobre los resultados, pudiendo generar conclusiones más robustas (ISO 2006a; ISO 2006b).

#### **1.4 Métodos para la evaluación de impacto del ciclo de vida**

Durante años los comités científicos del ACV han desarrollado varios métodos y modelos de caracterización. A continuación se describirán algunos de los principales métodos para la EICV.



### 1.4.1 CML

Fue el primer método de EICV, se creó en 1992 por el “*Centre of Environmental Science at Leiden University*” (Centro de Ciencia Ambiental de la Universidad de Leiden) en los Países Bajos. Este método se divide en dos “*CML baseline*” y “*CML non-baseline*” y cada uno cuenta con modelos de caracterización y normalización exclusivamente para el punto medio (Rodríguez & Citroth 2016). La versión 3.04 de “*CML baseline*” analiza 11 categorías de impacto y un total de 3,944 sustancias y factores de caracterización. La misma versión de “*CML non-baseline*” evalúa 45 categorías de impacto para un total de 22,625 sustancias y factores de caracterización.

### 1.4.2 Eco-indicador

Se considera como el primer método de EICV que integró el análisis de impacto de punto final, lo que permite la expresión del impacto ambiental en daños a la salud humana, los ecosistemas y los recursos naturales. Cuenta con dos versiones: *Eco-indicador 95* y *Eco-indicador 99*, este último es la versión más actual y utilizada para este método. *Eco-indicador 99* permite la comparación entre productos, ofreciendo una única unidad –*point o millipoint*- versión 2.06 cuenta con 11 categorías de impacto y un total de 479 factores de caracterización. “*Eco-indicador 99*” cuenta con 11 categorías de impacto para el punto medio y tres para el punto final, contando con 867 factores de caracterización.

### 1.4.3 ILCD

“*International Reference Life Cycle Data System*” (Sistema internacional de datos de referencia de ciclo de vida) –ILCD- es el resultado de un proyecto llevado a cabo por el “*Joint Research Centre*” (JRC) de la Comisión Europea. El consenso analizó varias



metodologías de EICV para llegar a un método recomendado para cada tema ambiental tanto en el punto medio como en el punto final (EC-JRC 2011; Rodríguez & Citroth 2016). La versión 1.03 de “ILCD” integra a su evaluación 16 categorías de impacto para el punto medio y un total de 25,636 sustancias y factores de caracterización.

#### **1.4.4 IMPACT 2002+**

*IMPACT 2002+* propone una implementación de un enfoque combinado de punto medio y punto final, vinculando todos los tipos de resultados de ICV a través de 14 categorías de punto medio y cuatro categorías de daño. Conjunta dos metodologías anteriores: CML 2002 para el punto medio y Eco-indicador 99 para el punto final (Jolliet et al. 2003). La versión 2.14 de *IMPACT 2002+* analiza 15 categorías de punto medio y cuatro categorías de impacto para el punto final, con un total de 11,751 factores de caracterización.

#### **1.4.5 ReCiPe**

*ReCiPe* es el método más completo y más empleado para la EICV de productos y sistemas en el mundo. Integra a las metodologías CML para el punto medio y *Eco-indicador 99* para el punto final. Surge como un consenso especial de la conferencia de la “*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*” (SETAC) en el año 2000, cuando los expertos en ACV vieron la necesidad de contar con un marco común para utilizar los indicadores de punto medio y de punto final (Goedkoop et al. 2013). “*ReCiPe Midpoint*” versión 1.13 analiza 18 categorías de impacto y cuenta con 79,371 factores de caracterización. En cambio “*ReCiPe 2016 Midpoint*” versión 1.00 analiza 17 categorías de impacto del punto medio y cuenta con 49,606 factores de caracterización. La Tabla 2 muestra las categorías de impacto, y las unidades de referencia para cada uno de los impactos ambientales analizados en los métodos de EICV descritos.



Tabla 2. Categorías de impacto de los métodos de evaluación del ciclo de vida

CML-IA baseline V3.04		CML-IA non-baseline V3.04		Eco-indicador 95 V2.06		Eco-indicador 99 (H) V2.10	
Categoría	Indicador	Categoría	Indicador	Categoría	Indicador	Categoría	Indicador
CG	kg CO <sub>2</sub> eq	CG	kg CO <sub>2</sub> eq	GEI	kg CO <sub>2</sub>		DALY
ACO	kg CFC-11 eq	ACO	kg CFC-11 eq	ACO	kg CFC-11	Resp. org.	DALY
OF	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	OF	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	A	kg SO <sub>2</sub>		DALY
TH	kg 1,4-DB eq	TH	kg 1,4-DB eq	E	kg PO <sub>4</sub>	CC	DALY
A	kg SO <sub>2</sub> eq	RI	DALY's	MP	kg Pb	Rad.	DALY
EcT	kg 1,4-DB eq	A	kg SO <sub>2</sub> eq	Car.	kg B(a)P	ACO	DALY
EcM	kg 1,4-DB eq	EcT	kg 1,4-DB eq	Pest.	kg act. subst.	Ec	PAF <sup>m2 año</sup>
EcAF	kg 1,4-DB eq	EcM	kg 1,4-DB eq	SV	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	A/E	PDF <sup>m2 año</sup>
E	kg PO <sub>4</sub> eq	EcAF	kg 1,4-DB eq	SI	kg SPM	US	PDF <sup>m2 año</sup>
ARA (cf)	MJ	E	kg PO <sub>4</sub> eq	RE	MJ	ARF	MJ exc
ARA	kg Sb eq	ARA	kg Sb eq	RS	kg	ARM	MJ exc
		AM	m <sup>3</sup> aire				

Elaboración propia a partir del Software SimaPro versión 8.5.0.0 PhD



Tabla 2. Categorías de impacto de los métodos de evaluación del ciclo de vida (Continuación)

ILCD 2011 Midpoint+ V1.10		IMPACT 2002+ V2.14		ReCiPe 2016 (H) V1.00		ReCiPe 2013 (H) V1.13	
Categoría	Indicador	Categoría	Indicador	Categoría	Indicador	Categoría	Indicador
CC	kg CO <sub>2</sub> eq	Car.	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	CG	kg CO <sub>2</sub> eq	CC	kg CO <sub>2</sub> eq
ACO	kg CFC-11 eq	No-car.	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	AOE	kg CFC-11 eq	ACO	kg CFC-11 eq
TH nec	CTUh	Resp. inorg.	kg PM <sub>2.5</sub> eq	RI	kBq Co-60 eq	AT	kg SO <sub>2</sub> eq
TH ec	CTUh	RI	Bq C-14 eq	FO HH	kg NO <sub>x</sub> eq	EAF	kg P eq
FMP	kg PM <sub>2.5</sub> eq	ACO	kg CFC-11 eq	FMP	kg PM <sub>2.5</sub> eq	EM	kg N eq
RI HH	kBq U <sub>235</sub> eq	Resp. org.	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	FO ET	kg NO <sub>x</sub> eq	TH	kg 1,4-DB eq
RI E(int)	CTUe	EcA	kg TEG water	AT	kg SO <sub>2</sub> eq	FOF	kg NMVOC e
FOF	kg NMVOC	EcT	kg TEG soil	EAF	kg P eq	FMP	kg PM <sub>10</sub> eq
A	molc H <sup>+</sup> eq	A/N T	m <sup>2</sup> org. arable	EcT	kg 1,4-DCB eq	EcT	kg 1,4-DB eq
ET	Molc N eq	AAc	kg SO <sub>2</sub> eq	EcAF	kg 1,4-DCB eq	EcAF	kg 1,4-DB eq
EAF	kg P eq	EAc	kg PO <sub>4</sub> P-lim	EcM	kg 1,4-DCB eq	EcM	kg 1,4-DB eq
EM	kg N eq	CG	kg CO <sub>2</sub> eq	TH car.	kg 1,4-DCB eq	RI	kBq U <sub>235</sub> eq
EcAF	CTUe	E nr	MJ primary	TH ncar.	kg 1,4-DCB eq	USA	m <sup>2</sup>
US	kg C deficit	ExM	MJ exc.	US	m <sup>2</sup> crop eq	USU	m <sup>2</sup>
ARAg	m <sup>3</sup> agua eq			ERM	kg Cu eq	TSN	m <sup>2</sup>
ARM	kg Sb eq			ERF	kg oil eq	AA	m <sup>3</sup>
				CA	m <sup>3</sup>	ARM	kg Fe eq
						ARF	kg oil eq



## **1.5 Potenciales impactos ambientales de la evaluación de impacto de ciclo de vida**

### **1.5.1 Potencial de cambio climático**

El cambio climático (CC) es un cambio en la distribución de los patrones meteorológicos durante un periodo de tiempo determinado. Es causado por el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), generados por factores naturales y antropogénicos (Sirotiuk & Viglizzo, 2013). El ACV permite estimar la contribución al cambio climático relacionada con el ciclo de vida de un proceso o servicio, mediante la estimación del potencial de calentamiento global del “*Intergovernmental Panel of Climate Change*” (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático) (IPCC 2007).

Según la metodología de EICV, el indicador utilizado en el punto medio son los kg de CO<sub>2</sub> eq (kilogramos de Dióxido de Carbono equivalentes) (Tabla 2). Por otra parte, el indicador de punto final son los “*Disability Adjusted Life Years*” (Años de vida ajustados/perdidos por discapacidad) -*DALY's*- (Goedkoop et al. 2013).

### **1.5.2 Potencial de agotamiento o destrucción de la capa de ozono**

El agotamiento y/o destrucción de la capa de ozono (ACO), ocurre por acción de sustancias persistentes en la atmósfera como los gases halogenados. Estas sustancias son compuestos químicos recalcitrantes que contienen átomos de cloro (Cl), bromo (Br), flúor (F), entre otros, y debido a su persistencia atmosférica degradan el ozono (O<sub>3</sub>).

La EICV determina el potencial de destrucción de la capa de O<sub>3</sub>, que se relaciona con las emisiones a la atmósfera derivadas de la producción o transformación de un proceso o producto. Dependiendo del método de EICV el indicador de punto medio puede variar





(Tabla 2). El indicador de punto final son los *DALY's* o los *Species year<sup>-1</sup>*, que se refiere al número de especies entre flora y fauna en peligro de extinción (Goedkoop et al. 2013).

### **1.5.3 Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos**

La formación de oxidantes fotoquímicos (FOF) depende de la presencia en la tropósfera de compuestos orgánicos volátiles (COV) y monóxido de carbono (CO). Estas sustancias al exponerse a la radiación solar dan lugar a reacciones entre los compuestos fotoquímicos oxidantes y los radicales hidroxilo (OH), con presencia de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), cuyo resultado es la formación de O<sub>3</sub> troposférico. Las unidades en las que se expresa el impacto en el punto medio, varían dependiendo el método de EICV (Tabla 2). El punto final se expresa en *DALY's* (Goedkoop et al. 2013).

### **1.5.4 Potencial de radiación ionizante**

LA radiación ionizante (RI) describe los daños a la salud humana relacionados con las liberaciones rutinarias de material radiactivo al medio ambiente. El indicador de categoría para el punto medio varía dependiendo el método (Tabla 2) y para el punto final, las unidades con las que se expresa el daño de la RI son los *DALY's* (Goedkoop et al. 2013).

### **1.5.5 Formación de material particulado**

La formación de material particulado (FMP) es una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas con diámetro menor a 10 *um*. Son partículas que se forman en el aire a partir de emisiones de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), y NO<sub>x</sub>. El indicador de categoría para el punto medio varía dependiendo el método de EICV (Tabla 2) y para el punto final, el daño es expresado en *DALY's* (Goedkoop et al. 2013).



### 1.5.6 Potencia de toxicidad humana y ecotoxicidad

El factor de caracterización de la toxicidad humana y la ecotoxicidad (Ec), explican la persistencia, acumulación y toxicidad en la cadena alimentaria de un producto químico. Las principales sustancias evaluadas para el potencial de Ec son los metales pesados. La toxicidad puede presentarse en distintas categorías dependiendo hacia que compartimento se dirija la emisión tóxica, de esta manera se tienen tres categorías de toxicidad:

- Ecotoxicidad en agua fresca (EcAF)
- Ecotoxicidad marina (EcM)
- Toxicidad humana (TH)

El indicador para el punto medio varía dependiendo el método de EICV (Tabla 2). Para el punto final la TH se expresa en *DALY's* y la Ec *Species year<sup>-1</sup>* (Goedkoop et al. 2013).

### 1.5.7 Potencia de acidificación

La acidificación es la emisión atmosférica de sustancias inorgánicas como los SO<sub>x</sub>, y NO<sub>x</sub>, ocasionan un cambio en la acidez en el suelo y el agua debido a la precipitación o lluvia ácida. Para esta categoría se pueden tener de una a dos variantes: acidificación terrestre (AT) y/o acidificación acuática. El indicador de categoría para el punto medio varía dependiendo el método de EICV (Tabla 2) y para el punto final, el daño es expresado en *Species year<sup>-1</sup>* (Goedkoop et al. 2013).

### 1.5.8 Potencia de eutrofización

La eutrofización es la incorporación o el incremento de nutrientes en un medio acuático, lo que promueve la proliferación de algas y la disminución del oxígeno (O) disuelto en el agua, causando la muerte de los organismos que habitan en estos ambientes. Dependiendo



del método existen de una a dos modalidades de eutrofización: eutrofización marina (EM) y eutrofización en agua fresca (EAF). El indicador de categoría para el punto medio varía dependiendo el método de EICV (Tabla 2) y para el punto final, el daño es expresado en *Species year<sup>-1</sup>* (Goedkoop et al. 2013).

### **1.5.9 Potencia de escasez o agotamiento de agua**

El potencial de agotamiento de agua (AA) determina la cantidad de agua que demanda la producción y el procesamiento de cualquier producto o proceso, lo que trae consigo daños significativos a los ecosistemas y la salud humana. El indicador de categoría para el punto medio varía dependiendo el método de EICV (Tabla 2) y para el punto final, el daño es expresado en *Species year<sup>-1</sup>* (Goedkoop et al. 2013).

### **1.5.10 Potencial de uso de suelo**

La categoría de impacto de sobre el uso de suelo, refleja el daño a los ecosistemas debido a los efectos de la ocupación y la transformación del uso de la tierra. Aunque existen vínculos entre la forma en que se utiliza la tierra y la pérdida de biodiversidad, esta categoría se concentra principalmente en los siguientes mecanismos:

- Uso de suelo urbano (USU)
- Uso de suelo agrícola (USA)
- Transformación de suelo natural (TSN)

La ocupación de terreno tiene impacto sobre la diversidad de especies. Dicha diversidad depende del tipo de uso del terreno y del tamaño del área local. Los daños como resultado de la conversión de la tierra o de su ocupación están basados en observaciones y se expresan como fracción de terreno potencialmente desaparecida. El indicador de categoría



para el punto medio varía dependiendo el método de EICV (Tabla 2) y para el punto final, el daño es expresado en *Species year<sup>-1</sup>* (Goedkoop et al. 2013).

#### **1.5.11 Potencial de agotamiento o escasez de recursos minerales**

El agotamiento de recursos minerales (ARM), se relacionan los efectos ambientales con la energía necesaria adicional para extraer cada kilogramo de mineral, así como los impactos asociados a la explotación minera, como Ec, FOF, emisiones de GEI, entre otros. El indicador de categoría para el punto medio varía dependiendo el método de EICV (Tabla 2) y para el punto final, el daño es expresado en *Species year<sup>-1</sup>* (Goedkoop et al. 2013).

#### **1.5.12 Potencial de agotamiento o escasez de recursos fósiles**

El término combustible fósil se refiere a un grupo de recursos que contienen hidrocarburos. El grupo va desde materiales volátiles como el metano (CH<sub>4</sub>), la gasolina líquida y materiales no volátiles como el carbón. En esta categoría de impacto, se van a relacionar los efectos ambientales de la extracción de recursos fósiles (ARF), así como los relacionados con la energía empleada durante dicho proceso. El indicador de categoría para el punto medio varía dependiendo el método de EICV (Tabla 2) y para el punto final, el daño es expresado en *Species year<sup>-1</sup>* (Goedkoop et al. 2013).

### **1.6 El impacto ambiental de los servicios de salud**

La asistencia a la salud contribuye al daño ambiental a través del consumo de recursos naturales, y la contaminación del aire, agua y suelo (SSD, 2011). Al respecto, la investigación se ha enfocado en los temas asociados a la gestión de residuos hospitalarios (Giusti 2009; Fikri et al. 2015), la eficiencia energética en los hospitales (Teke 2014) y el impacto al CC atribuido a los servicios médicos (Chung & Meltzer 2009).



Existe un creciente cuerpo de investigación sobre la huella de carbono en la atención a la salud. Por ejemplo, el “*bypass*” gástrico emite una t de CO<sub>2</sub> eq por paciente (Gatenby 2011); la cirugía de cataratas emite 37 kg de CO<sub>2</sub> eq por (Somner et al. 2009); la cirugía laparoscópica emite 0.2 kg de CO<sub>2</sub> eq (Gilliam et al. 2008a) y la asistencia renal emite entre 1.8 y 10 t de CO<sub>2</sub> eq (Connor et al. 2010; Lim et al. 2013; Chen, et al. 2016). Si bien es importante conocer el impacto al CC, ampliar el alcance de las repercusiones ambientales para incluir otros efectos ambientales negativos, creará una comprensión ambiental más completa en la industria de la salud. Por lo tanto, el sector salud puede desempeñar un papel fundamental en la mitigación de su huella ambiental (Campion et al. 2012). Para ello, es necesario que las instituciones sanitarias entiendan mejor el comportamiento ambiental de sus servicios, y más aún sobre las terapias que requieren grandes cantidades de insumos, energía y agua como lo es la asistencia renal artificial (Chen et al. 2016).

### **1.6.1 Asistencia renal artificial**

La enfermedad renal crónica (ERC) es una de las principales consecuencias de las enfermedades crónico-degenerativas como la Diabetes Mellitus y la Hipertensión Arterial. Inicia con la pérdida de función de algunas nefronas y avanza paulatinamente hasta que el riñón es incapaz de mantener la vida del paciente (Ávila-Palomares et al. 2010).

Como alternativa de tratamiento se tienen dos modalidades:

- Diálisis peritoneal (DP): consiste en la filtración de la sangre del paciente empleando la membrana peritoneal. Actualmente, es la terapia de reemplazo renal más común para el tratamiento de la ERC en México, sin embargo es una alternativa limitada en cuanto a recursos humanos e infraestructura, y representa un riesgo potencial de infecciones y complicaciones.



- Hemodiálisis (HD): consiste en bombear sangre y líquido de diálisis a través de un circuito extracorpóreo, que depura la sangre del paciente por medio de un filtro que cuenta con una membrana semipermeable.

La HD a diferencia de la DP, es una terapia de reemplazo que ofrece menores probabilidades de infección y complicaciones, se cuenta con mejor tecnología para las máquinas dializadoras, así como avances en la investigación para la mejora en la técnica, por lo que se considera como la mejor opción para el tratamiento de la ERC (Treviño-Becerra 2004; Malaquias 2010; Durán-Arenas et al. 2011).

### **1.6.2 Impacto ambiental de la asistencia renal artificial**

La asistencia a la salud, como cualquier actividad humana deja una huella sobre el medio ambiente. La nefrología, y concretamente la asistencia renal artificial tampoco escapan a ello, sus implicaciones ambientales se deben a la generación de residuos peligrosos, residuos sólidos y el consumo de recursos naturales.

Se estima que por HD se generan entre 1 y 2.5 kg de RSU, entre 200-500 L de agua residual (AR) y se consumen de 6-10 kWh de electricidad (García V. et al. 2015; Piccoli et al. 2015). Asimismo, la asistencia renal por paciente al año, representa entre 2-10 t de CO<sub>2</sub>eq en países como el Reino Unido, Australia y China (Connor et al. 2010; 2011; Lim et al. 2013; Chen et al. 2016a). Sin embargo, se desconocen en mayor medida los impactos sobre la atmósfera, el suelo y el agua, así como las implicaciones ambientales asociadas a la extracción de materias primas, el transporte, la manufactura de los materiales, y las derivadas de la asistencia renal artificial en México y el mundo.



## **1.7 Costos ambientales de la asistencia renal artificial**

Un aspecto relevante que ha sido olvidado en la planeación económica de los servicios de salud, son los aspectos ambientales. Si bien se ha estudiado el impacto ambiental del sector salud (Chung & Meltzer 2009; Duane et al. 2012; Malik et al. 2018), la investigación es escasa con respecto a los costos ambientales de los servicios de salud como la asistencia renal artificial.

Para la evaluación de costos ambientales, actualmente se emplea el enfoque “*input-output*” que trata de la transformación de los costos de producción de los materiales a emisiones de CO<sub>2</sub> eq (Christ 1955). Algunos trabajos han empleado este enfoque y modelado la huella de carbono del tratamiento del reflujo gastroesofágico (Gatenby 2011), la atención dental (Duane et al. 2012), oftalmológica (Somner et al. 2009), laparoscopia (Gilliam et al. 2008b), nefrología (Connor et al. 2010) entre otros. No obstante, estos estudios se han limitado en analizar los costos ambientales en un contexto de ciclo de vida.

Las limitaciones para el análisis de costos ambientales en los servicios de salud, puede atribuida a las dificultades conceptuales y metodológicas. Al respecto, existe una amplia variedad de métodos para la valoración económica ambiental, que bien pudieran ser una herramienta para la estimación de los costos ambientales derivados de las actividades de atención a la salud. Sin embargo, al mejor conocimiento del autor ninguno de estos métodos ha sido empleado para la valoración económica ambiental de un servicio renal.

### **1.7.1 Valoración económica de los impactos ambientales.**

La importancia de la valoración económica es que permite tener un indicador monetario que posibilite determinar el valor de una alteración desfavorable en el medio natural,



provocada por una acción o actividad económica (Múner O. & Correa R. 2004; Guerrero García Rojas, et al., 2013).

Es sabido que los recursos naturales son importantes, pero tal vez esto no basta para garantizar su uso racional, lo cual se debe a que estos bienes carecen de un mercado donde intercambiarse y, en consecuencia, se desconoce su precio. La ausencia de la valoración de estos recursos puede llevar a la sobre explotación o al uso inadecuado y, por tanto, a que dejen de generar los flujos de beneficios necesarios para mantener el bienestar social. Es necesario contar con métodos de valoración económica que permitan estimar un valor del impacto ambiental de las actividades productivas y de consumo (Azqueta O. 1998; Garc & Vaca-boh 2015). La información que se deriva de la implementación de estos métodos puede ser utilizada con gran utilidad en los siguientes aspectos:

- En el análisis costo beneficio para fundamentar de las decisiones y políticas públicas sobre el uso de recursos naturales.
- En la generación de información para conocer con rigor el valor del patrimonio natural.
- Calcular las indemnizaciones que se han de pagar por los daños causados al ambiente.
- Aprovechar el potencial económico de los recursos naturales desde una base sustentable.

## **1.7.2 Métodos para la valoración económica de los costos ambientales**

### ***1.7.2.1 Método de gasto en mitigación***

El gasto en mitigación es un método que se basa en el comportamiento que desarrollan las personas para prevenir o mitigar los impactos ambientales negativos a los que son





expuestos. Este método intenta cuantificar la disposición a gastar para evitar la molestia ocasionada por la alteración del factor ambiental.

#### ***1.7.2.2 Método de costo de reposición***

El método de costo de reposición considera lo que se gasta en restaurar y en devolver a su estado original el sistema ambiental que ha sido alterado, como una aproximación del valor que se le otorga a ese bien ambiental. Cuando la reposición se ha realizado se considera que un atributo ambiental vale, al menos, lo que costó reponerlo a su situación original.

La aplicación de este método, requiere de la existencia de efectos físicos que sean evidentes y que tengan la posibilidad de restaurarse. En la medida en que esta condición no se pueda dar, la valoración del impacto o atributo ambiental estará más alejada de la realidad.

#### ***1.7.2.3 Método de estimación en el cambio en productividad***

Este método busca estimar económicamente el impacto ambiental sobre un recurso natural a través de la valoración del efecto que este impacto genera en la producción, en el costo o en las ganancias generadas por otro bien que sí tiene mercado. Este efecto en la producción de otro bien o servicio implica un cambio en el bienestar de las personas. A través de la valoración de ese cambio en bienestar se obtiene una aproximación del valor de ese impacto ambiental.

#### ***1.7.2.4 Método de costo de viaje***

El método de costo de viaje se aplica a la valoración de áreas naturales que cumplen una función de recreación. Aunque en general el disfrute de parques naturales es gratuito, el visitante incurre en unos gastos para poder disfrutar de ellos, los cuales se conocen como los costos de viaje. Se trata, por tanto, de intentar estimar cómo varía la demanda del bien



ante cambios en el costo de disfrutarlo. Con ello se tiene estimada la curva de demanda del bien, y se podrían analizar los cambios en el excedente del consumidor que produciría una modificación en las condiciones del bien ambiental.

La demanda de los servicios de un determinado entorno se podría expresar a través de un número de visitas al sitio a lo largo del año. Pero no es lo mismo pasar una tarde en el sitio, o una semana, o un fin de semana, ya que todas quedarían registradas como una visita. En la práctica, lo que se sugiere es estimar distintas funciones de demanda para los visitantes en el día, los de fin de semana y los de una semana o más.

#### ***1.7.2.5 Método de costos evitados***

El método de costos evitados proporciona la estimación de un valor para los recursos naturales basándose en los costos en que incurren las personas para evitar los posibles daños causados por la pérdida de los servicios que prestan dichos recursos. Este método utiliza el valor del gasto en protección, el costo de las acciones tomadas para evitar daños ambientales o el costo de bienes que generaría en la sociedad la pérdida de los servicios que prestan los recursos como una aproximación a la valoración que da la sociedad a los flujos de servicios proporcionados por los ecosistemas. Por ejemplo, si un bosque tiene la característica de proteger contra inundaciones a una población, el valor económico de este bosque se puede estimar por los costos que se evita la población al no ocurrir una inundación (Gerrero García Rojas & Gómez S., 2013)

Este método es muy utilizado cuando las instituciones no cuentan con un presupuesto grande disponible para un estudio de valoración y están interesadas en valorar un recurso natural que preste un servicio a la sociedad o los servicios de los ecosistemas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este método no proporciona una medida correcta del



valor económico total. No obstante, es de gran utilidad debido a que generalmente es más fácil de estimar que la disposición a pagar por la sociedad (Múner O. & Correa R. 2004).

### **1.7.3 Evaluación económica**

La evaluación económica es el análisis cuantitativo de los costos y resultados de una inversión en proyectos y programas alternativos. Su finalidad es identificar la manera de mejorar la utilización de los recursos, a través de la estimación y comparación de costos y consecuencias de las opciones existentes para la consecución del objetivo de un proyecto, además del análisis del costo de no emprender alguna acción frente al problema planteado.

Los principales métodos de evaluación económica son el análisis de costo-beneficio (ACB) y el análisis de costo-efectividad (ACE). El primero responde a la pregunta: ¿Cuál de las alternativas planteadas “X” o “Y” ofrece un mayor beneficio neto? Mientras que el segundo responde a la pregunta ¿Cuál de las opciones entre “X” o “Y” alcanza el mismo objetivo por el menor costo? En este reporte, será descrito mayormente el ACB debido a que el alcance del estudio incluye un ACB de los costos ambientales.

### **1.7.4 Análisis de costo-beneficio**

El ACB evalúa las consecuencias o resultados de las intervenciones en términos monetarios, el objetivo es determinar si los beneficios obtenidos de un tratamiento o programa justifican sus costos (Gutiérrez Z. et al. 1994). Requieren que las consecuencias de la intervención a evaluar sean expresadas en términos monetarios, lo que permite al analista hacer comparaciones directas entre distintas alternativas por medio de la ganancia monetaria neta o razón de costo-beneficio (Zárate 2010).



Un ACB es un estudio del retorno, no sólo financiero de una inversión, sino también de aspectos sociales y medioambientales de un proyecto, producto o servicio (González M. 2001). El ACB es imprescindible para la toma de decisiones de cualquier tipo pues determina la viabilidad de un proyecto. Durante su planificación se evalúan los costos y los beneficios derivados directa o indirectamente del mismo y partir de ello se decide si el proyecto es viable o no (Loza et al. 2011).

#### **1.7.4.1 Método**

La relación costo-beneficio (B/C) o índice neto de rentabilidad, es el cociente que se obtiene al dividir el valor actual total de los ingresos o beneficios netos (VAN), entre el valor actual de los costos de inversión o costos totales (VAC) de un proyecto (Ecuación 1) (du Preez & Lottering 2009).

Ecuación 1. Método de cálculo de la relación costo-beneficio

$$B/C = \frac{VAN}{VAC}$$

*Donde:*

*B/C: Relación beneficio-costo*

*VAN: Valor actual neto (ingresos o beneficios)*

*VAC: Valor actual de los costos*

Según el análisis de costo-beneficio, un proyecto será rentable cuando la relación B/C es mayor que uno. Para realizar el análisis, conviene tener en cuentas los siguientes pasos:

1. Identificación de los costos relacionados con el proyecto a precio de mercado.
2. Determinación de los beneficios económicos y/o sociales.
3. Determinación de la tasa de descuento, la cual representará el momento en el que se comprueba la rentabilidad mínima de un proyecto.



Tasa de descuento: se refiere al tipo de interés que se utiliza para calcular el valor actual de los flujos de caja que se obtendrán en el futuro. Se utiliza para determinar el valor del dinero en el tiempo y, en particular para calcular el VAN y evaluar proyectos de inversión (Joan P. & Padilla R. 2008; Correa 2008).

4. Actualizar los flujos de caja: todos los costos y los beneficios deben ser homologados con los métodos VAN (valor actual neto) y TIR (tasa interna de retorno).

Valor actual neto (VAN): es un criterio de inversión que consiste en actualizar los ingresos y costos de un proyecto o inversión, para conocer cuánto se va a ganar o perder con esa inversión (Altuve 2004). La Ecuación 2 presenta el método para calcular VAN (du Preez & Lottering 2009).

#### Ecuación 2. Cálculo del valor actual neto

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1 + TIR)} + \frac{F_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1 + TIR)^n}$$

Donde:

*VAN: Valor actual neto o valor presente neto*

*I<sub>0</sub>: Inversión inicial*

*F<sub>t</sub>: Flujo de efectivo con respecto al tiempo o flujo de caja*

*n: Número de periodos*

*TIR: Tasa interna de retorno*

Tasa interna de retorno (TIR): es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir; es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión en un proyecto dependiendo de su rentabilidad (Altuve 2004).

5. Cálculo e interpretación de la relación B/C.



## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1 La huella de carbono de los servicios de salud**

El impacto ambiental de los servicios de salud ha sido de interés en los últimos tiempos. Mayoritariamente se ha investigado impacto al CC de los servicios de salud y al respecto, se cuenta con múltiples estudios (Chung & Meltzer, 2009; Gatenby, 2011; Duane, et al., 2012; Pollard, et al., 2014; Bambarén-Alatrística & Alatrística-Gutiérrez, 2016).

Aunque en esos trabajos no se utilizó el ACV para la cuantificación de la huella de carbono, los resultados se basan en metodologías basales, como “*The Greenhouse Gas Protocol*” (Protocolo para GEI) (IPCC, 2006) y “*Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*” (Directrices para los inventarios nacionales de GEI) (WBCSD, 2014), así como los enfoques de “*input-output*”.

### **2.2 Análisis de ciclo de vida en los servicios de salud**

El ACV se ha utilizado en evaluaciones del impacto ambiental de catéteres venosos (McGain, et al., 2012), envases de soluciones intravenosas (Belmboom, et al., 2011; Dhaliwal et al., 2014) y la producción de compuestos farmacéuticos (Jiménez-González et al. 2004). Adicionalmente, se ha comparado el impacto ambiental con enfoque de ACV del parto natural con los nacimientos por cesárea (Thiel et al., 2007; 2009), siendo el único antecedente directo del empleo del ACV en la práctica médica.

### **2.3 Impacto ambiental de la asistencia renal**

Los estudios de impacto ambiental del servicio de hemodiálisis se han enfocado a determinar la huella de carbono atribuida a esta práctica, sin considerar una perspectiva de ciclo de vida. Por ejemplo, Connor et. al., (2011) estimaron la huella de carbono de las



modalidades de hemodiálisis casera y hospitalaria en el Reino Unido, reportando un total de entre 3.8 y 7.2 toneladas de CO<sub>2</sub> eq por paciente al año.

En otro estudio realizado en Australia, Lim et. al., (2013), estimaron la huella de carbono del servicio hemodiálisis en toda Australia, reportando que la atención de un paciente representa aproximadamente 10.2 toneladas de CO<sub>2</sub>eq al año. Así mismo, Chen y colaboradores (2016), estimaron la huella de carbono de la diálisis peritoneal en China, y obtuvieron como resultados que la atención por paciente representa alrededor de 4.2 toneladas de CO<sub>2</sub>eq al año.

Finalmente, Hanson y Hitchcock en 2009 evaluaron el impacto ambiental de los componentes de un filtro dializador empleando la metodología de ACV. El análisis fungió como herramienta para mejorar el diseño de los dializadores y reducir el impacto ambiental durante su producción; no obstante, en este estudio no se evalúa el impacto ambiental global de brindar un servicio de HD. Este trabajo significa la primera comunicación científica que aborda una evaluación del ciclo de vida para la asistencia renal artificial, así como un análisis de sus costos ambientales mediante el ACB, representando un primer acercamiento al análisis de sustentabilidad de un servicio de salud en México.



### 3. JUSTIFICACIÓN

En México, el gasto en salud es inferior al promedio mundial representando entre el 5.8 y 6.6% del PIB nacional, y se distribuye en infraestructura (67%), insumos y equipos médicos (19%) y atención y prevención de enfermedades (14%) (Dantés et al. 2011; SSA, 2016).

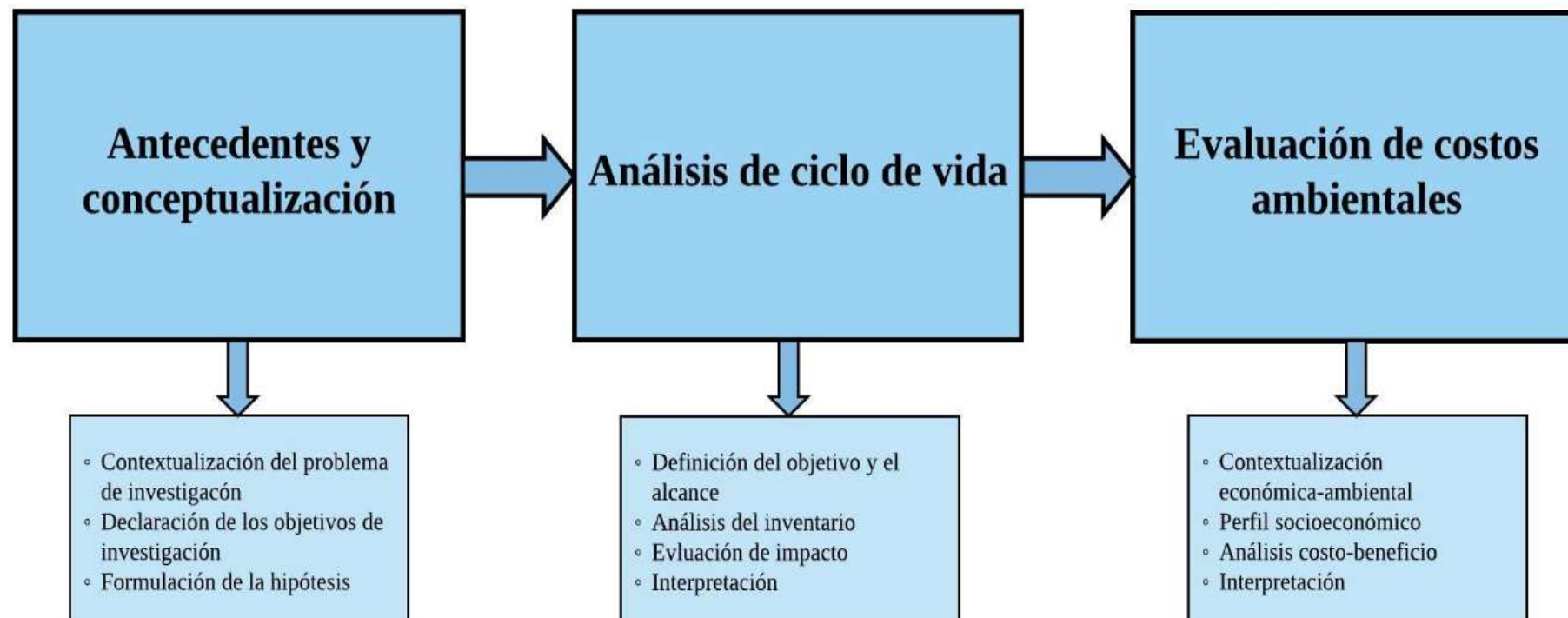
De lo que se invierte en el usuario, la mayor parte es destinada al tratamiento de las enfermedades crónico-degenerativas como la ERC. La ERC es una de las diez principales causas de hospitalización y muerte y se le considerada como una enfermedad catastrófica por los altos costos, los limitados recursos humanos y las altas tasas de morbilidad y mortalidad en terapias de asistencia (Treviño-Becerra 2004; Méndez-Durán et al.; 2014).

Actualmente se carece de un registro oficial de pacientes con ERC y se desconoce su perfil epidemiológico, aunque se estima una incidencia de casos de 377 por millón de habitantes y se cuenta con alrededor de 52,000 pacientes en terapias sustitutivas como la hemodiálisis (Méndez-Durána et al. 2010; USRDS 2015).

La HD es una terapia caracterizada por demandar grandes volúmenes de agua, electricidad y materiales médicos, así como generar residuos sólidos y residuos peligrosos, además de contaminar el agua utilizada (Grafals & Sanchez 2016). Sin embargo, tal impacto sobre los sistemas acuáticos es desconocido e ignorado en la investigación relevante al ACV de la asistencia renal. A consecuencia de ello, debe considerarse y analizarse su impacto ambiental con una perspectiva de ciclo de vida y además analizar los aspectos económicos implicados que puedan representar una oportunidad potencia de mejora del desempeño ambiental para la asistencia renal artificial.



#### 4. PLAN GENERAL DE TRABAJO





## **CONCEPTUALIZACIÓN**

### **Problema de investigación**

Se desconoce el impacto ambiental global del ciclo de vida de la asistencia renal artificial, así como el costo ambiental que representa una terapia de reemplazo como la HD.

### **Pregunta de investigación**

¿Cuál es la huella y el costo ambiental de la HD como terapia de asistencia renal artificial?

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Identificar las variables responsables de los mayores impactos ambientales y económicos del ciclo de vida de la asistencia renal artificial.

### **Objetivos particulares**

- Estimar el impacto ambiental del ciclo de vida de la asistencia renal artificial a través de un servicio de HD.
- Realizar un análisis de costo-beneficio de los impactos ambientales del ciclo de vida de la asistencia renal artificial.

## **HIPÓTESIS**

La huella y los costos ambientales derivados del ciclo de vida de la asistencia renal artificial, están relacionados con el consumo y la descarga de agua residual posterior a la terapia de reemplazo renal.



# **CAPÍTULO II.**

# **ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

- **DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE**
- **ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA**
- **EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL CICLO DE VIDA**
  - **INTERPRETACIÓN**



## **5. DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

### **5.1 Definición del objetivo y alcance**

#### **5.1.1 Objetivo**

El objetivo es estimar el impacto ambiental de la asistencia renal artificial por medio de la HD, empleando el ACV. El estudio será presentado como proyecto de Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, y los resultados serán reportados a la comunidad científica y médica. No se consideraron comparaciones entre sistemas similares.

#### **5.1.2 Alcance**

##### ***5.1.2.1 Unidad funcional y flujo de referencia***

Asistir artificialmente la función renal a través de una máquina de HD, en una clínica renal de atención ambulatoria que cumple con las condiciones necesarias de seguridad, personal capacitado, infraestructura técnica y materiales necesarios para soportar la demanda total de pacientes durante un mes. Para esto, se consideró que en la clínica renal se trabajan cuatro turnos de tres horas por día, y en cada turno se atienden entre nueve y diez pacientes durante seis días a la semana, lo que resulta en un flujo de referencia de  $826 \text{ HD mes}^{-1}$ .

##### ***5.1.2.2. Descripción del sistema***

El sistema-producto consiste en un servicio de asistencia renal para pacientes con ERC. El servicio es realizado en una clínica de atención ambulatoria del sector privado, cuya terapia de reemplazo es la hemodiálisis. La clínica renal debe cumplir con los requisitos de infraestructura, equipamiento y personal de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SSA3-2017 para la atención a hemodiálisis (DOF, 2017).

### 5.1.2.3 Límites del sistema

El sistema-producto incluye las etapas de transporte, uso y fin de vida (Figura 1). Fueron excluidas las etapas de obtención de materias primas, transporte de las mismas y la manufactura, pues el interés fundamental del estudio, es conocer la huella ambiental de la asistencia renal artificial mediante la terapia de HD. Además, por escasa disponibilidad de recursos e información, el estudio se limita a las etapas mencionadas.

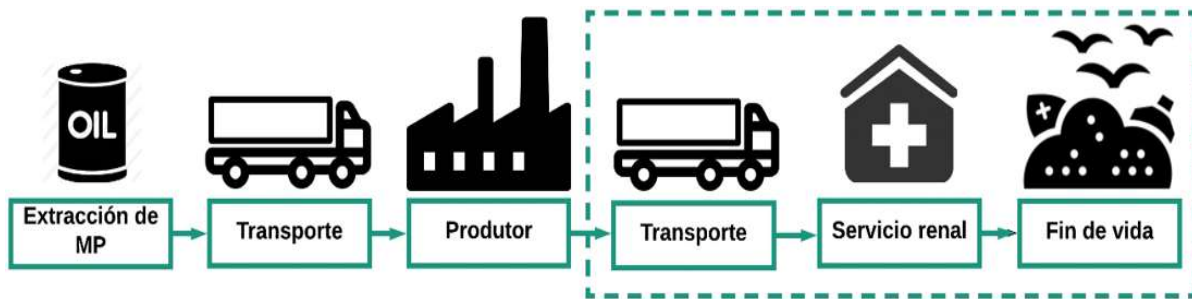


Figura 1. Límites del sistema-producto

### Transporte de materiales

Se analizó el transporte de los materiales (TM) considerando las distancias del trayecto desde el productor/proveedor hasta la clínica renal (Figura 2).

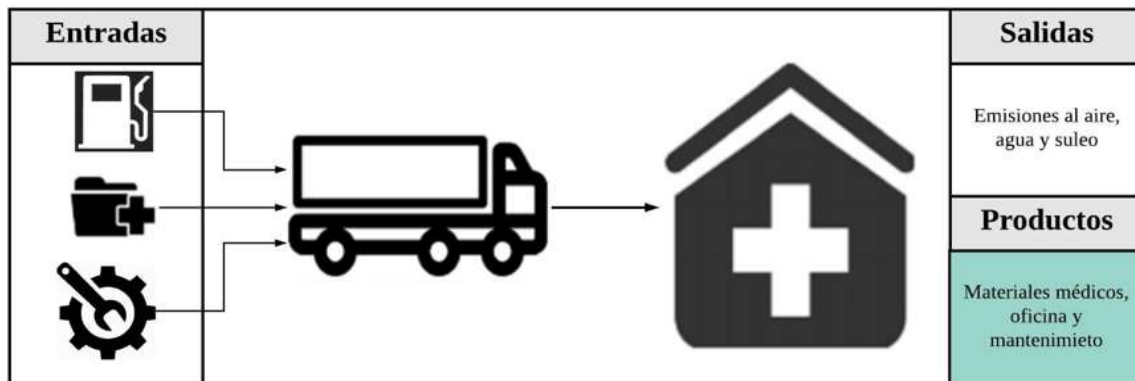


Figura 2. Transporte de materiales

*Servicio renal*

Es la etapa que incurre dentro de la unidad renal ambulatoria donde los pacientes con ERC son atendidos. El servicio renal incluye una serie de procesos unitarios necesarios para brindar la terapia de reemplazo renal (Figura 3).

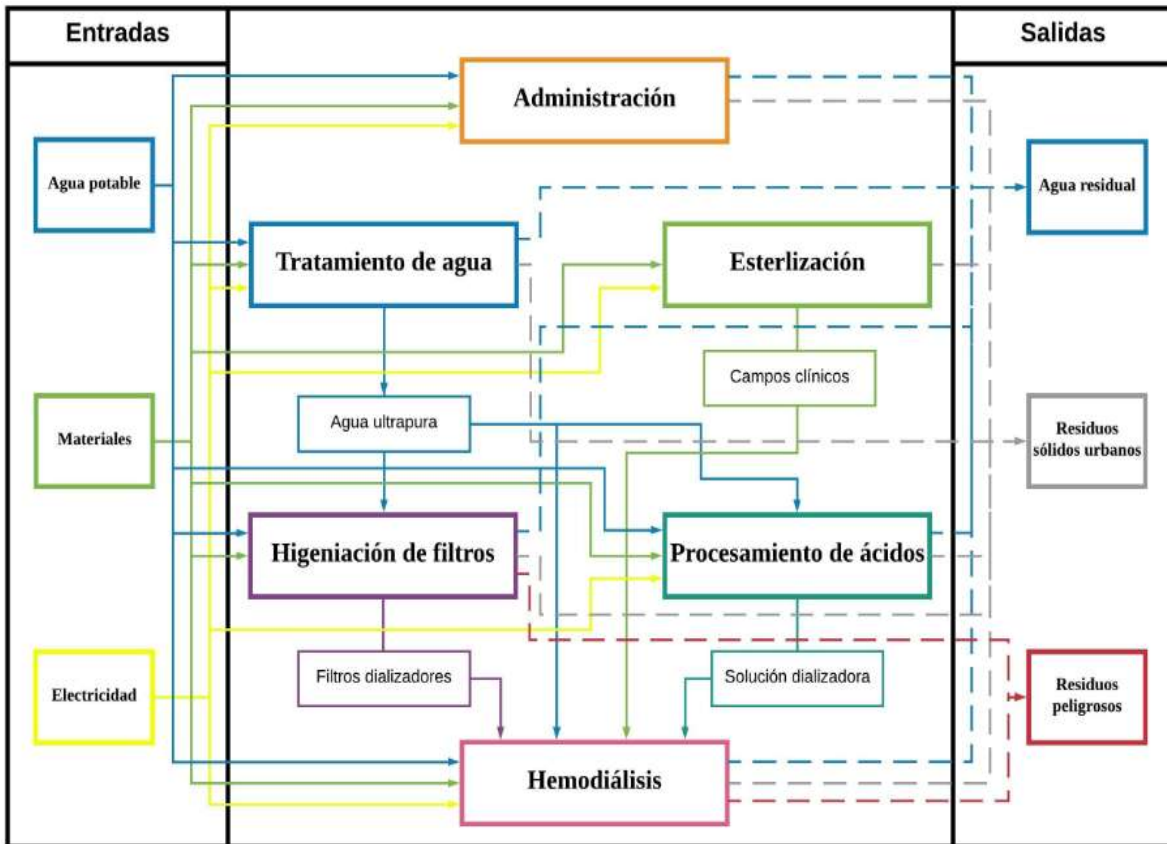


Figura 3. Servicio renal

*Fin de vida*

En esta fase se consideraron tres escenarios de residuos:

- Gestión de residuos sólidos municipales (GRSM): este escenario consideró el transporte de los residuos y su disposición final en el relleno sanitario (ReSa) local.

- Gestión de los residuos peligrosos biológico-infecciosos (GRPBI): se consideró el transporte de los RPBI, la incineración, el transporte de las cenizas remanentes y su posterior confinamiento en el vertedero más cercano al sitio de tratamiento.
- Tratamiento del agua residual (TAR): las descargas de AR generadas por el servicio renal, son vertidas a la tecnósfera que consta de un sistema de desagüe municipal que conduce las aguas residuales municipales a una planta de tratamiento (Figura 4).

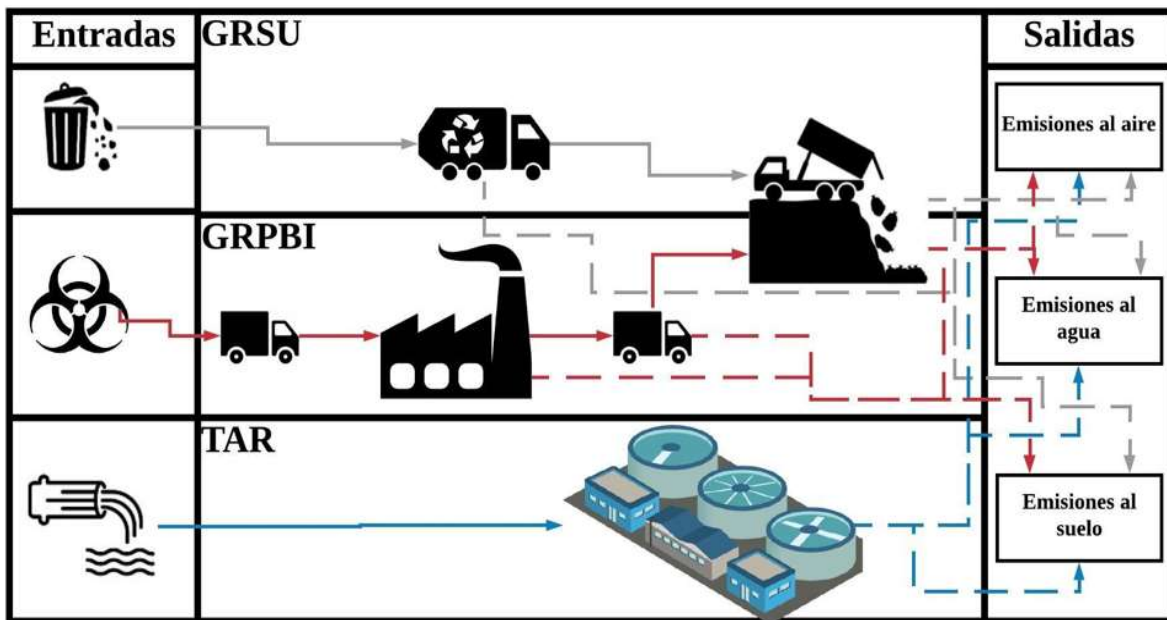


Figura 4. Fin de vida

#### 5.1.2.4 Tipos y fuentes de datos

Los datos de primer plano fueron obtenidos directamente de la clínica renal, así como artículos científicos y sitios *web* (Tabla 3). Los datos de fondo fueron completados de las bases de datos “*Ecoinvent 3 – allocation at point of substitution unit, ELCD, EU & Input Output Database, Methods y USLCP*”, contenidas en el Software para ACV SimaPro versión 8.5.0.0 PhD.



Tabla 3. Tipos y fuentes de datos

Etapa	Dato	Tipo	Fuente
Transporte de materiales	Productores y materiales transportados	Medido	Inventario de compras
	Vehículo de transporte	Asignación	
	Distancia recorrida	Asignación	<i>Google-Maps</i>
Servicio renal	Consumo de agua	Calculado	Perfil de consumo de agua
	Consumo de electricidad	Calculado	Perfil de consumo de electricidad
	Materiales por proceso unitario	Calculado	Inventario de compras
	Generación de residuos sólidos	Medido	Caracterización de residuos
	Descarga de agua residual	Calculado	Perfil de consumo de agua
Fin de vida	Transporte y disposición de RSM	Calculado	Personal de recolecta de residuos
	Transporte de residuos peligrosos	Calculado	Administración
	Tratamiento y disposición final de RPBI	Asignación	(DOF, 2004; Rosas D., et al., 2003)

Fuente: Elaboración propia según el proceso para el desarrollo del inventario de ciclo de vida

#### **5.1.2.5 Criterios de calidad de la información**

Se verificó la calidad de la información de acuerdo con los criterios de calidad de los datos de la norma internacional ISO 14044 (ISO 2006b). La evaluación de la calidad de los datos se realizó con la matriz de Pedigree (Tabla 4).

#### **5.1.2.6 Evaluación de impacto del ciclo de vida**

La EICV de la asistencia renal artificial se realizó con el método “*ReCiPe Midpoint V1.13/World Recipe H*”. El análisis consideró todas las categorías de impacto del punto medio y se empleó el software para ACV “SimaPro” versión 8.5.0.0. Adicionalmente, se realizó un análisis de Montecarlo para analizar la incertidumbre y calidad de los resultados, la representatividad del modelo o ICV y el método de EICV.





Tabla 4. Indicadores de calidad. Matriz de Pedigree

Indicador	1	2	3	4	5
Fiabilidad	Datos verificados basados en mediciones directas.	Datos verificados parcialmente basados en hipótesis o datos no verificados basados en mediciones directas.	Datos no verificados basados en hipótesis.	Estimaciones calificadas (por ej. Expertos de la industria)	Estimaciones no calificadas y datos con origen desconocido.
Integridad	Datos representativos de todos los sitios.	Datos provenientes de >50% de los sitios.	Datos representativos de solo algunos sitios (<50%).	Datos representativos de un solo sitio.	Representatividad desconocida.
Correlación temporal	Menos de 3 años de diferencia con el año de estudio.	Menos de 6 años de diferencia con el año de estudio.	Menos de 10 años de diferencia con el año del estudio.	Menos de 15 años de diferencia con el año del estudio.	Años de los datos desconocidos.
Correlación geográfica	Datos del área bajo estudio.	Datos medidos procedentes de un área mayor que abarca el área bajo estudio.	Datos procedentes de un área menor o similar a las condiciones de producción.	n. a.	Datos procedentes de un área desconocida o con condiciones de productividad diferentes.
Correlación tecnológica	Datos procedentes de empresas, procesos y materiales bajo estudio.	Datos procedentes de procesos y materiales bajo estudio (ej. Idéntica tecnología) pero de diferentes empresas.	Datos procedentes de procesos y materiales bajo estudio pero de diferente tecnología.	Datos relacionados con los procesos y materiales.	Datos relacionados con los procesos a escala de laboratorios o procedentes de diferentes tecnologías.

Elaboración propia a partir del Software SimaPro versión 8.5.0.0 PhD.



## 5.2 Análisis del inventario de ciclo de vida

En esta sección se describen las etapas y procesos unitarios del ciclo de vida de la asistencia renal artificial. Así mismo, al final de la sección se presentan los ICV por proceso y los métodos para generarlos.

### 5.2.1 Transporte de materiales

Los materiales necesarios para el servicio de HD son adquiridos de varios proveedores. Para conocer esta información, se consultó el inventario general de compras y proveedores de la unidad. Con base en dicho inventario, se investigaron las ubicaciones de todos los proveedores y se trazó una ruta de transporte en la aplicación web “Google-Maps”, obteniendo así la distancia recorrida y con base en la Ecuación 3 se calculó el indicador toneladas-kilómetro (tkm).

Ecuación 3. Cálculo de las toneladas-kilómetro

$$tkm = m * d$$

Donde:

*tkm*: Toneladas-kilómetro

*m*: Masa o cantidad de material transportado

*d*: Distancia recorrida

Posteriormente la cantidad de “tkm” fue ajustada conforme a la unidad funcional (826 HD mensuales), considerando que el transporte de materiales es realizado una vez por mes. El paso siguiente, fue introducir los datos en el software SimaPro, considerando la tecnología de transporte de carga compatible para México -*EURO3 {RoW}*- (Tabla 5).



Tabla 5. Inventario de ciclo de vida. Transporte de materiales

Transporte. <i>Ecoinvent Allocation Default Unit</i> versión 3.0 SimaPro 8.5.0.0	Cantidad	Unidad
<sup>1</sup> <i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, EURO3 {RoW}</i>	1519.2	tkm
<sup>2</sup> <i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}</i>	310.4	tkm
<sup>3</sup> <i>Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RoW}</i>	25.3	tkm
<sup>4</sup> <i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i>	4.4	tkm
<sup>5</sup> <i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i>	2.5	tkm
<sup>6</sup> <i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i>	0.004	kgkm
<sup>7</sup> <i>Transport, passenger car, EURO3 {RoW}</i>	2.5	km
<sup>8</sup> <i>Transport, passenger car, EURO3 {RoW}</i>	0.5	km

<sup>1</sup> FRESENIUS MEDICAL CARE®: Soluciones y polvos para hemodiálisis (Guadalajara-Morelia)

<sup>2</sup> PISA-FARMACÉUTICA®: Medicamentos y soluciones para hemodiálisis (Guadalajara-Morelia)

<sup>3</sup> COMERSA® DEL NORESTE SA de CV: Materiales médicos de curación (Querétaro-Morelia)

<sup>4</sup> DISMELAB: Block 3, bodega 49, central de abastos. Morelia, Mich.

<sup>5</sup> SAMS-CLUB®: Materiales administrativos y mantenimiento general. Morelia, -Mich.

<sup>6</sup> AMBIENTAL MICHOACANA: Calle José Catanio Palacios 138. Morelia, Mich.

<sup>7</sup> EL SURTIDOR: Calle José Catanio Palacios 138. Morelia, Mich.

<sup>8</sup> EL TELAR: Juan José de Lejarza 193. Morelia, Mich.

## 5.2.2 Servicio renal

El servicio renal es la segunda etapa del ciclo de vida del sistema-producto. A continuación se describe el procedimiento para desarrollar el ICV de esta etapa y sus procesos unitarios.

### 5.2.2.1 Administración

La administración (A) de la clínica incluye las áreas y actividades de dirección general, gestión de calidad, contabilidad y mantenimiento de la unidad. Dichas actividades requieren gran variedad de materias primas, electricidad y agua. Así mismo, se generan RSM y AR (Tabla 6). Los métodos para generar el ICV de este proceso se pueden consultar a partir del Anexo 2.



### **5.2.2.2 Esterilización**

En este proceso se esterilizan (E) los campos clínicos para la inserción del catéter o vía arterio-venosa. Para esta actividad se requieren materiales tales como torundas de algodón, papel de estraza y gasas de algodón, así como electricidad y un esterilizador de calor seco. El producto de este proceso son los campos clínicos esterilizados que se utilizan en la HD (Tabla 6). Los métodos para generar el ICV de este proceso se muestran a partir del Anexo 2.

### **5.2.2.3 Tratamiento de agua**

El tratamiento de agua (TA) es tipo de tratamiento previo a la HD cuya finalidad es generar agua con la calidad requerida para el proceso (Pérez-García et al. 2016). El TA incluye filtro de arenas y salmuera, filtro suavizador, sistema de ósmosis inversa y filtro de rayos ultravioleta. Para este proceso se requieren materiales de mantenimiento, agua y energía eléctrica, además de equipos e instalaciones eléctricas e hidráulicas. El producto intermedio es agua ultrapurificada para el procesamiento de ácidos, la higienización de filtros y la HD (Tabla 6). Los métodos empleados para generar el ICV de este proceso presentan a partir del Anexo 2.

### **5.2.2.4 Procesamiento de ácidos**

El procesamiento de ácidos (PA) consiste en la preparación de la solución concentrada para hemodiálisis a base de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}$ ) y cloruro de potasio ( $\text{KCl}$ ), dextrosa ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) y acetato ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ ) entre otros. Para este proceso se requiere de agua ultrapurificada, electricidad y materiales componen la solución. Así mismo se generan



RSM, AR y la solución concentrada para hemodiálisis como producto intermedio (Tabla 6). Los métodos empleados para generar el ICV de este proceso se pueden consultar a partir del Anexo 2.

#### ***5.2.2.5 Higienización de filtros***

La higienización de filtros (HF) se lleva a cabo de manera rudimentaria empleando agua ultrapurificada a presión, y soluciones desinfectantes como hipoclorito de sodio al 5% y formaldehído al 40%. Como salidas se incluyen RSU, AR y RPBI y el producto intermedio que son los filtros y las líneas arterio-venosa esterilizadas (Tabla 6). Los métodos empleados para generar el ICV de este proceso se pueden consultar a partir del Anexo 2.

#### ***5.2.2.6 Hemodiálisis***

La hemodiálisis (HD) es el tipo de terapia de asistencia renal artificial que se oferta en la clínica renal estudiada. El procedimiento requiere grandes volúmenes de agua ultrapurificada, materiales esterilizados, la solución concentrada dializadora y filtros de membranas semipermeables estériles. Así mismo, se requieren medicamentos, material de curación y asistencia, electricidad y equipos eléctricos. Como salidas del proceso se tienen pacientes rehabilitados temporalmente, AR al drenaje municipal, RSM y RPBI (Tabla 6). Los métodos empleados para generar el ICV de este proceso se pueden consultar a partir del Anexo 2.



Tabla 6 Inventario de ciclo de vida. Servicio renal

Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales y combustibles)	A	E	TxA	PA	HF	HD	Total	Unidad
<i>Polyethylene, high density, granulate {RoW}</i>	3.2	0.1	0.4		1.2	2.6	7.5	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Polyethylene, low density, granulate {RoW}</i>	20.4		2.2	79.9	120.9	60.1	283.5	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Polyvinylidenechloride, granulate {RoW}</i>					64	32.2	96.2	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Polypropylene, granulate {RoW}</i>	1.6				1.6	21.5	24.7	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Polyurethane, rigid foam {RoW}</i>					7.4		7.4	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Polycarbonate {RoW}</i>					98.3	0.5	98.8	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Synthetic rubber {RoW}</i>					4.1	5.9	10	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Silicone product {RoW}</i>					3.1		3.1	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Printed paper, offset {RoW}</i>	6.5	0.3		0.1	1.2	0.2	8.3	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Graphic paper, 100% recycled {RoW}</i>	0.1					3.6	3.7	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Tissue paper {RoW}</i>	47.2						47.2	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Dummy_Glue-adhesive, at plant/US</i>		0.1			0.1		0.2	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Corrugated board box {RoW}</i>	2.1	0.2		67.7	24	52.5	146.5	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Solid bleached board {RoW}</i>	5.9				58.7	19	83.6	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Packaging glass, white {RoW}</i>						2.5	2.5	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Wood pellet, measured as dry mass {RoW}</i>	2.9					1.3	4.2	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Nylon 6-6 {RoW}</i>	0.4	1.6					2	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Textile, woven cotton {GLO}</i>	0.1				0.3	1.8	2.2	kg mes <sup>-1</sup>



Tabla 6. Inventario de ciclo de vida. Servicio renal (II)

<i>Latex {RoW}</i>	0.3			9.9		10.2	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Steel, low-alloyed {RoW}</i>	2.2					2.2	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Dummy_Colorant, at plant/kg/RNA</i>	0.7					0.7	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Carboxymethyl cellulose, powder {RoW}</i>	3.3	8.6		358.3		548	918.2 kg mes <sup>-1</sup>
<i>Foaming agent {GLO} </i>	2.8				72.7		75.5 kg mes <sup>-1</sup>
<i>Zeolite, powder {RoW} </i>	1.5					1.5	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Sodium perborate, tetrahydrate, powder {RER} </i>	2.1					2.1	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Layered sodium silicate, SKS-6, powder {RoW} </i>	0.3					0.3	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Sodium chloride, powder {RoW}</i>				1,432.1		0.6	1,432.7 kg mes <sup>-1</sup>
<i>Isopropanol {RoW} </i>	2.8		2.3				5.1 L mes <sup>-1</sup>
<i>Butane {RoW} </i>	0.1		2.3				2.4 L mes <sup>-1</sup>
<i>Propane {RoW} </i>	0.1		2.3				2.4 L mes <sup>-1</sup>
<i>Acetic acid, without water, in 98% solution state {RoW} </i>				19.6			19.6 L mes <sup>-1</sup>
<i>Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RoW}</i>						6.3	6.3 L mes <sup>-1</sup>
<i>Ethanol, without water, in 99.7% solution state {RoW}</i>					9.6		9.6 L mes <sup>-1</sup>
<i>Formaldehyde {RoW}  oxidation of methanol</i>					675		675 L mes <sup>-1</sup>
<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {RoW} </i>	61.8			6.1	25	50	142.9 L mes <sup>-1</sup>
<i>Ethanol, without water, in 99.7% solution state {RoW} </i>	6.9		0.8				7.7 L mes <sup>-1</sup>
<i>Chlorine, liquid {RoW}</i>				21.2			21.2 L mes <sup>-1</sup>



Tabla 6. Inventario de ciclo de vida. Servicio renal (III)

<i>Potassium chloride {RoW}</i>							32.8	32.8	L mes <sup>-1</sup>
<i>Calcium chloride {RoW}</i>							50.8	50.8	L mes <sup>-1</sup>
<i>Glycerine {RoW}</i>	6.9							6.9	L mes <sup>-1</sup>
<i>Ethyl acetate {RoW}</i>							121.7	121.7	L mes <sup>-1</sup>
<i>Potassium hydroxide {RoW}</i>	0.1	2.3						2.4	L mes <sup>-1</sup>
<i>Tap water{RoW}</i>	39,705.6	467						40,172.6	L mes <sup>-1</sup>
<i>Water, ultrapure {RoW}</i>	582.2		1,247.4	300.4	1,392.4	3,522.4			L mes <sup>-1</sup>
Solución concentrada para hemodiálisis						7,200.0	7,200.0		L mes <sup>-1</sup>
Agua ultrapura			4,800.0	98,188.3	130,508.0	233,496.3			L mes <sup>-1</sup>
Esterilización de campos clínicos						1,000.0	1,000.0		P mes <sup>-1</sup>
Filtros higienizados						826	826		P mes <sup>-1</sup>
Entradas desde la tecnósfera (electricidad y calor)	A	E	TxA	PA	HF	HD	Total	Unidad	
<i>Electricity, medium voltage {MX}</i>	1,949.6	289.76	1,573.70	54.9	37	3,492.50	7,397.5		kWh mes <sup>-1</sup>
Emisiones al aire	A	E	TxA	PA	HF	HD	Total	Unidad	
<i>Ethanol</i>	1.2						1.2		L mes <sup>-1</sup>
<i>Butane</i>	0.1						0.1		L mes <sup>-1</sup>
<i>Propane</i>	0.1						0.1		L mes <sup>-1</sup>
<i>Sodium hypochlorite</i>	0.3						0.3		L mes <sup>-1</sup>
<i>Potassium bis(2-hydroxyethyl) dithiocarbamate</i>	0.1						0.1		L mes <sup>-1</sup>





Tabla 6. Inventario de ciclo de vida. Servicio renal (IV)

Salidas a la tecnósfera. Residuos o descargas para tratamiento	A	E	TxA	PA	HF	HD	Total	Unidad
<i>Municipal solid waste {RoW}</i>	183.9	0.2	3.4	147.7	114.8	165.7	615.7	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Limestone residue</i>			9.3				9.3	
<i>Hazardous wastes</i>						38	38	
<i>Waste water untreated, slightly organic and inorganic contaminated</i>	3,940.90			910.2	99.2	138,970.0	143,920.3	L mes <sup>-1</sup>
<i>Waste water untreated, organic contaminated</i>	33,100						33,100.0	L mes <sup>-1</sup>
<i>Wastewater, unpolluted</i>			233.5				233.5	
Productos UF-1 (826 sesiones de HD mes <sup>-1</sup> )	A	E	TxA	PA	HF	HD		
	27 <sup>a</sup>	1,000 <sup>b</sup>	233.5 <sup>c</sup>	7.2 <sup>c</sup>	826 <sup>b</sup>	826 <sup>b</sup>		

<sup>a</sup> Días de servicio renal

<sup>b</sup> Piezas, o sesiones de HD

<sup>c</sup> m<sup>3</sup>

Elaboración propia a partir de los anexos 2, 3,4 y 5.

Bases de datos: *Ecoinvent Allocation Default Unit* versión 3.0 y EU-27 S.

Software SimaPro versión 8.5.0.0 PhD.



### 5.2.3 Fin de vida

#### 5.2.3.1 Escenario de gestión de residuos sólidos municipales

##### *Transporte*

Se identificó que una de las rutas locales de recolección se encarga del transporte de los residuos sólidos generados en la unidad de HD. Dado que el vehículo de recolecta cuenta con una ruta de trabajo establecida, para los cálculos de esta etapa se consideró solo la distancia comprendida desde la clínica hasta el relleno sanitario de la ciudad de Morelia, Mich. (19° 40' 51'' N, 101° 21' 10.4'' O). Se consideró que el transporte de los residuos es realizado los seis días por semana, y se transportan de 25-35 kg día<sup>-1</sup>.

##### *Disposición final*

Posterior al transporte, los residuos sólidos son dispuestos en el relleno sanitario local, sin un previo tratamiento. Dado que los RSM son una salida a la tecnósfera, la modelación del impacto ambiental para este escenario será como “*Municipal solid waste*” (Tabla 7).

#### 5.2.3.2 Escenario de gestión de residuos peligrosos biológico-infecciosos

##### *Transporte*

Los residuos peligrosos de tipo biológico-infecciosos, son gestionados por una entidad externa especializada en su tratamiento. Se consideró que el transporte de los residuos biológico-infecciosos es realizado cuatro veces al mes, y en promedio son transportados 90 kg. El transporte de este escenario incluye:

- La distancia de la clínica hasta el sitio de almacenamiento local ubicado en la ciudad de Morelia, Mich.



- La distancia comprendida desde el almacenamiento temporal (en Morelia), hasta el lugar de tratamiento por incineración en la ciudad de Guadalajara, Jal.
- La distancia comprendida entre el sitio de tratamiento, hasta el destino final en el relleno sanitario de Guadalajara, Jal.

### *Tratamiento y disposición final*

Los RPBI son incinerados a alta temperatura, sin embargo no se tiene certeza sobre la tecnología empleada, por esta razón y para términos de la modelación de impacto ambiental, se consideró que la incineración es en un horno con parrilla giratoria y con recuperación de energía. Por su parte, las cenizas residuales son vertidas en una celda de residuos de manejo especial en el relleno sanitario de la ciudad de Guadalajara, Jal. (20° 32' 23.3'' N, 103° 10' 32.7'' O). Dado que las cenizas remanentes son una salida a la tecnósfera, la modelación del impacto ambiental para este escenario será como “*Fly ash scrubber sludge*” (Tabla 7).

### **5.2.3.3 Tratamiento de agua residual**

Se tienen dos tipos de descargas de AR por la asistencia renal artificial: el flujo primario incluye al agua de rechazo por parte del sistema de tratamiento de agua (pre-diálisis), que presenta una carga nula de contaminación y el segundo flujo es el relacionado con los procesos unitarios: administración, higienización de filtros, procesamiento de ácidos y la hemodiálisis, el cual sale con una carga considerable de materia orgánica y contaminantes químicos. Dado que ambos flujos de descarga son una salida a la tecnósfera, la modelación del impacto ambiental se realizará como “*Waste water - untreated, organic contaminated y water - untreated, slightly organic and inorganic contaminated*” (Tabla 7).

Tabla 7. Inventario de ciclo de vida. Fin de vida

Escenario de gestión de RSM	Cantidad	Unidad
<i>Transport, fright, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i>	372.4	tkm mes <sup>-1</sup>
<i>Municipal solid waste (waste scenario) {RoW}</i>	625.1	kg mes <sup>-1</sup>
Escenario de gestión de RPBI	Cantidad	Unidad
<i>Transport, fright, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i>	145.2	tkm mes <sup>-1</sup>
<i>Hazardous waste, for incineration {RoW}</i>	390.7	kg mes <sup>-1</sup>
<i>Transport, fright, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}</i>	1.8	tkm mes <sup>-1</sup>
<i>Fly ash scrubber sludge {RoW}</i>	39.1	kg mes <sup>-1</sup>
Escenario de tratamiento de agua residual	Cantidad	Unidad
<i>Waste water - untreated, organic contaminated</i>	33.1	m <sup>3</sup> mes <sup>-1</sup>
<i>Waste water - untreated, slightly organic and inorganic contaminated</i>	243.0	m <sup>3</sup> mes <sup>-1</sup>
<i>Wastewater, unpolluted</i>	233.5	m <sup>3</sup> mes <sup>-1</sup>

Elaboración propia a partir de: anexo 2

Bases de datos: *Ecoinvent Allocation Default Unit* versión 3.0 y EU-27 S.

Software SimaPro versión 8.5.0.0 PhD.

### 5.3 Evaluación de impacto del ciclo de vida

El objetivo del ACV fue estimar el impacto ambiental de la asistencia renal artificial en la modalidad de HD. A continuación se describen los principales resultados.

#### 5.3.1 Caracterización del impacto ambiental global de la asistencia renal artificial

La caracterización del impacto ambiental es el segundo de los elementos obligatorios de la EICV según ISO 14044 (ISO 2006). La Tabla 8 muestra los resultados globales de la caracterización del impacto ambiental de la asistencia renal artificial. Se observa que en la HD y el TAR se concentraron las mayores cargas ambientales por categoría de impacto.



Tabla 8. Caracterización del impacto ambiental de la asistencia renal artificial

Categoría	Unidad	TM	HD	PA	HF	A	TA	E	GRSM	GRPBI	TAR	Total
CC	kg CO <sub>2</sub> eq	180.1	13,400.3	2,526.7	2,235.3	1,646.6	1,118.0	564.1	372.3	1375.9	18,573.6	41,879.6
ACO	kg CFC-11 eq	3.6E-05	6.0E-03	3.2E-04	3.5E-03	2.1E-04	8.6E-05	1.8E-04	1.3E-04	6.7E-05	1.1E-04	1.1E-02
RI	kBq U235 eq	12.5	697.0	92.0	398.0	94.6	56.8	28.7	4.3	25.6	66.7	1,475.3
TH	kg 1,4-DB eq	44.5	689.3	225.7	198.1	106.3	49.0	30.9	11.8	79.7	96.4	1,524.6
FOF	kg NMVOC	1.0	35.3	8.0	6.9	4.6	2.8	2.1	0.6	4.1	39.8	104.6
FMP	kg PM10 eq	0.4	25.8	6.4	4.9	5.2	3.6	1.1	0.2	1.4	12.3	61.2
AT	kg SO <sub>2</sub> eq	0.7	51.9	12.6	9.8	10.4	5.5	3.7	0.3	3.5	38.8	136.9
EAF	kg P eq	0.0	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
EM	kg N eq	3.3E-02	2.9	0.5	0.3	0.3	0.1	0.2	0.9	4.1E-02	5.6	10.9
EcT	kg 1,4-DB eq	0.1	1.8	0.4	0.3	2.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	5.4
EcAF	kg 1,4-DB eq	0.1	13.3	2.6	2.6	2.4	1.5	0.3	0.1	3.0	3.0	28.8
EcM	kg 1,4-DB eq	0.8	11.2	2.7	1.7	1.7	1.0	0.7	0.2	3.4	3.5	26.7
USA	m <sup>2</sup>	1.5	1,778.4	979.3	403.3	152.7	41.4	47.3	0.5	33.9	0.0E+00	3,430.5
USU	m <sup>2</sup>	16.0	39.6	25.2	6.4	4.2	1.5	0.6	2.3	12.1	0.0E+00	107.1
USN	m <sup>2</sup>	9.6E-03	0.4	0.4	2.5E-02	3.0E-02	1.2E-02	3.3E-03	2.0E-02	1.1E-02	0.0E+00	0.9
AA	m <sup>3</sup>	0.4	271.6	41.1	145.1	65.0	470.7	6.4	0.1	3.9	-439.4	565.0
ARM	kg Fe eq	1.3	114.4	64.3	35.1	49.1	5.6	0.4	0.2	1.4	2.6	274.4
ARF	kg oil eq	67.5	3,406.2	885.7	901.6	544.9	351.4	185.1	23.0	194.9	1129.4	7,668.0

De acuerdo con los resultados de caracterización del impacto ambiental de la Tabla 8, se observa que la terapia renal (HD), concentró los mayores impactos en las categorías de ACO, RI, TH, FMP, AT, EAF, EcT, EcAF, EcM, USA, USU, USN, ARM y ARF. Además, el TAR impactó sobre el CC, la FOF y la EM, presentando también una carga evitada de 439.4 m<sup>3</sup> de agua. El resto de los procesos (TM, PA, HF, A, TA, E, GRSM y GRPBI), presentaron menores contribuciones con respecto a las 18 categorías de impacto. Con respecto a las etapas del sistema-producto, proporcionalmente el servicio renal concentró el 85% del impacto ambiental global en el ciclo de vida de la asistencia renal artificial (Figura 5).

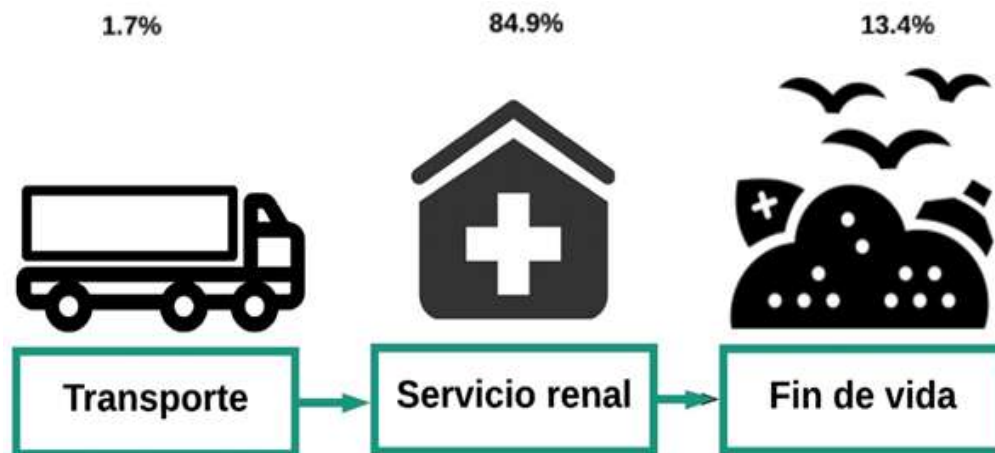


Figura 5. Huella ambiental del ciclo de vida de la asistencia renal artificial

Esto se debe a que en el servicio renal se derivan una serie de transformaciones a las cuales se les atribuye diversos impactos al aire, agua y suelo. Por ejemplo, el uso de electricidad se transforma en emisiones al aire, agua y suelo derivadas de la generación de energía eléctrica. El uso de agua potable se traduce en emisiones al aire, agua y suelo debido a las actividades de extracción y distribución del agua potable. El uso de los materiales se traduce en emisiones al aire, agua y suelo por su producción y la extracción de materias



primas. Un análisis del impacto ambiental que integre el estudio de las etapas previas al transporte de materiales aportará un perfil completo para el estudio de la huella ambiental de la asistencia renal artificial.

### **5.3.2 contribución de proceso por categoría**

#### ***5.3.2.1 Cambio climático***

La huella de carbono de la asistencia renal artificial fue de 42 t de CO<sub>2</sub> eq UF<sup>-1</sup>, lo que equivale a un total de 50 kg de CO<sub>2</sub> eq sesión de HD<sup>-1</sup>. El TAR y la HD ocuparon un 76% del impacto al CC. El AR (*Waste water untreated*), la celulosa (*Carboxymethyl cellulose*) y la energía eléctrica (*Electricity*), fueron las principales variables que contribuyen a la huella de carbono de la asistencia renal artificial (Figura 6-CC)

#### ***5.3.2.2 Agotamiento de la capa de ozono***

El potencial ACO atribuido a la asistencia renal artificial en total fue de 0.0106 kg de CFC-11 eq UF<sup>-1</sup>. La HD y la HF fueron las etapas a las cuales se les atribuye la mayor parte del impacto. La contribución de proceso reveló que el cloruro de polivinilo (PVC), componente del filtro dializador y la línea arterio-venosa fue la variable que representó la mayor parte del impacto al ACO con 0.0077 kg de CFC-11 eq (Figura 7-ACO).

#### ***5.3.2.3 Formación de material particulado***

El potencial de FMP atribuido a la asistencia renal artificial fue de 48.9 kg de PM<sub>10µm</sub> eq UF<sup>-1</sup>. La HD y el TAR ocuparon la mayor parte del impacto en esta categoría concentrando un 70% del impacto. Los procesos unitarios fueron la electricidad (*Electricity*), la celulosa (*Carboxymethyl cellulose*), y el AR (*Waste water untreated*) (Figura 7-FMP).



#### **5.3.2.4 Formación de oxidantes fotoquímicos**

El potencial de FOF atribuido a la asistencia renal artificial fue de 105.1 kg de NMVOC eq UF<sup>-1</sup>. La HD y el TAR contribuyeron en un 71% del impacto. El análisis de contribución reveló que los principales procesos unitarios implicados fueron el AR (*Waste water untreated*), la celulosa (*Carboxymethyl cellulose*) empleada en el PA y la energía eléctrica (*Electricity*), así como los empaques a base de PEBD y PC de las jeringas (Figura 7-FOF).

#### **5.3.2.5 Toxicidad humana**

El potencial impacto sobre la TH atribuido a la asistencia renal artificial fue estimado en un total de 1,524.6 kg de 1,4-DB eq UF<sup>-1</sup>. Resaltan la HD, el TAR, el PA y la HF como las etapas principales concentrando un total de 1,512 kg de 1,4-DB eq. La celulosa (*Carboxymethyl cellulose*) de la solución concentrada para HD, el PVC del dializador, el papel encerado de los empaques de materiales médicos y la electricidad (*Electricity y Natural gas a extraction*), fueron las variables principales en el impacto (Figura 7-TH).

#### **5.3.2.6 Radiación ionizante**

El potencial de formación de radiación ionizante (RI) atribuido a la asistencia renal artificial fue de 1,475.3 kBq de U<sub>235</sub> eq UF<sup>-1</sup>. La HD, la HF y el TAR fueron las etapas que ocuparon la mayor proporción en las emisiones de U<sub>235</sub> eq. Tal impacto es atribuido a la generación de energía eléctrica, en particular por el mix de producción de electricidad, lo que explica las como variables principales el combustible (*Spent nuclear fuel*) y los residuos nucleares (*Radioactive wastes*), así como la celulosa (*Carboxymethyl cellulose*) contenida en la solución concentrada para HD y los empaques de cartón y papel empleados en los procesos de A, TA, E, PA e HF (Figura-RI).



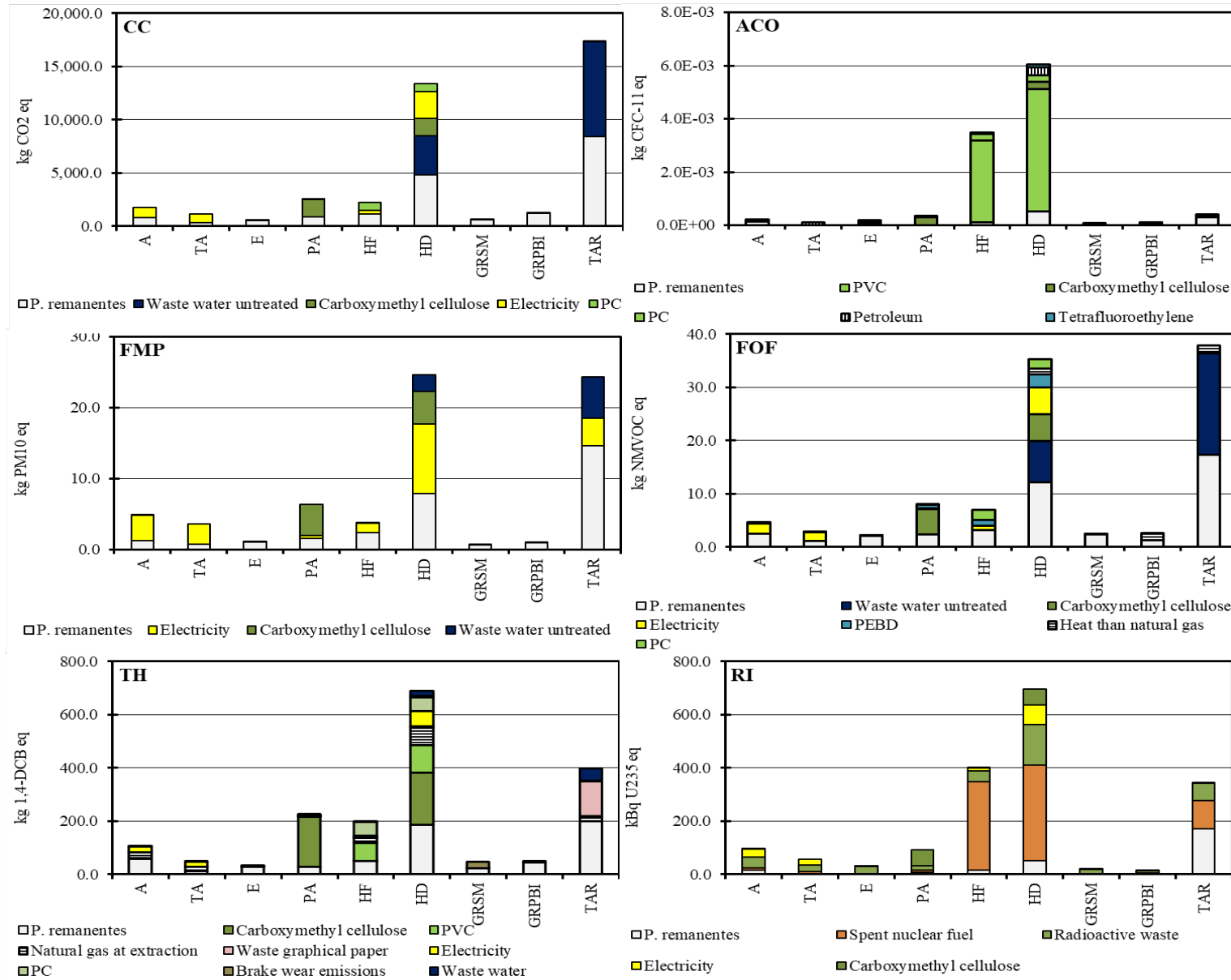


Figura 6. Contribución de proceso para los impactos sobre la salud humana



### **5.3.2.6 Eutrofización marina y en agua fresca**

*ReCiPe Midpoint (H) V1.13* cuenta con dos categorías de impacto para la Eutrofización: eutrofización marina (EM), y eutrofización en agua fresca (EAF). Sobre la EM, se estimó un potencial impacto de 10.9 kg de N eq (kg de Nitrógeno equivalentes). El TAR y la HD las etapas mayormente implicadas en el impacto al presentar mayores descargas de AR (*Waste water untreated*). Además, los procesos unitarios tales como la disposición en el vertedero de los RSM (*Municipal solid waste-MSW*), la celulosa (*Carboxymethyl cellulose*) de la solución concentrada para HD, y el uso de electricidad (*Electricity*) en la HD contribuyen en un 68% a la EM (Figura 7-EM).

En el caso de la EAF, el impacto total fue de 1 kg de P eq (kg de Fósforo equivalentes). La HD y el TAR fueron las etapas del sistema-producto con mayor participación en las emisiones de P eq. Las variables implicadas fueron la extracción de lignita, (*Spoil from lignite mining*) la celulosa (*Carboxymethyl cellulose*) del PA y la minería de carbón (*Hard coal*) (Figura 7-EAF).

### **5.3.2.7 Ecotoxicidad marina, agua fresca y terrestre**

Para la ecotoxicidad *ReCiPe Midpoint (H) V1.13* cuenta con tres categorías de impacto: ecotoxicidad marina (EcM), ecotoxicidad en agua fresca (EcAF) y ecotoxicidad terrestre (EcT). El impacto sobre la EcM se estimó en 26.7 kg de 1,4-DB eq, provenientes principalmente de la HD y el TAR. Los procesos unitarios relacionados fueron la incineración de RPBI (*Hazardous waste*), la celulosa (*Carboxymethyl cellulose*) empleada en la solución concentrada para HD y el AR, así como la generación de energía eléctrica y gas natural (*Electricity* y *Natural gas*).



En el caso de la EcAF el impacto potencial se estimó en 31.8 kg de 1,4-DB eq. De acuerdo con los resultados, la HD presentó la mayor contribución con el 46%. Las variables principalmente implicadas fueron el gas natural (*Natural gas*), la incineración de RPBI (*Hazardous waste*) y los residuos plásticos (*Waste plastic*) (Figura 7-EcAF).

Sobre la EcT, la asistencia renal artificial impactó en 5.4 kg de 1,4-DB eq. La A y la HD fueron los procesos con mayor contribución ocupando un 70%. Las variables implicadas fueron la celulosa (*Carboxymethyl cellulose*) y los textiles a base de algodón (*Cotton fibre*) empleados en la HD, además del coco descarrillado (*Coconut dehusked*) empleado en la manufactura de textiles de fibra orgánica (Figura 7-EcT).

#### **5.3.2.8 Acidificación terrestre**

El impacto potencial a la acidificación terrestre (AT) atribuido a la asistencia renal artificial fue de 136.9 kg de SO<sub>2</sub> eq (kg de dióxido de azufre equivalentes). La HD y el TAR ocuparon la mayor parte del impacto debido a la celulosa (*Carboxymethyl cellulose*) y la energía eléctrica (*Electricity*) empleadas en la HD, así como las descargas de AR (*Waste water untreated*) (Figura 7-AT).

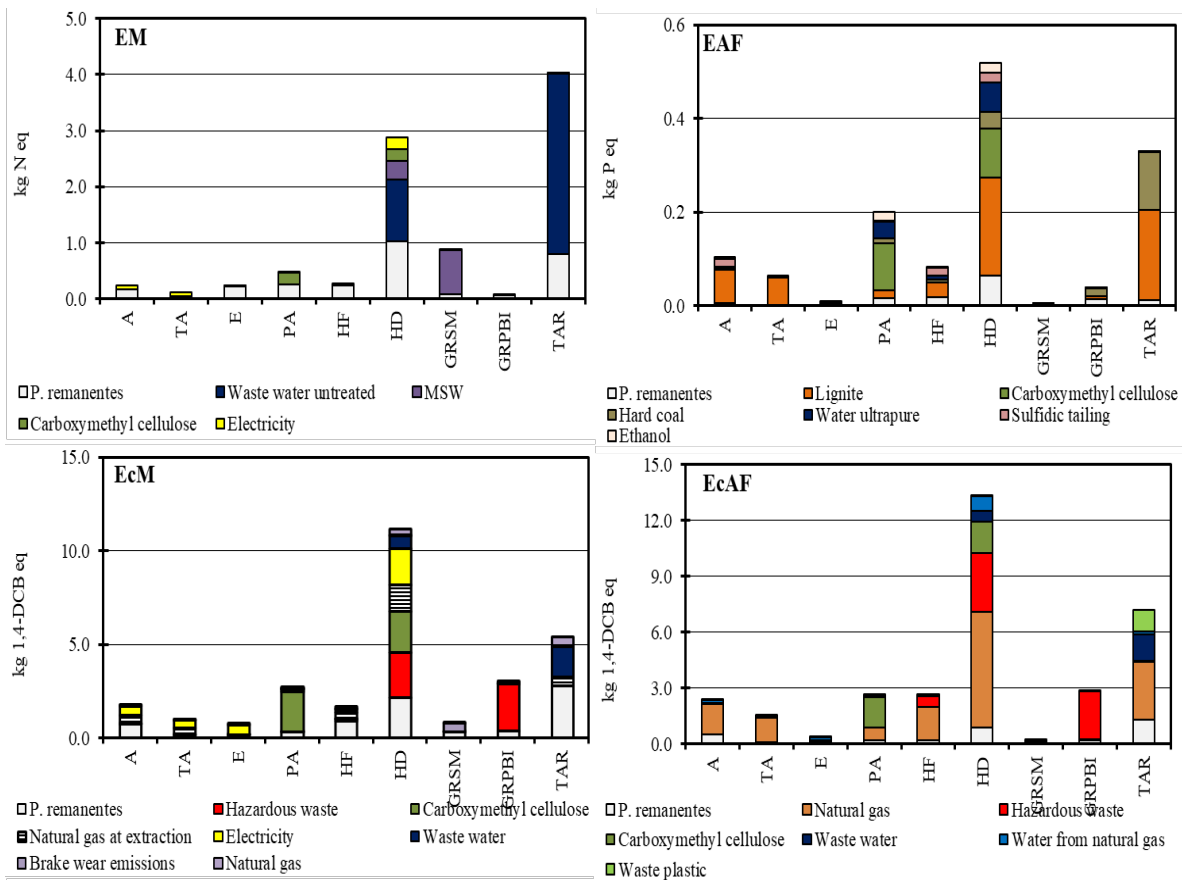
#### **5.3.2.9 Uso de suelo agrícola y urbano y cambio de uso de suelo natural**

El impacto potencial sobre el uso de suelo agrícola (USA) atribuido al ciclo de vida de la asistencia renal artificial fue de 3,400 m<sup>2</sup>. De acuerdo con los resultados, a la HD y al PA se le atribuye el 75% del impacto, siendo la celulosa (*Carboxymethyl cellulose*) el proceso unitario al cual se le atribuye el impacto el uso de suelo agrícola (Figura 7-USA).

Para el uso de suelo urbano (USU), el impacto se estimó en 106.8 m<sup>2</sup>. La HD, el PA y el TAR ocuparon el 92% del impacto de esta categoría, lo cual se atribuye a la producción de

celulosa (*Carboxymethyl cellulose*), presente en la solución dializadora y los empaques de cartón compacto y ondulado (Figura 7-USU).

Por el contrario del uso de suelo urbano y agrícola, el impacto potencial sobre el uso de suelo urbano (USN) atribuido al ciclo de vida de la asistencia renal artificial fue de un m<sup>2</sup>. La celulosa (*Carboxymethyl cellulose*) de la solución dializadora y los empaques de cartón compacto y ondulado de la HD y el PA fue la variable mayormente implicada en el impacto al cambio de uso de suelo natural (Figura 7-USN).



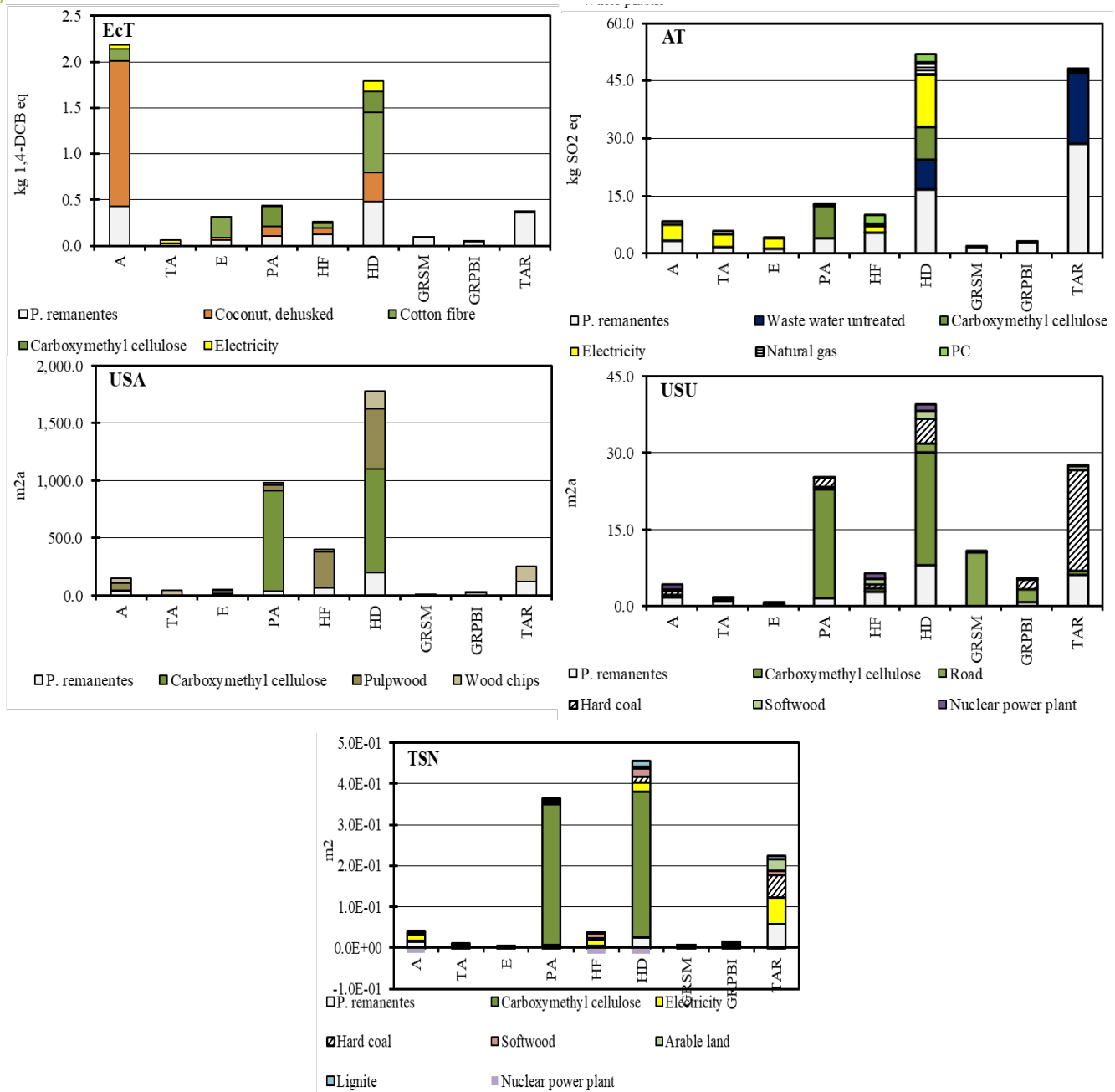


Figura 7. Contribución de proceso para los impactos sobre la calidad de los ecosistemas naturales



### **5.3.3.10 Agotamiento de agua**

Para el AA, la asistencia renal artificial presentó un impacto positivo, pues el agua requerida en el servicio renal es devuelta al sistema con una carga menor de contaminación (Figura 8-AA). Es importante mencionar que para esta categoría de impacto es conveniente analizar el impacto con enfoque de “Huella hídrica”, pues los resultados que arroja el perfil hídrico aportan información confiable al emplear índices de estrés hídrico locales y perfiles de contaminación ambiental con unidades especializadas en toxicidad ambiental y humana (CTU-Unidades comparativas toxicológicas).

### **5.3.3.11 Agotamiento de recursos fósiles y minerales**

Sobre el agotamiento de recursos el método *ReCiPe Midpoint (H) V1.13* cuenta con dos categorías de impacto: agotamiento de recursos fósiles (ARF) y el agotamiento de recursos minerales (ARM). Sobre el ARF, la asistencia renal artificial requiere aproximadamente 7.7 t de oil eq (toneladas de petróleo crudo equivalentes). La HD y el TAR fueron las etapas que concentraron la mayor parte del impacto en esta categoría. Los procesos unitarios más importantes fueron los implicados en la producción y extracción de materias primas tales como la celulosa (*Carboxymethyl cellulose*), el carbono (*Hard coal*), la lignita (*Lignite*) y el petróleo crudo (*Petroleum*) (Figura 8-ARF)

Finalmente para el ARM, la asistencia renal artificial demanda aproximadamente 274.4 kg de Fe eq (kg de Hierro equivalentes). La HD, el PA y la A fueron las etapas que concentraron la mayor parte del impacto en ARM y las variables implicadas fueron la Cromita (*Chromite ore*), el Cinc (Zn) y el Manganeseo (Mn) (Figura 8-ARM).

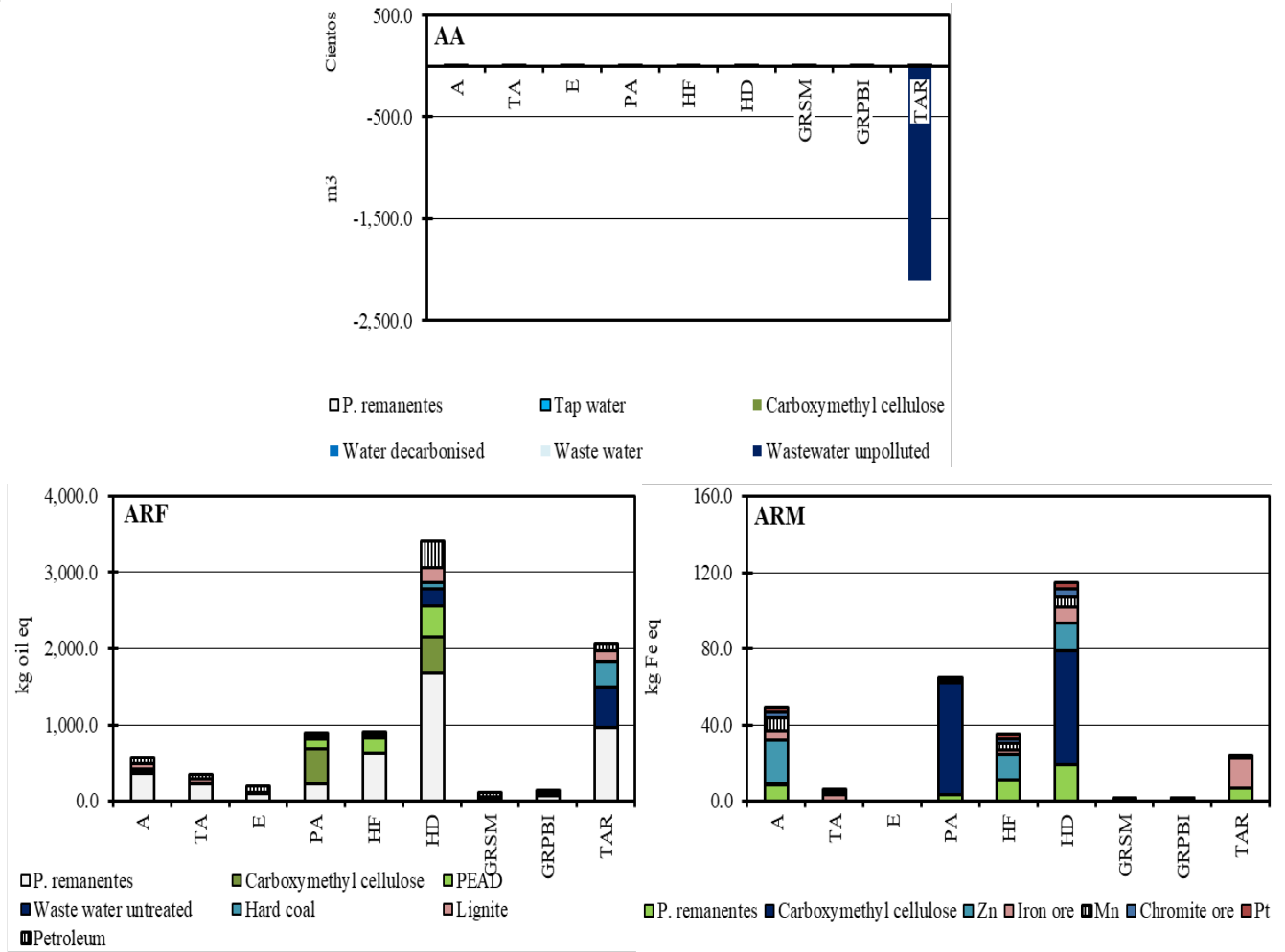


Figura 8. Contribución de proceso para los impactos sobre la disponibilidad de recursos



## 5.4 Interpretación del impacto del ciclo de vida

Los resultados presentados en este trabajo se centran en una primera evaluación del ciclo de vida de un servicio de asistencia renal artificial cuya terapia de reemplazo es la HD. Con base en los datos, suposiciones, criterios de asignación y los límites del sistema considerados, el servicio renal concentró la mayor parte del impacto ambiental del sistema-producto analizado.

En las siguientes secciones, se discutirá la relevancia de las variables más representativas sobre del impacto ambiental y se analizará su importancia con un análisis de incertidumbre para finalmente presentar las conclusiones, recomendaciones y limitaciones del ACV realizado.

### 5.4.1 Identificación de aspectos significativos sobre el impacto ambiental

La EICV reveló que los procesos importantes fueron: HD, PA, HF y TAR, pues concentraron la mayor parte del impacto ambiental. Este hecho es explicado con el análisis de contribución por proceso unitario. La Tabla 9, presenta las principales variables relacionadas con los impactos ambientales del ciclo de vida de la asistencia renal artificial. Se observa que el ciclo de vida de los compuestos químicos a base de celulosa (*Carboxymethyl cellulose, powder*), presentes en la solución concentrada para la HD, así como el TAR descargadas durante el servicio renal (*Waste water untreated, slightly organic and anorganic contaminated*) fueron las principales variables implicadas en el impacto ambiental global de la asistencia renal artificial.





Tabla 9. Principales variables de impacto ambiental del ciclo de vida de la asistencia renal artificial

Variables significativas	Categoría	Etapas	Proceso	Impacto (% de contribución)
<i>Waste water untreated, slightly organic and anorganic contaminated</i>	CC	Fin de vida	TAR	12,502 kg CO <sub>2</sub> eq (31)
<i>Polyvinylidenechloride, granulate {RoW}  production</i>	ACO	Servicio renal	HF	0.0077 kg CFC-11 eq (71)
<i>Spent nuclear fuel {RoW}  treatment of, reprocessing</i>	RI	Servicio renal	HD	819.3 K bq U <sub>235</sub> eq (47)
<i>Waste water untreated, slightly organic and anorganic contaminated</i>	FOF	Fin de vida	TAR	26.7 kg NMVOC eq (26)
<i>Electricity, high voltage {MX}  electricity production</i>	FMP	Servicio renal	HD	13.7 kg PM <sub>&lt;10µm</sub> eq (19)
<i>Carboxymethyl cellulose, powder {RoW}  production</i>	TH	Servicio renal	PA	386.7 kg 1,4-DB eq (21)
<i>Waste water untreated, slightly organic and anorganic contaminated</i>	AT	Fin de vida	TAR	26.2 kg SO <sub>2</sub> eq (18)
<i>Natural gas, unprocessed, at extraction {GLO}  production</i>	EcAF	Servicio renal	HD	11.11 kg 1,4-DB eq (33)
<i>Hazardous waste, for incineration {RoW}  treatment of hazardous waste, incineration</i>	EcM	Fin de vida	GRPBI	5.0 kg 1,4-DB eq (17)
<i>Coconut, dehusked {PH}  coconut production, dehusked</i>	EcT	Servicio renal	A	1.4 kg 1,4-DB eq (25)
<i>Spoil from lignite mining {GLO}  treatment of, in surface landfill</i>	EAF	Servicio renal	GRSM	0.6 kg N eq (44)
<i>Waste water untreated, slightly organic and anorganic contaminated</i>	EM	Fin de vida	TAR	3.8 kg N eq (41)
<i>Carboxymethyl cellulose, powder {RoW}  production</i>	USA	Servicio renal	PA	1,785.7 m <sup>2</sup> a (48)
<i>Carboxymethyl cellulose, powder {RoW}  production</i>	TSN	Servicio renal	PA	0.7 m <sup>2</sup> a (62)
<i>Carboxymethyl cellulose, powder {RoW}  production</i>	USU	Servicio renal	PA	43.8 m <sup>2</sup> (32)
<i>Wastewater, unpolluted {RoW}  treatment of, capacity 5E9l/</i>	AA	Fin de vida	TAR	-210119.5m <sup>3</sup> (-100)
<i>Carboxymethyl cellulose, powder {RoW}  production</i>	ARM	Servicio renal	PA	119.2 kg Fe eq (40)
<i>Carboxymethyl cellulose, powder {RoW}  production</i>	ARF	Fin de vida	TAR	926.1 kg oil eq (18)

Elaboración propia a partir de contribución de proceso Método ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H



### 5.4.2 Análisis de influencia

El análisis de influencia consiste en una evaluación subjetiva de la posibilidad de interferir sobre las variables implicadas en el impacto ambiental. Se basa en la revisión sistemática de la unidad funcional, el alcance, los criterios de cohorte y asignación, así como los resultados del ICV y la EICV, comparando opciones de mejora del sistema para fortalecer las conclusiones del estudio.

La Tabla 10, presenta el análisis de influencia de los procesos unitarios del sistema-producto. El análisis divide las oportunidades de mejora según el grado de influencia A, B, y C, dependiendo del alcance de la organización. El grado de influencia va desde la mejora de la infraestructura, hasta la revisión y/o implementación de sistemas de gestión de calidad del servicio que se oferta en la unidad.

Las oportunidades de mejora según el grado de influencia “A”, se encuentran en los procesos unitarios: HD, PA, A, E y la GRSU. El grado de influencia “B” se tiene sobre los procesos unitarios: HF y TA, pues estas áreas implican una inversión y/o modificación de su infraestructura y equipos. Finalmente el grado de influencia “C”, le corresponde a los procesos unitarios: TM, el TAR y la GRPBI, sobre los cuales no se tiene una influencia directa y el alcance de la organización es insuficiente para reducir el impacto ambiental derivado.

De acuerdo con el análisis de influencia, se generó un escenario hipotético para analizar el desempeño ambiental y económico de las oportunidades de mejora. Las características del escenario hipotético se presentan en la Tabla 11.



Tabla 10. Análisis de influencia de la asistencia renal artificial

Etapa o proceso unitario	Impacto ambiental (%)	Grado de influencia	Acción
TM	0.6	C	El transporte de materiales no se encuentra alcance de la organización.
HD	35.8	A	La organización debe monitorear el su sistema de gestión de calidad para asegurar el uso responsable de los materiales y equipos de este proceso.
PA	8.5	A	La organización debe monitorear el su sistema de gestión de calidad para asegurar el uso responsable de los materiales y equipos de este proceso.
HF	7.6	B	La organización debe invertir en la adquisición de equipamiento para reducir la descarga de aguas, así como los productos químicos empleados para la limpieza de los filtros higienizados.
A	4.7	A	La organización debe monitorear el su sistema de gestión de calidad para asegurar el uso responsable de los materiales y equipos de este proceso.
TA	3.7	B	La organización debe invertir en la modificación de su infraestructura y equipamiento para reducir la cantidad de energía requerida y el agua de rechazo del sistema de tratamiento actual.
E	1.5	A	La organización debe monitorear el su sistema de gestión de calidad para asegurar el uso responsable de los materiales y equipos de este proceso.
TAR	34.1	C	El tratamiento de AR corre por parte del Estado, sin influencia de la organización.
GRPBI	3.0	C	La gestión de RPBI se encuentra a cargo de una entidad externa especializada.
GRSM	0.7	A	La organización puede implementar un sistema de gestión de RSU (separación y reciclaje).

A = Grado de influencia alto: el alcance de la organización presenta grandes posibilidades (infraestructura, materia prima, economía) para reducir su impacto ambiental

B = Grado de influencia media: el alcance de la organización tiene posibilidades de influir o reducir su impacto ambiental

C = Grado de influencia bajo: la posibilidad de influir o reducir el impacto ambiental no está al alcance de la organización.



Tabla 11. Escenarios hipotéticos para la mejora del desempeño ambiental de la asistencia renal artificial

Etapa	Escenario hipotético
HD	SGC para disminuir un 10% del uso de materiales (materiales médicos, de curación y medicinas) para la HD
PA	SGC para disminuir un 5% los materiales para producir la solución concentrada para HD.
HF	Adquisición de una máquina de lavado automática de filtros dializadores. Reemplazo del cloro por el ácido per-acético al 0.02% para la esterilización de los filtros.
A	SGC para disminuir un 10% el uso de materiales de oficina y 10% de los materiales de mantenimiento Capacitación e implementación de buenas prácticas de uso eficiente de energía Reemplazo de iluminación por tecnología LED Adquisición de 5 juegos de sanitarios y lavamanos ahorradores de agua Adquisición de paneles solares
TA	Adquisición de un sistema de osmosis inversa con eficiencia del 75% y modificación de la infraestructura
E	SGC para disminuir un 10% uso de materiales para esterilizar.



### 5.4.3 Análisis de incertidumbre

Se revisaron tres tipos de incertidumbre empleando la Matriz de Pedigree y el análisis de Monte Carlo. El primer análisis fue para evaluar la calidad y variabilidad de los datos del ICV, el segundo para evaluar la consistencia de los resultados con respecto al método de EICV y el tercero, para analizar los escenarios de mejora propuestos a partir del análisis de influencia.

#### 5.4.3.1 Incertidumbre sobre la calidad y variabilidad del inventario de ciclo de vida

Se analizó cada entrada y salida del ICV para determinar el tipo de distribución de incertidumbre de cada dato. Se eligieron tres tipos de distribución:

- “*Lognormal*” esta se determina a partir del análisis de calidad de los datos con la Matriz de Pedigree.
- “*Normal*” al considerar que los datos siguen una distribución Gaussiana, empleando la media aritmética y su desviación estándar.
- “*Triangular*” se utiliza cuando los datos se encuentran dentro de un rango mínimo y máximo y o necesariamente corresponden a la media o mediana.

Una vez determinada la distribución de incertidumbre en todo el ICV, se corrió el análisis de Monte Carlo el cual evalúa la variabilidad de los datos y modela 1,000 ejecuciones del impacto ambiental empleando los coeficientes generados a partir de las distribuciones de incertidumbre. En la Tabla 13 se observan los resultados globales de la incertidumbre del ICV. Las categorías de impacto en toxicidad (EcM, EcAF) y eutrofización (EAF) presentaron un coeficiente de variación (CV) de entre 42 y 45%, el CV de la TH fue de un 67% y sobre la RI de un 71%.



Sin embargo, las únicas categorías cuya incertidumbre fue significativa para un intervalo de confianza del 95% fueron la TSN y el AA, lo que puede atribuirse a la incertidumbre de los modelos de caracterización del método empleado para la EICV.

Tabla 12. Análisis de incertidumbre con respecto al inventario de ciclo de vida

Categoría de impacto	Unidad	EICV	DE	CV (%)
CC	kg CO <sub>2</sub> eq	42146.7	941.9	2.2
ACO	kg CFC-11 eq	0.0	0.0	4.3
FMP	kg PM <sub>&lt;10um</sub> eq	61.1	4.0	6.6
FOF	kg NMVOC	105.2	3.6	3.4
TH	kg 1,4-DB eq	5812.1	3884.1	66.8
RI	kBq U <sub>235</sub> eq	2801.4	1986.1	70.9
AT	kg SO <sub>2</sub> eq	135.5	6.4	4.8
EcT	kg 1,4-DB eq	5.4	1.1	19.9
EcM	kg 1,4-DB eq	292.5	128.8	44.0
EcAF	kg 1,4-DB eq	262.6	111.3	42.4
EAF	kg P eq	6.7	3.0	45.3
EM	kg N eq	13.6	1.0	7.6
TSN*	m <sup>2</sup>	0.7	7.5	1012.5
USA	m <sup>2</sup> a	3453.7	407.4	11.8
USU	m <sup>2</sup> a	108.2	18.0	16.6
AA*	m <sup>3</sup>	1042.5	16586.4	1591.1
ARF	kg oil eq	7713.5	384.6	5.0
ARM	kg Fe eq	275.8	23.8	8.6

\*Incertidumbre significativa al 95% de intervalo de confianza



#### ***5.4.3.2 Incertidumbre con respecto al método de evaluación de impacto***

La incertidumbre con respecto al método de EICV sirve para analizar la representatividad de los resultados con respecto a otros modelos de caracterización. Dado que el análisis de incertidumbre con respecto al ICV arrojó resultados variables considerablemente sobre las categorías de impacto de TSN y AA, es importante conocer qué resultados arrojan otros métodos. Por esta razón el análisis de Monte Carlo se corrió con los métodos ReCiPe 2008 y 2016, así como el método IMPACT 2002+.

La Figura 9 presenta la comparación de la incertidumbre de acuerdo con el método de EICV. Los resultados muestran consistencias en los resultados de la EICV respecto a los distintos modelos de caracterización, presentando ligeras variaciones. Se observan también resultados inconsistentes, mostrando amplias fluctuaciones en los resultados de las categorías de RI, el ACO, la EcT, EcM y la AT. Esto se puede explicar debido a que los métodos elegidos cuentan con diferentes indicadores categorías y consideran un mayor o menor número de sustancias en sus modelos de caracterización, principalmente sobre las categorías de toxicidad y acidificación.

Con respecto a las categorías TSN y AA, ReCiPe 2008 y ReCiPe 2016 no reflejaron diferencias en la incertidumbre sobre estas categorías y el método IMPACT 2002+ no analiza estas categorías. Es conveniente manejar los resultados sobre la TSN y el AA de manera conservadora y no generalizar los resultados a cualquier otro sistema. La Tabla 13 presenta mayor información sobre los resultados de la EICV y la incertidumbre asociada.

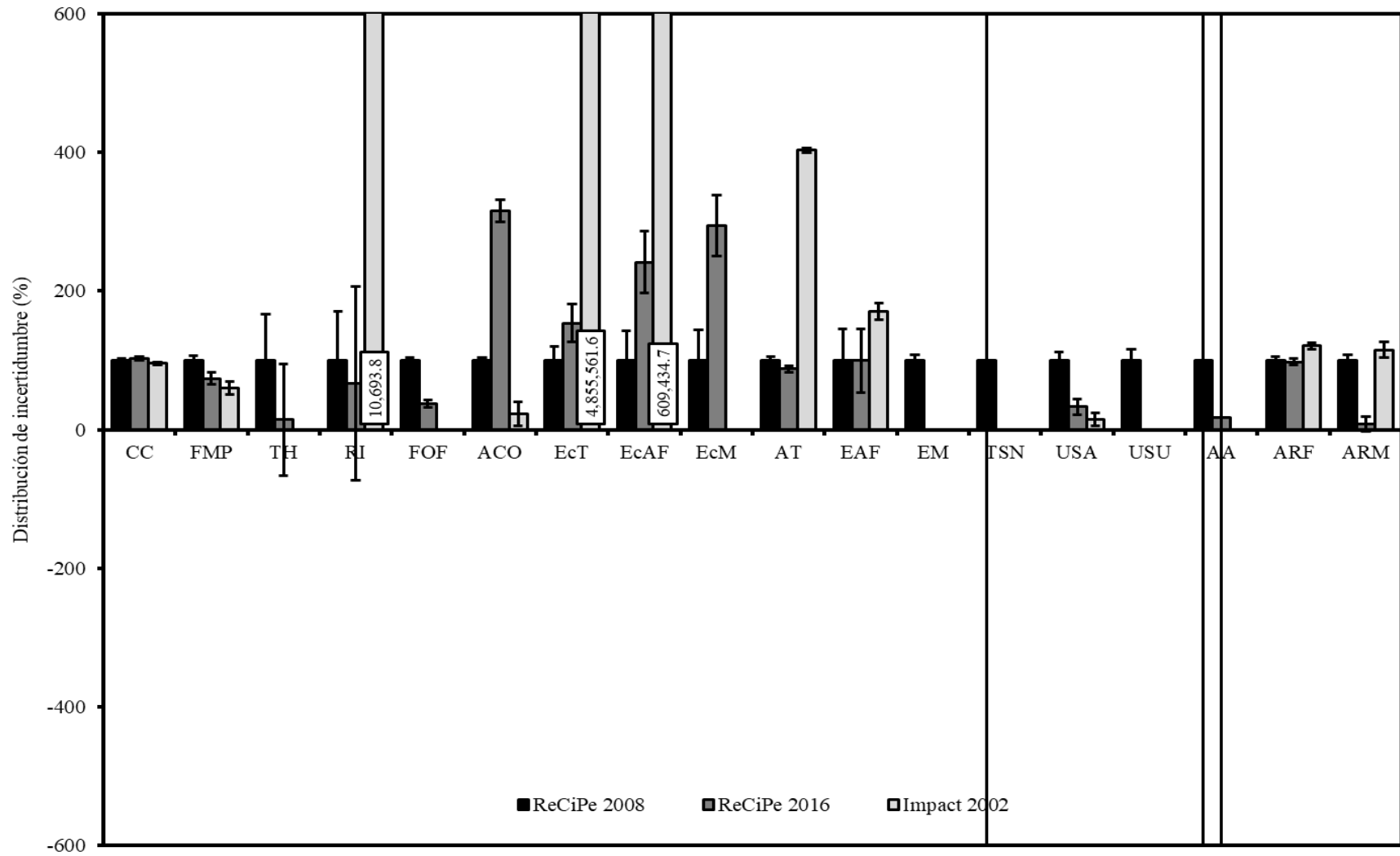


Figura 9. Análisis de incertidumbre con respecto al método de evaluación de impacto de ciclo de vida





Tabla 13. Comparación de la incertidumbre entre los métodos de evaluación de impacto de ciclo de vida

ReCiPe 2008	Unidad	EICV	CV	ReCiPe 2016	Unidad	EICV	CV	Impact 2002+	Unidad	EICV	CV
CC	kg CO <sub>2</sub> eq	42146.7	2.2	CG	kg CO <sub>2</sub> eq	43222.1	2.5	CG	kg CO <sub>2</sub> eq	40250.5	2.5
FMP	kg PM10 eq	61.1	6.6	FMP	kg PM2.5 eq	45.2	8.3	RIn	kg PM2.5 eq	37.1	9.3
TH	kg 1,4-DB eq	5812.1	66.8	TH-C	kg 1,4-DBC eq	823.4	81.0	ROr	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	7.5	5.2
RI	kBq U <sub>235</sub> eq	2801.4	70.9	TH-nC	kg 1,4-DBC eq	534933.0	57.8	C	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	1011.0	19.2
FOF	kg NMVOC	105.2	3.4	RI	kBq Co-60 eq	1865.7	139.8	nC	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	1435.5	3.2
ACO	kg CFC-11 eq	0.0	4.3	FO-SH	kg NO <sub>x</sub> eq	39.7	5.6	RI	Bq C-14 eq	299580.1	68.0
EcT	kg 1,4-DB eq	5.4	19.9	FO-ET	kg NO <sub>x</sub> eq	41.1	5.5	DCO	kg CFC-11 eq	0.0	17.4
EcAF	kg 1,4-DB eq	262.6	42.4	AOE	kg CFC11 eq	0.0	16.0	EcT	kg TEG soil	264346.1	10.3
EcM	kg 1,4-DB eq	292.5	44.0	EcT	kg 1,4-DCB e	8.4	27.2	EcA	kg TEG water	1.6E6	24.0
AT	kg SO <sub>2</sub> eq	135.5	4.8	EcAF	kg 1,4-DCB e	634.7	44.4	AT	kg SO <sub>2</sub> eq	546.3	2.8
EAF	kg P eq	6.7	45.3	EcM	kg 1,4-DBC e	862.5	44.0	AAc	kg SO <sub>2</sub> eq	151.4	4.4
EM	kg N eq	13.6	7.6	AT	kg SO <sub>2</sub> eq	118.6	5.2	EA	kg PO <sub>4</sub> P-lim	11.4	11.9
TSN	m <sup>2</sup>	0.7	1012.5	EAF	kg P eq	6.7	46.0	US	m <sup>2</sup> org.arable	509.0	9.1
USA	m <sup>2</sup> a	3453.7	11.8	US	m <sup>2</sup> a crop eq	1174.6	10.9	EnR	MJ primary	389895.8	4.6
USU	m <sup>2</sup> a	108.2	16.6	CA	m <sup>3</sup>	180.5	9779.8	ExRM	MJ surplus	318.1	11.8
AA	m <sup>3</sup>	1042.5	1591.1	ERF	kg oil eq	7527.1	4.8				
ARF	kg oil eq	7713.5	5.0	ERM	kg Cu eq	22.0	10.4				
ARM	kg Fe eq	275.8	8.6								



### ***5.4.3.3 Incertidumbre con respecto al análisis de influencia***

La comparación de incertidumbre entre el modelo actual y el escenario hipotético, reveló que las acciones propuestas en la Tabla 12 mejorarían el desempeño ambiental del sistema-producto. En la Figuras 11, se muestra la comparación ambiental entre el escenario actual (A) y el escenario hipotético (B). De acuerdo con el análisis, el escenario A presentó un mayor impacto ambiental con respecto al escenario B en las categorías de impacto USU, AT, FOF, FMP, EM, EcM, RI, TH, EAF, EcAF, ARF y CC, siendo estadísticamente significativas al 95%.

De esta manera se determina que las acciones propuestas en el escenario B reducen significativamente el impacto ambiental de la asistencia renal artificial, con excepción de la categoría de AA, donde el impacto es significativamente mayor en el escenario B.

En el Capítulo III de este trabajo se analizará detalladamente el comportamiento ambiental del escenario propuesto, adicionando una evaluación económica de los impactos ambientales, así como los potenciales ahorros económicos y su viabilidad financiera con enfoque de costo-beneficio.

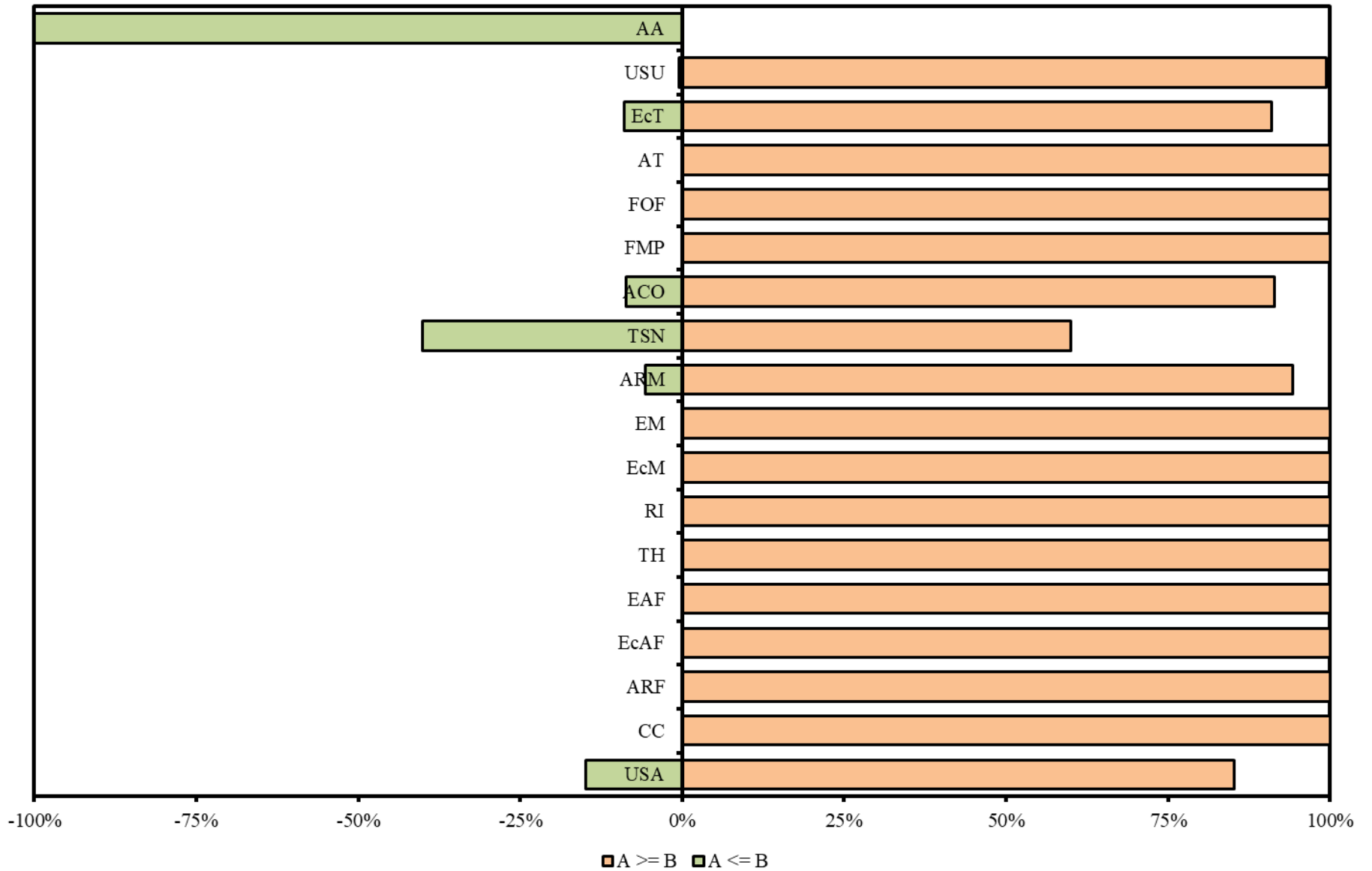


Figura 10. Comparación del impacto ambiental. Escenario actual vs escenario de mejora ambiental



#### 5.4.4 Conclusiones del análisis de ciclo de vida

A partir de los resultados de la EICV y los análisis de contribución, influencia e incertidumbre se puede concluir que:

- La asistencia renal artificial representa un impacto ambiental diversificado en categorías de daño sobre la salud, ecosistemas y recursos naturales y aunque la investigación solo se ha enfocado en conocer su impacto al cambio climático (Connor et al. 2010; 2011 Lim et al. 2013; Chen et al. 2016b), los demás impactos derivados de un enfoque de ciclo de vida también son importantes y deben ser considerados en el futuro.
- Según la magnitud del impacto, la asistencia renal artificial presentó mayores repercusiones ambientales hacia el agua, particularmente sobre la EcAF y EM. Por otra parte, sobre el agotamiento de agua la asistencia renal potencialmente requiere la misma cantidad de agua que demandarían entre 30 y 50 casas-habitación  $\text{mes}^{-1}$ , por lo que sería necesario analizar la viabilidad de los servicios renales con un enfoque de huella hídrica con los índices de estrés hídrico para México.
- Sobre la calidad de los resultados, el método seleccionado representa una aproximación adecuada al impacto ambiental que representaría un servicio de asistencia renal. Aunque los resultados mostraron ligeras variaciones entre métodos, también se identificaron resultados consistentes entre otros mecanismos y factores de caracterización empleados por *ReCiPe Midpoint 2008, 2016* e *IMPACT 2002+*.
- Sobre el grado de influencia en el impacto ambiental, la modelación del impacto bajo los escenarios de la Tabla 12 ha revelado que con la implementación de las acciones de mejora, se logra la reducción del impacto ambiental en un 15% con respecto al



escenario base, consiguiendo además un potencial beneficio económico al reducir los costos ambientales de la asistencia renal artificial.

- Aunque es compleja la aplicación del ACV en la EIA de los servicios, esta herramienta es flexible y su utilización favorece la planificación y formulación de políticas públicas que adecuen la práctica médica hacia una gestión sustentable.

#### **5.4.5 Limitaciones y recomendaciones del análisis de ciclo de vida**

El presente estudio se limita en:

- No fue posible agregar información de fondo en el estudio pues se carece de datos sobre las materias primas de los materiales empleados en el servicio renal y la manufactura de los mismos, etapas que pueden interferir e incrementar en los resultados de la EICV presentados. Este vacío en la información, puede ser resuelto generando un ICV de los materiales empleados dentro de los servicios de salud.
- El perfil de impacto ambiental estimado, no puede generalizarse a todos los sistemas de atención renal debido a que se desconocen las condiciones y la operación de los procesos unitarios de un servicio de HD. Esta limitante puede ser cubierta ampliando el universo de estudio, considerando una mayor cobertura geográfica de los datos.
- El uso de los modelos de caracterización no genera resultados exactos del impacto ambiental a diferencia de la medición *in-situ*. Sin embargo los resultados ofrecen un panorama o aproximación al impacto ambiental relacionado a un servicio renal. Al contar con múltiples métodos de EICV y modelos de caracterización, la estimación del impacto ambiental es más práctica y con un enfoque de ciclo de vida, la interpretación del impacto ambiental puede ser la más adecuada.



# **CAPÍTULO III.**

# **EVALUACIÓN DE COSTOS**

# **AMBIENTALES**

- **PERFIL SOCIOECONÓMICO PARA LA ASISTENCIA RENAL ARTIFICIAL**
- **ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO PARA EL IMPACTO AMBIENTAL DE LA ASISTENCIA RENAL ARTIFICIAL**



## **6. EVALUACIÓN DE COSTOS AMBIENTALES**

En esta sección se analizarán los costos ambientales y sociales de la asistencia renal artificial. Para esto, el presente capítulo se divide en dos: perfil socio-económico de los pacientes con ERC y el análisis costo beneficio para las alternativas de disminución de los impactos ambientales derivados de la asistencia renal artificial.

### **6.1 Perfil socioeconómico de la asistencia renal artificial**

Se realizó un estudio socioeconómico para identificar las variables relacionadas con la demografía, educación, ocupación, ingresos, el estado de salud y los gastos derivados de los pacientes con ERC. Para tal hecho, se levantó una encuesta de 15 preguntas de opción múltiple con base en los indicadores sociales y educativos del INEGI (2010), demográficos de CONAPO (2013) y de atención a la salud (Silva, M. Brain 2006).

#### **6.1.1 Desarrollo del análisis socioeconómico**

##### ***6.1.1.1 Descripción de la muestra***

La muestra fue seleccionada aleatoriamente entrevistando a los pacientes y/o acompañantes presentes en la unidad renal de estudio. Los criterios de inclusión para responder la encuesta fueron: pacientes o familiares directos de los pacientes (hijos, hermanos, conyugue), o cualquier otro acompañante que conozca los antecedentes, el estado de salud y la atención a HD del enfermo, al menos en los últimos tres años. El levantamiento de la encuesta se realizó durante la última semana de noviembre y la primera semana de diciembre de 2017.

##### ***6.1.1.2 Variables de estudio***

Las variables se agruparon en tres apartados:

- Condiciones sociodemográficas: incluye información sobre el sexo, edad, el nivel educativo, ocupación y vivienda de los pacientes con ERC.
- Situación económica: incluye información sobre los ingresos económicos y los gastos asociados con la atención de la enfermedad.
- Situación de salud: incluye la información relevante sobre la antigüedad del padecimiento y su tratamiento y la protección de su salud mediante la seguridad social.

### 6.1.2 Resultados del perfil socioeconómico

#### 6.1.2.1 Condiciones sociodemográficas

Se entrevistó a un total de 9 pacientes y 34 acompañantes, lo que corresponde a un 55% de los pacientes atendidos en la unidad (total de pacientes atendidos por mes 81). La mayoría de los pacientes (Fc=27) fueron mujeres y según la edad el 63% (Fc=27) fueron mayores de 60 años, con un rango que oscila entre los 14 y 79 años de edad (Figura 11).

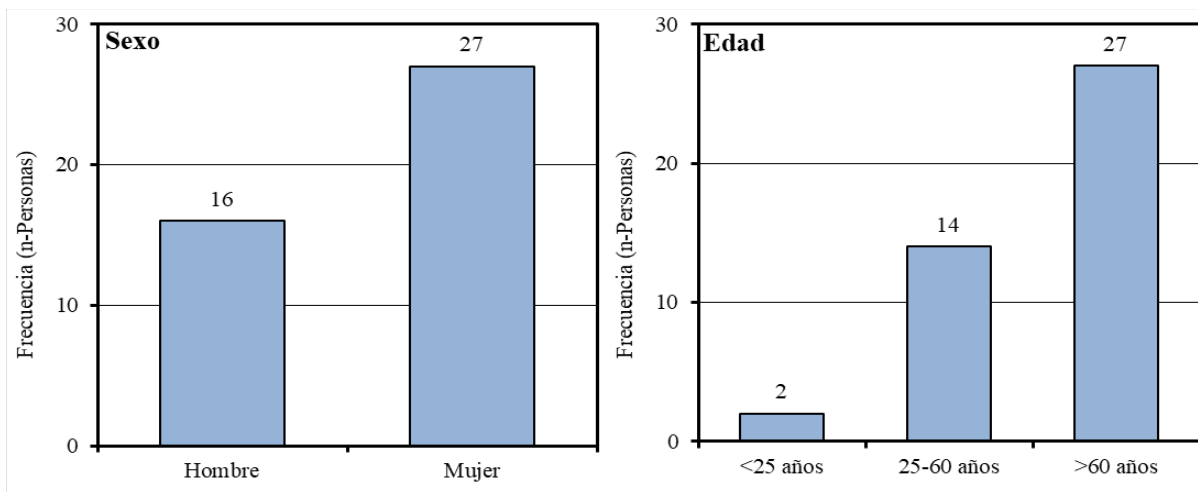


Figura 11. Condiciones socio-demográficas. Edad y sexo

Se identificó una escolaridad media de 8.4 años, siendo la educación básica (primaria y secundaria) la que prevaleció con el 63% (Fc=27), además de un 21% (Fc=9) que reportó



no haber acreditado algún nivel educativo (Figura 12-Educación). En cuanto a las actividades laborales, el 49% de los pacientes se dedican a las actividades primarias como el campo, artesanías y albañilería. El 7% (Fc=3) cuentan con un negocio propio y el 5% (Fc=2) cuentan con alguna profesión. El 40% (Fc=17) reportó haber dejado de trabajar a causa de su enfermedad (Figura 12-Ocupación).

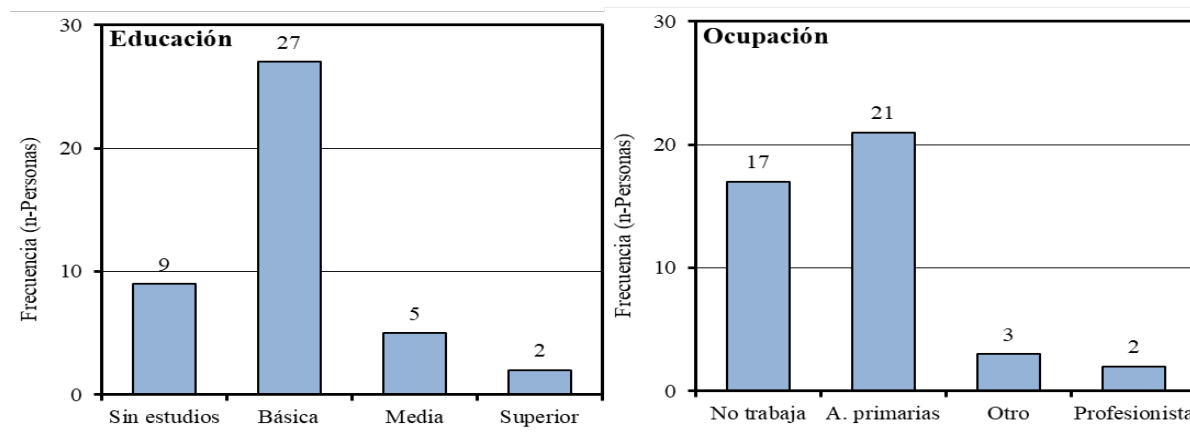


Figura 12. Condiciones socio-demográficas. Educación y ocupación

De los pacientes atendidos, el 63% (Fc=27) viajan a la ciudad de Morelia, Mich., para atender su enfermedad, proviniendo de localidades cercanas a la ciudad, tales como: Charo, Álvaro Obregón, Maravatío, Indaparapeo, entre otros.

Sobre la vivienda, el 80% de los pacientes cuenta con casa propia, aunque el 50% vive en hacinamiento reportando habitar con más de cuatro personas en su vivienda. Así mismo, el 93% de los encuestados han referido contar con todos los servicios básicos (agua potable, electricidad, drenaje, calles pavimentadas y transporte público, entre otros), además de contar con lo mínimo indispensable para subsistir en su vivienda como televisión, refrigerador, cocina y baños (Figura 13)

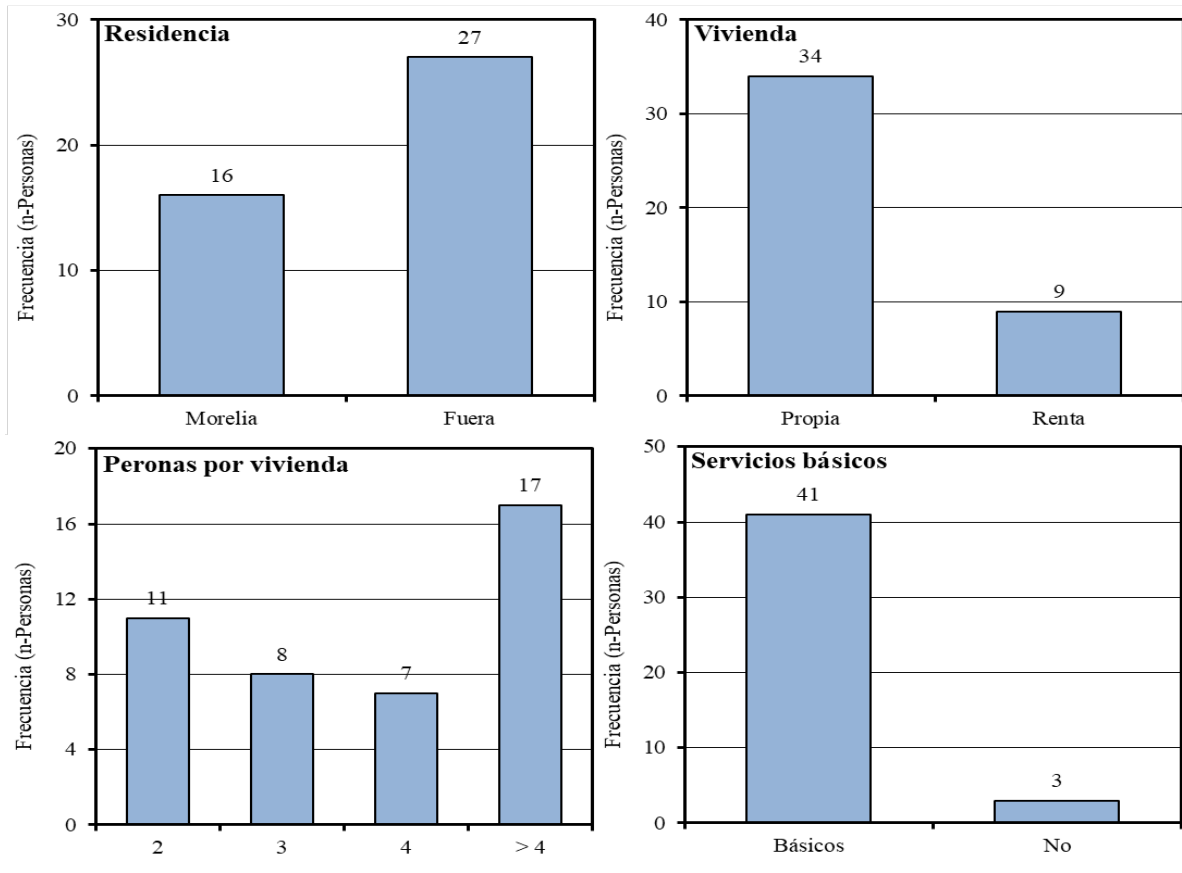


Figura 13. Condiciones socio-demográficas. Residencia y condiciones de vivienda

### 6.1.2.2 Situación económica

Del 61% (Fc=26) de los pacientes que aún trabajan, el ingreso medio reportado fue de \$4,925.00 ( $\pm$  \$2,681.69 n=20). Sin embargo, este ingreso es insuficiente para cubrir el costo total de la atención a su enfermedad el cual oscila entre \$9,000.00 a \$20,000.00 dependiendo del régimen de terapias mensuales. Por esta razón, se ha identificado que el gasto en la asistencia renal, en la mayoría de los casos es un gasto compartido en familia y en algunos casos se ha reportado haber recurrido a préstamos bancarios como alternativa de financiamiento de la atención a hemodiálisis de su familiar (Figura 14).

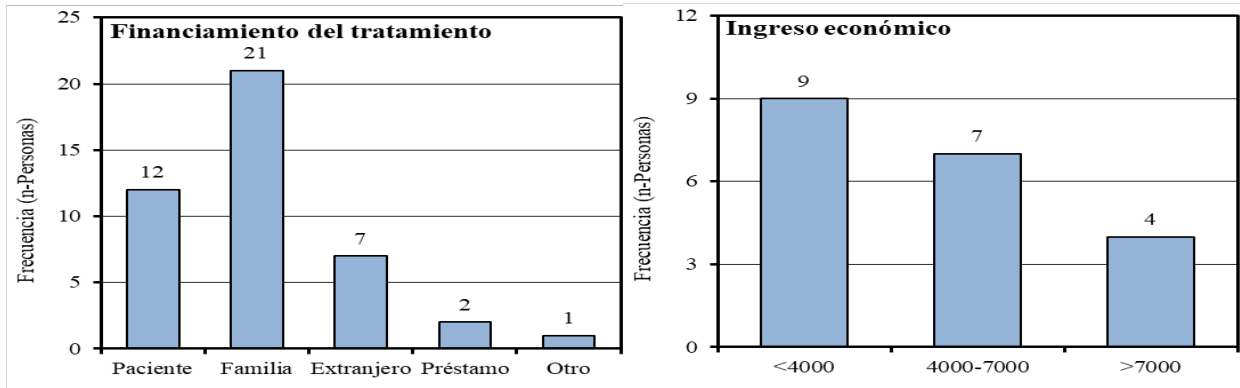


Figura 14. Situación económica. Ingreso mensual y financiamiento del tratamiento

En cuanto a los gastos para el tratamiento de la enfermedad renal, los costos se distribuyen en transporte, materiales médicos y medicamentos, así como la terapia renal artificial (HD). Cabe mencionar que la terapia renal es el rubro de mayor costo, y que en caso de los pacientes que tienen que emigrar, el transporte incluye un incremento considerable en los costos del tratamiento (Figura 16).

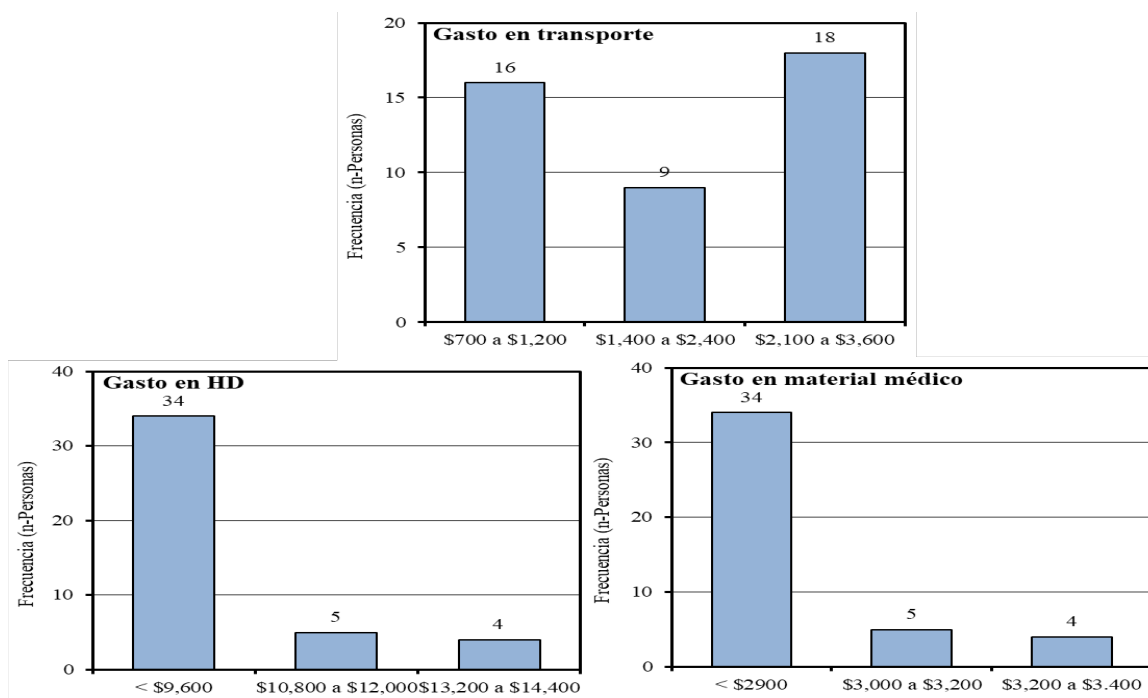


Figura 15. Situación económica. Gastos para el tratamiento de la enfermedad renal crónica

### 6.1.2.3 Situación de salud

El 93% cuenta con algún tipo de seguridad social, siendo el seguro popular la modalidad de protección social más común entre los pacientes atendidos. De acuerdo con la antigüedad del tratamiento, la mayoría de los pacientes (59%) entrevistados reportaron tener una asistencia renal mediante la HD mayor a un año, habiendo padecido de ERC durante un tiempo mayor. Finalmente, con respecto al régimen actual de tratamiento se observa que el 75% de los pacientes se realizan ocho o menos HD mes<sup>-1</sup> debido al costo del tratamiento. (Figura 16).

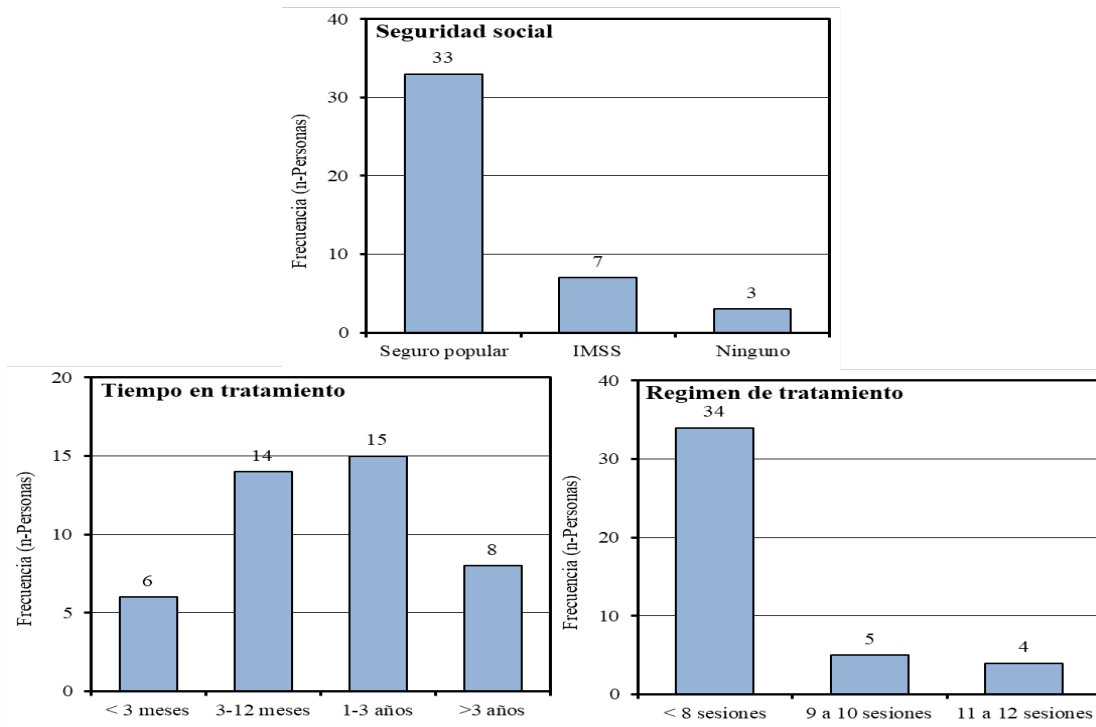


Figura 16. Situación de salud. Seguridad social, régimen y tiempo de tratamiento

### 6.1.3 Conclusión del perfil socioeconómico

La asistencia renal artificial mediante la HD es la terapia de reemplazo renal más común para el tratamiento de la ERC en México. Sin embargo, se carece de un perfil



epidemiológico de la ERC y se desconoce la cantidad de pacientes que requieren una terapia de reemplazo renal.

Con base en los resultados obtenidos en este perfil socioeconómico, se observa que la ERC afecta en mayor medida a la población con menores ingresos económicos, menor nivel educativo y carencias sociales como el acceso a programas sociales de protección a la salud. Aunque la mayoría de los pacientes entrevistados reportaron ser derechohabientes al seguro popular, este no ofrece una cobertura total al tratamiento de la ERC. El problema es aún mayor pues se carece de espacios en la SSA para asistencia renal, por lo que los pacientes recurren a atenderse en instituciones privadas.

Los costos del tratamiento de la ERC en una clínica renal privada superan los ingresos de un paciente promedio, y los pacientes no cuentan con un número de sesiones de HD que les permita mantener un estado de salud aceptable y sumado a la antigüedad de su enfermedad la ERC va deteriorando su salud y la economía familiar. Cabe mencionar que la expectativa de vida para un enfermo renal se ve estrechamente influenciada por el régimen de tratamiento, los hábitos alimenticios y la calidad del tratamiento, lo que se traduce en una reducción significativa de la expectativa de vida de los pacientes, pues el régimen al que están sometidos es el mínimo recomendado para seguir subsistiendo.

Es urgente cambiar la estrategia de control de las enfermedades crónicas y comenzar a pensar en estrategias sostenibles pues la incidencia de estas enfermedades terminará por quebrar al sistema de salud en México.



## 6.2 Análisis costo-beneficio de los impactos ambientales de la asistencia renal artificial

Se realizó un análisis de costo beneficio para las alternativas de disminución del impacto ambiental de la terapia renal artificial presentadas en el capítulo anterior. A continuación se describe la metodología desarrollada para el análisis.

### 6.2.1 Desarrollo del análisis costo-beneficio

#### 6.2.1.1 Determinación de los costos de la asistencia renal artificial

El análisis incluyó los costos que representa proporcionar un servicio de HD tales como: los costos de los materiales (MP), agua potable (A) y electricidad (E). La estimación de los costos ambientales se expresa en la Ecuación 4.

Ecuación 4. Costos ambientales de a asistencia renal artificial

$$C_{ARA} = \sum (C_{CA} + C_E + C_{MP})$$

Donde:

$C_{ARA}$ : Costos de la asistencia renal artificial

$C_{CA}$ : Costos netos del agua potables

$C_E$ : Costos netos de la energía eléctrica

$C_{MP}$ : Costos netos de la materia prima para el servicio renal

#### 6.2.1.2 Estimación y determinación de los costos de la asistencia renal artificial

Los costos del uso de agua y la electricidad fueron proporcionados por la administración de la clínica aportando las facturas y recibos originales. Los costos de la MP se consultaron de las páginas *web* de los proveedores, y se estimó el precio total de los materiales empleados paciente-mes<sup>-1</sup>. Esta consideración se basó en que las variables: consumo de agua ( $C_A$ ), generación de residuos peligrosos biológico-infecciosos ( $G_{RPBI}$ ) y generación de residuos sólidos urbanos ( $G_{RSU}$ ), presentaron una correlación de modesta a positiva con respecto a la

cantidad de pacientes ( $R^2 C_A = 0.9$ ;  $R^2 G_{RPBI} = 0.6$  y  $R^2 G_{RSU} = 0.4$ . Temporalidad 11 meses) (Figura 17).

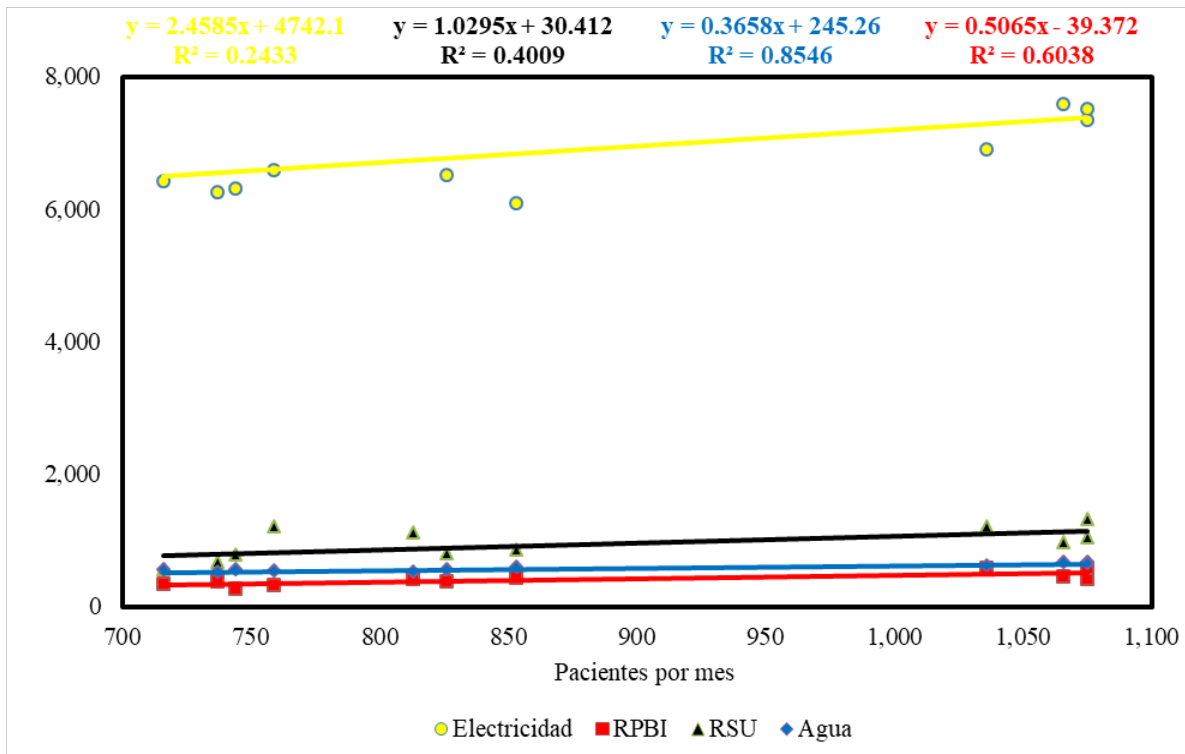


Figura 17. Correlación entre la cantidad de pacientes mes<sup>-1</sup> y las variables de estudio

Los costos estimados fueron ajustados empleando la inflación mensual correspondiente y de este modo se obtuvo el costo total de la MP. El ajuste de los precios se realizó con base en la Ecuación 5.

Ecuación 5. Cálculo del costo de los materiales

$$P_A = MP_{Se} \left( P_B \left( \frac{i}{100} \right) \right)$$

Donde:

$P_A$  Precio actual

$MP_{Se}$ : Materia prima en mes de septiembre

$P_B$ : Precio base

$i$ : Inflación mensual

### 6.2.1.3 Determinación de los beneficios de la asistencia renal artificial

Se determinaron dos tipos de beneficios:

**Beneficios económicos:** están relacionados con los ahorros económicos derivados de la mejora en las condiciones del servicio de HD (Ecuación 6).

Ecuación 6. Beneficios económicos de la asistencia renal artificial

$$B_{ARA} = \sum (A_{CA} + A_{CE} + A_{CMP})$$

Donde:

$B_{ARA}$ : Costos de la asistencia renal artificial

$A_{CA}$ : Ahorros en el costo del agua potables

$A_{CE}$ : Ahorros en el costo de la energía eléctrica

$A_{CMP}$ : Ahorros en el costo de la materia prima

Beneficios ambientales: relacionados con la disminución del impacto ambiental de la asistencia renal artificial (Ecuación 7).

Ecuación 7. Beneficios ambientales de la asistencia renal artificial

$$BA_{ARA} = \frac{(IA_1 - IA_2)}{(C_1 - C_2)}$$

Donde:

$BA_{ARA}$ : Beneficios ambientales de la asistencia renal artificial

$IA_1$ : Impacto ambiental 1 (inicial) para cada categoría de impacto

$IA_2$ : Impacto ambiental 2 (final) post-intervención para cada categoría de impacto

$C_1$ : Costo inicial netos de la materia prima para el servicio renal

$C_2$ : Costo final

### 6.2.1.4 Estimación de los beneficios de la asistencia renal artificial

*Beneficios económicos de la asistencia renal artificial*

Los beneficios económicos se determinaron a partir del diseño de distintos escenarios hipotéticos para la mejora y la eficiencia en el servicio renal. Se trata de diversas





intervenciones destinadas a la disminución de la cantidad de MP (Escenario 1), la reducción en el consumo de electricidad (Escenario 2) y la cantidad de agua (Escenario 3) en la unidad objeto de estudio (Tabla 14).

Tabla 14. Escenarios de mejora del desempeño ambiental de la asistencia renal artificial

	Acciones y beneficios esperados	Inversión
Escenario 1. MP	Consultoría en Sistema de Gestión de Calidad (SGC) ISO 90001. Reducción de un 5 al 10% del requerimiento de los materiales en:	
	A: material de oficina y mantenimiento-limpieza de la unidad	
	E: campos clínicos	\$75,000.00
	HF: soluciones de limpieza de filtros (formaldehído y cloro)	
	PA: polvos para solución dializadora (evitar el desperdicio) HD: medicinas, material médico y solución fisiológica	
Escenario 2 Energía eléctrica	Capacitación sobre buenas prácticas de uso eficiente de electricidad Disminución de un 4% del consumo de electricidad total.	\$18,500.00
	Reemplazo de esterilizador de calor seco: Disminución de un 1% el consumo de electricidad total	\$5,400.00 <sup>1</sup> .
	Reemplazo de luminarias fluorescentes por lámparas LEED Disminución de un 5% el consumo de electricidad total.	\$14,128.65 <sup>2</sup> .
	Reemplazo de la máquina de ósmosis inversa Incremento de un 1% del consumo de electricidad total.	\$88,100.00 <sup>3</sup> .
	Aadquisición de un kit fotovoltaico con 25 paneles solares <sup>4</sup> . Diminución de un 14% del consumo de electricidad total.	\$95,965.99, <sup>5</sup>
Escenario 3	Sistema de Gestión de la Energía ISO 50001. Disminución de hasta un 20% el consumo de electricidad total.	\$200,978.45
	Disminución de un 10% del consumo de agua para la limpieza de la clínica y	\$16,200.00 <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Precio de: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-622831712-esterilizador-lorma-en-calor-seco-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-622831712-esterilizador-lorma-en-calor-seco-_JM)

<sup>2</sup> Precio de: <http://www.homedepot.com.mx/comprar/es/coapa-del-hueso/empotrable-led-18-w>

<sup>3</sup> Precio de: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-555258156-equipo-de-osmosis-inversa-comercial-c-bomba-alta-eficiencia-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-555258156-equipo-de-osmosis-inversa-comercial-c-bomba-alta-eficiencia-_JM)

<sup>4</sup> Precio de: <https://www.monsolar.com/panel-solar-60-celulas.html>

<sup>5</sup> Precio de: <http://www.banxico.org.mx/portal-mercado-cambiario/>

Agua potable	la compra de cinco equipos de sanitarios ahorradores de agua	
	Disminución de un 4% el consumo de electricidad y su costo.	
	Compra de una máquina procesadora de filtros dializadores	\$36,000.00 <sup>7</sup> .
	Disminución de un 28% el consumo total de agua.	
	Compra de una máquina de ósmosis inversa	\$88,100.00 <sup>8</sup>
	Disminución de un 39% el consumo total de agua.	\$30,700.00 <sup>9</sup> .
	Implementación de todas las acciones para el ahorro del consumo de agua	\$173,000.00.
	Disminución de un 45% el consumo total de agua.	

Es importante mencionar que para la modelación de los escenarios se consideró que cada uno de ellos genera un cambio positivo y se ignora el comportamiento real de cada una de estas intervenciones, por lo que se deberá profundizar en la investigación futura sobre la aplicación de los escenarios propuestos.

#### *Beneficios ambientales de la asistencia renal artificial*

A partir de los escenarios planteados (Tabla 15), se modeló el comportamiento ambiental del ciclo de vida con cada una de las alternativas propuestas. De acuerdo con la cantidad invertida se signó el impacto ambiental disminuido, es decir por cada \$1,000.00 invertidos, se disminuyen 40 kg de CO<sub>2</sub> eq para el impacto al CC.

#### **6.2.1.5 Cálculo de la relación beneficio-costos**

Al estimar cada uno de los costos y cada uno de los beneficios esperados, todos los flujos de efectivo tanto de inversión (costos) como de ahorros (beneficios), fueron actualizados con la fórmula del VAN (Ecuación 2 ver Capítulo I), estableciendo así el valor actual de los costos (VAC) y el valor actual de los beneficios (VAB).

<sup>6</sup> Precio de: <http://www.homedepot.com.mx/comprar/es/coapa-del-hueso/sanitario-kenzo-dual-flush-blanco>

<sup>7</sup> Precio de: <http://www.medicaexpo.fr/prod/weilisheng-wesley-biotech/product-95761-596647.html>

<sup>8</sup> Precio de: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-555258156-equipo-de-osmosis-inversa-comercial-c-bomba-alta-eficiencia-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-555258156-equipo-de-osmosis-inversa-comercial-c-bomba-alta-eficiencia-_JM)

<sup>9</sup> Precio de: <http://www.homedepot.com.mx/comprar/es/coapa-del-hueso/cisterna-5000-l-nm-equipada>



Posteriormente se calculó la TIR y la relación C/B dividiendo el flujo neto de efectivo de los beneficios (VAB) entre el costo actualizado de la inversión (VAC) (Ecuación 1 ver Capítulo I).

## 6.2.2 Resultados del análisis de costos y beneficios económicos

### 6.2.2.1 Costos y beneficios potenciales del escenario 1. Materias primas

La Tabla 15, muestra el costo total de las en MP para el servicio de renal durante el periodo de estudio, así como el costo de la inversión y los beneficios generados. Se observa que la inversión en el escenario 1 es menor que la sumatoria total de los beneficios, lo que da una idea sobre la rentabilidad potencial de este escenario.

Tabla 15. Costos y beneficios económicos del escenario 1. Materias primas

Periodo	(Escenario base)	Inversión	
		Escenario 1 (SGC)	\$75,000.00
Agosto	\$491,178.28	\$474,540.13	\$16,638.15
Septiembre	\$656,999.53	\$634,176.41	\$22,823.12
Octubre	\$657,573.77	\$634,711.59	\$22,862.18
Noviembre	\$653,684.58	\$630,902.79	\$22,781.79
Diciembre	\$635,711.07	\$613,537.96	\$22,173.11
Enero	\$531,039.38	\$512,241.08	\$18,798.31
Febrero	\$464,331.68	\$447,840.20	\$16,491.48
Marzo	\$509,378.11	\$491,234.45	\$18,143.66
Abril	\$464,213.46	\$447,586.39	\$16,627.07
Mayo	\$479,480.90	\$462,265.46	\$17,215.44
Junio	\$453,194.67	\$436,887.13	\$16,307.54
Total	\$5,996,785.44	\$5,785,923.59	\$210,861.85



### 6.2.2.1 Costos y beneficios potenciales del escenario 2. Energía eléctrica

La Tabla 16, muestra el costo total en energía eléctrica para el periodo de estudio, así como el costo de cada intervención del escenario 2 y los beneficios generados. Se observa que solo la compra del esterilizador (E), genera un beneficio mayor que los costos, lo que hace pensar que la adopción de este escenario no sería la opción más rentable para la inversión y por consiguiente la mejora ambiental.

Tabla 16. Costos y beneficios económicos del escenario 2. Energía eléctrica

Periodo	Escenario base	Acciones del Escenario 2					
		EE	E	LED	SOIe	PVF	SGEn
Agosto	\$14,703.8	\$14,128.7	\$14,014.2	\$13,390.8	\$13,417.4	\$11,552.2	\$9,494.5
Septiembre	\$16,560.4	\$15,912.6	\$15,783.7	\$15,081.7	\$15,111.6	\$13,010.9	\$10,693.3
Octubre	\$16,942.1	\$16,279.4	\$16,147.5	\$15,429.3	\$15,459.9	\$13,310.8	\$10,939.8
Noviembre	\$17,102.5	\$16,433.5	\$16,300.4	\$15,575.3	\$15,606.3	\$13,436.8	\$11,043.3
Diciembre	\$15,593.7	\$14,983.7	\$14,862.3	\$14,201.3	\$14,229.5	\$12,251.4	\$10,069.1
Enero	\$13,757.4	\$13,219.3	\$13,112.2	\$12,529.0	\$12,553.8	\$10,808.7	\$8,883.4
Febrero	\$14,258.9	\$13,701.1	\$13,590.1	\$12,985.6	\$13,011.4	\$11,202.7	\$9,207.2
Marzo	\$19,266.3	\$18,512.7	\$18,362.7	\$17,545.9	\$17,580.7	\$15,136.8	\$12,440.5
Abril	\$14,125.6	\$13,573.1	\$13,463.1	\$12,864.2	\$12,889.8	\$11,098.0	\$9,121.1
Mayo	\$14,857.4	\$14,276.2	\$14,160.6	\$13,530.7	\$13,557.6	\$11,672.9	\$9,593.6
Junio	\$14,511.8	\$13,944.2	\$13,831.2	\$13,216.0	\$13,242.2	\$11,401.4	\$9,370.5
<b>Total</b>	<b>\$171,680.0</b>	<b>\$164,964.4</b>	<b>\$163,627.8</b>	<b>\$156,349.7</b>	<b>\$156,660.2</b>	<b>\$134,882.6</b>	<b>\$110,856.2</b>
<b>Inversión</b>	<b>\$18,500.0</b>	<b>\$5,400.0</b>	<b>\$14,128.7</b>	<b>\$88,100.0</b>	<b>\$95,957.0</b>	<b>\$200,978.5</b>	
<b>Beneficio económico</b>	<b>\$6,715.6</b>	<b>\$8,052.2</b>	<b>\$15,330.3</b>	<b>\$15,019.8</b>	<b>\$36,797.4</b>	<b>\$60,823.8</b>	



### 6.2.2.1 Costos y beneficios potenciales del escenario 3. Consumo de agua

La Tabla 17, muestra el costo total en agua potable para el periodo de estudio, así como el costo de cada intervención del escenario 3 y los beneficios generados. Se observa que solo la compra de la procesadora automática para filtros (PAF), genera un beneficio mayor que los costos, sin embargo, se tendría que analizar la relación B/C para determinar la decisión sobre si se implementa o no este escenario.

Tabla 17. Costos y beneficios económicos del escenario 3. Agua potable

Periodo	Escenario base	Acciones del escenario 2			
		S+M	PF	SOIa	TAAA
Agosto	\$25,876.55	\$24,854.24	\$18,579.99	\$15,976.64	\$14,363.51
Septiembre	\$31,569.24	\$30,322.02	\$22,667.47	\$19,491.41	\$17,523.40
Octubre	\$31,241.93	\$30,007.64	\$22,432.45	\$19,289.32	\$17,341.72
Noviembre	\$32,108.20	\$30,839.69	\$23,054.46	\$19,824.17	\$17,822.57
Diciembre	\$28,754.49	\$27,618.48	\$20,646.42	\$17,753.53	\$15,961.00
Enero	\$27,697.89	\$26,603.61	\$19,887.75	\$17,101.16	\$15,374.50
Febrero	\$26,207.25	\$25,171.87	\$18,817.43	\$16,180.82	\$14,547.08
Marzo	\$24,588.62	\$23,617.19	\$17,655.22	\$15,181.45	\$13,648.61
Abril	\$24,296.87	\$23,336.96	\$17,445.73	\$15,001.31	\$13,486.67
Mayo	\$25,104.98	\$24,113.15	\$18,025.98	\$15,500.26	\$15,500.26
Junio	\$25,709.32	\$24,693.61	\$18,459.91	\$15,873.39	\$15,873.39
Total	\$303,155.35	\$291,178.44	\$217,672.81	\$187,173.45	\$171,442.69
Costo de la acción		\$16,200.00	\$36,000.00	\$173,000.00	\$173,000.00
Beneficio económico		\$11,976.91	\$85,482.54	\$115,981.90	\$131,712.66

### 6.2.3 Resultados del análisis de costos y beneficios ambientales

La implementación de los escenarios propuestos tiene el principal objetivo disminuir los impactos ambientales identificados con el ACV. Se ha supuesto que los escenarios generan un cambio y mejora el desempeño ambiental del servicio renal, aunque es recomendable profundizar en la implementación de escenarios de mejora para un servicio de salud.

La Figura 18 muestra el comportamiento ambiental sobre el CC de los escenarios propuestos. Se observa una tendencia de disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub> eq de acuerdo con el escenario de inversión. Según los resultados las acciones para el ahorro de agua son la mejor alternativa para la inversión pues se tiene el potencial de disminuir el impacto al CC en un 19.7% con respecto al escenario actual.

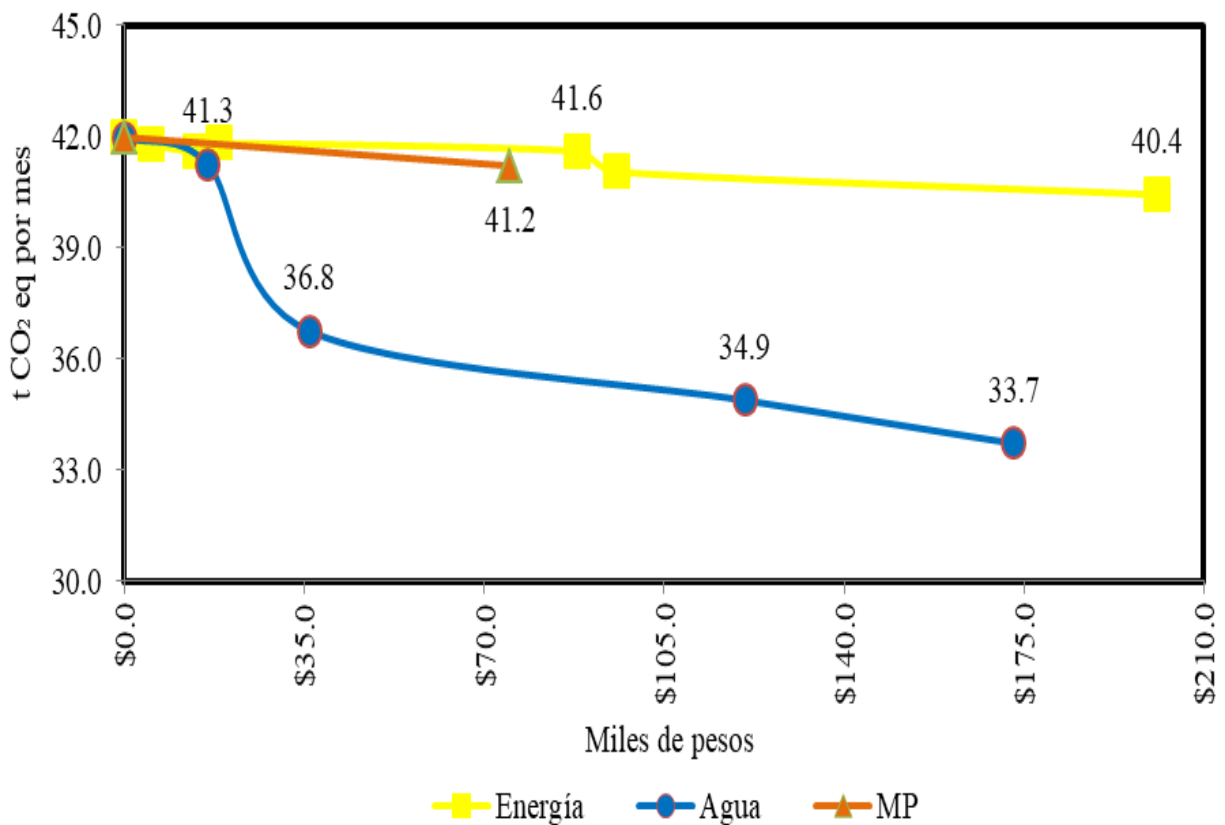


Figura 18. Impacto ambiental por escenario de costo-beneficio



Es importante mencionar que al implementar todas las acciones de mejora el impacto ambiental disminuye considerablemente en función de la inversión. En este caso la reducción total en las emisiones de CO<sub>2</sub> eq es de 10.6 toneladas con respecto al escenario inicial, siendo necesaria una inversión total de casi \$450,000.00, lo que proporcionalmente equivale a reducir un total de 23.6 kg de CO<sub>2</sub> eq por cada mil pesos invertidos. Para el resto de las categorías de impacto, el desempeño ambiental se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Disminución del impacto ambiental por escenario de inversión

		CC	ACO	FMP	TH	RI	FOF
		kg CO <sub>2</sub> eq	kg CFC-11 eq	kg PM <sub>10</sub> eq	kg 1,4-DB eq	kBq U <sub>235</sub> eq	kg NMVOC
Escenario actual	Sin inversión	41,993.00	1.06E-02	61.30	1,531.68	1,476.09	105.12
MP1	\$75,000.00	41,220.78	1.02E-02	59.99	1,480.74	1,433.19	102.89
SGen	\$200,978.45	40,438.76	1.04E-02	56.27	1,461.89	1,396.11	101.36
TAAA	\$173,000.00	33,729.21	1.05E-02	55.84	1,488.81	1,446.43	87.42
MP1+SGEn+TAAA	\$448,978.45	31,402.75	1.00E-02	49.49	1,368.07	1,323.56	81.43
Diminución por cada \$1,000.00		23.59	1.17E-06	0.03	0.36	0.34	0.05
		AT	EcT	EcM	EcAF	EAF	EM
		kg SO <sub>2</sub> eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg P eq	kg N eq
Escenario actual	Sin inversión	137.40	5.382	26.84	29.00	1.031	10.861
MP1	\$75,000.00	134.50	5.197	25.89	28.12	1.002	10.636
SGen	\$200,978.45	132.73	5.286	25.44	26.73	0.940	10.700
TAAA	\$173,000.00	120.12	5.334	25.28	27.67	1.025	8.363
MP1+SGEn+TAAA	\$448,978.45	112.6	5.1	22.9	24.5	0.9	8.0
Diminución por cada \$1,000.00		0.06	0.00073	0.00869	0.00997	0.00028	0.00642
		TSN	USA	USU	AA	ARF	ARM



		m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> a	m <sup>2</sup> a	m <sup>3</sup>	kg oil eq	kg Fe eq
Escenario actual	Sin inversión	0.906	3,438.2	107.8	565.1	7,689.7	274.5
MP1	\$75,000.00	0.874	3,324.9	102.2	531.1	7,495.5	214.0
SGen	\$200,978.45	0.899	3,379.8	106.9	561.6	7,199.0	272.4
TAAA	\$173,000.00	0.906	3,438.2	107.8	760.6	7,187.2	273.3
MP1+SGEn+TAAA	\$448,978.45	0.9	3,266.5	101.4	723.1	6,502.3	10.9
		0.00009	0.38	0.014	-0.35	2.65	0.56
Diminución por cada \$1,000.00							

0: Escenario base.

MP1: Sistema de gestión de calidad ISO 90001.

SGEn: Sistema de gestión de la energía ISO 50001.

TAAA: Todas las acciones para el ahorro del agua.

MP1+SGEn+TAAA: Escenario global que incluye todas las acciones de mejor

### 6.2.4 Resultados de la relación beneficio costo de la asistencia renal artificial

Determinando una tasa de descuento del 10% y habiendo actualizado los flujos de caja con los métodos TIR y VAN, se calculó la relación costo-beneficio de los escenarios de mejora para el impacto ambiental de la asistencia renal artificial. La Figura 19 muestra dichos resultados y según estos, la mejor alternativa de inversión es el escenario 1 (SGC), cuya relación B/C resulta en 2.8 unidades o, mejor dicho, la adopción de este escenario generaría el 180% de ganancias. De la misma manera, las alternativas de compra de la procesadora automática para filtros (PAF), el nuevo esterilizador (E) y el reemplazo de las luminarias fluorescentes por lámparas LED, generan índices de rentabilidad superiores a la unidad con 2.4 para PAF, 1.5 para E y 1.1 para LED. Por otra parte, el reemplazo del sistema de osmosis inversa (SOIa y SOIe), la compra de los cinco sanitarios y el mantenimiento (S+M) y la capacitación sobre buenas prácticas y uso eficiencia de la energía (EE), no son



alternativas viables económicamente pues representarían pérdidas de entre el 20 hasta el 80% en la utilidad.

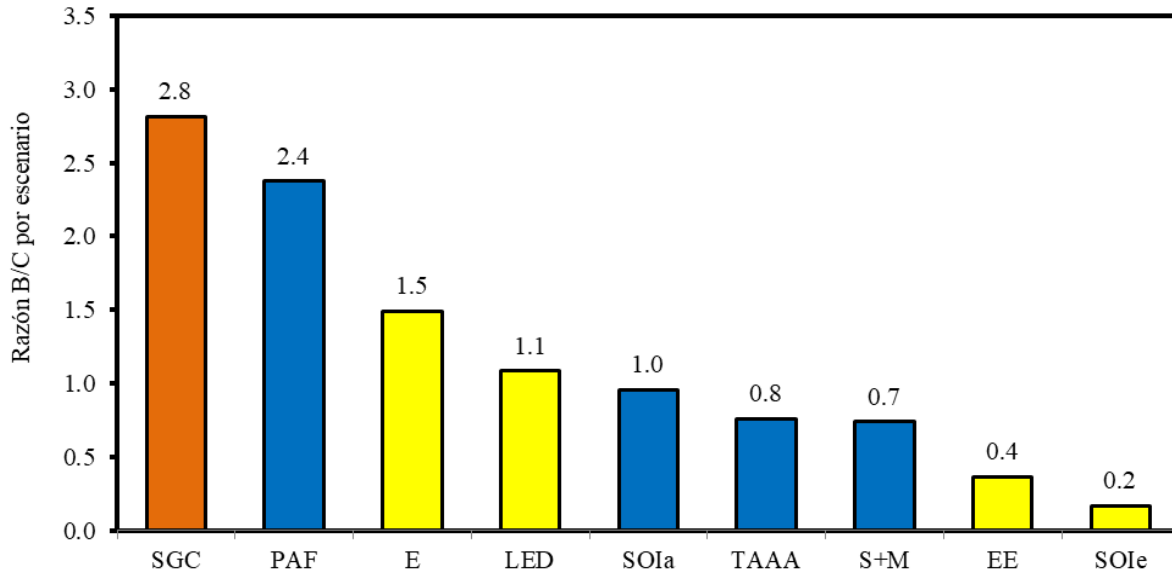


Figura 19. Relación beneficio-costos de los escenarios de mejora para la asistencia renal

La Tabla 19, muestra todos los resultados de costo-beneficio por escenario de mejora. Se presentan los flujos netos de efectivo (FEN), que representan los valores monetarios de los costos y los beneficios estimados para el periodo de los 11 meses considerados, así como los flujos netos de efectivo actualizados (FNEA), los cuales representan el valor actual de los costos y los beneficios estimados de acuerdo con las ecuaciones correspondientes del VAN y la TIR (Ecuación 2-ver Capítulo II).

En términos más sencillos, esto significa que para el escenario SGC se requiere una inversión inicial ( $V_0$ ) de \$75,000.00 (negativo porque es un costo), pero para conocer el valor de esa inversión en el futuro, se requiere actualizar esos valores con el VAN, lo que resulta en \$68,181.82 con una tasa de descuento del 10%. Esta inversión generaría una TIR del 24%, lo que se traduce en que por cada \$100.00 invertidos, se tendría una ganancia de \$24.00 y un índice de rentabilidad o relación B/C de 2.8.



Tabla 19. Análisis costo-beneficio por alternativa de mejora ambiental de la asistencia renal artificial

	SGC		EE		E		LED	
Periodo (11 meses)	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>
Costos	-\$75,000	-\$68,182	-\$18,500	-\$16,818	-\$5,400	-\$4,909	-\$14,129	-\$12,844
Beneficios	\$210,862	\$191,693	\$6,715	\$6,105	\$8,052	\$7,320	\$15,330	\$13,937
VAN <sup>1</sup>	\$52,435	-\$68,182	-\$14,509	-\$16,818	-\$615	-\$4,909	-\$5,019	-\$12,844
TIR <sup>2</sup>		24%		-14%		7%		1%
B/C <sup>3</sup>		2.8		0.4		1.5		1.1

	SOIe		PFV		SGEn		S+M	
Periodo (11 meses)	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>
Costos	-\$88,100	-\$80,091	-\$95,957	-\$87,234	-\$200,978	-\$182,708	-\$16,200	-\$14,727
Beneficios	\$15,012	\$13,654	\$36,797	\$33,452	\$60,824	\$55,294	\$11,977	\$10,888
VAN <sup>1</sup>	-\$73,080	-\$80,091	-\$74,090	-\$87,234	-\$164,834	-\$182,708	-\$8,993	-\$14,727
TIR <sup>2</sup>		-22%		-13%		-16%		-5%
B/C <sup>3</sup>		0.2		0.4		0.3		0.7

	PAF		SOIa		TAAA		SGC+SGEn+TAAA	
Periodo (11 meses)	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>	FNE <sup>4</sup>	FNEA <sup>5</sup>
Costos	-\$36,000	-\$32,727	-\$120,800	-\$109,818	-\$173,000	-\$157,273	-\$329,800	-\$299,818
Beneficios	\$85,483	\$77,711	\$115,982	\$105,438	\$131,713	\$119,739	\$640,296	\$582,088
VAN <sup>1</sup>	\$15,438	-\$32,727	-\$51,009	-\$109,818	-\$93,003	-\$157,273	\$60,893	-\$299,818
TIR <sup>2</sup>		19%		-1%		-5%		14%
B/C <sup>3</sup>		2.4		1.0		0.8		1.9

VAN<sup>1</sup>: Valor actual neto

TIR<sup>2</sup>: Tasa interna de retorno

B/C<sup>3</sup>: Relación beneficio-costo

FNE<sup>4</sup>: Flujo neto de efectivo

FNEA<sup>5</sup>: Flujo neto de efectivo actualizado con VAN y TIR



### **6.2.5 Conclusión del análisis costo-beneficio**

Un aspecto importante sobre las cuales basar o tomar decisiones son los criterios económicos como la viabilidad, utilidad, eficiencia y rentabilidad. El ACB es una herramienta que aporta la información relativa en cuanto a estos criterios y apoya las acciones que se consideran benéficas y resultan rentables. En este trabajo se ha incorporado el ACB para reforzar el potencial para disminuir el impacto ambiental derivado de una terapia renal artificial como la HD.

Con base en la información obtenida, los escenarios planteados y los análisis realizados se concluye que las oportunidades de mejora ambiental potencialmente rentables son las acciones enfocadas en el ahorro del agua (Escenario 3). Sin embargo, la conjunción de los tres escenarios genera importantes ahorros económicos sobre los servicios y las compras de materias primas y además una mayor disminución del impacto ambiental.

Se recomienda que las acciones futuras se encaminen a profundizar en la investigación relevante sobre los costos que representaría no atender el control sobre el impacto ambiental, es decir; todas las pérdidas en la productividad por daños sobre la cadena de valor y productividad. Los costos de los años de vida perdidos debido a los daños sobre la salud a causa de los impactos ambientales y los costos en remediación de las áreas afectadas por los impactos ambientales.

## 7. DISCUSIÓN

La asistencia renal artificial mediante la HD es la terapia de reemplazo renal más común para el tratamiento de la ERC en México y en muchos otros países del mundo (Méndez-Durán et al. 2010). En México se carece de un perfil epidemiológico de la ERC y se desconoce la cantidad de pacientes y que requieren un a terapia de reemplazo renal. Si bien se ha estudiado a fondo la práctica renal y se ha analizado lo relevante a los asuntos económicos de la HD, lo relevante sobre los impactos ambientales y sus costos han sido en mayor media limitados en su estudio.

La asistencia renal como causa de deterioro ambiental solo ha sido investigada con una perspectiva de huella de carbono. Los antecedentes revisados en esta disertación revelan que el impacto al CC de la asistencia renal representan entre de dos y diez toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes por paciente durante un año. La Tabla 20 muestra los resultados de los estudios que han investigado la huella de carbono de la asistencia renal artificial.

Tabla 20. Antecedentes de la huella de carbono de la asistencia renal artificial

Lugar	Sistema-producto	Resultado*	Referencia
México	Ciclo de vida de la asistencia renal artificial	96 HD año =4.9 t CO <sub>2</sub> eq 144 HD año-1=7.3 t CO <sub>2</sub> eq	Este estudio
China	DP hogar DP clínica renal	1.4 t CO <sub>2</sub> eq	(Chen et al. 2016b)
Australia	Servicio renal australiano	10.2 t CO <sub>2</sub> eq	(Lim et al. 2013)
Reino Unido	HD hogar HD clínica renal	HD hogar 1.8 a 7.2 t CO <sub>2</sub> eq HD clínica renal 3.8 t CO <sub>2</sub> eq	(Connor et al. 2011)
	Servicio renal del Reino Unido	4 a 7 t CO <sub>2</sub> eq	(Connor et al. 2010)

\*Resultados calculados por la atención de un paciente durante un año.



Al comparar los resultados se observa que este trabajo generó resultados dentro del rango de las emisiones de CO<sub>2</sub> eq reportadas. Sin embargo, los estudios anteriores no siguieron un enfoque de ACV y los métodos empleados se basan en factores de caracterización exclusivos para ciertas regiones y materiales, por lo que podría suponerse que sus resultados tendrían incertidumbre significativa.

Otra diferencia fue sobre la distribución del impacto y las variables significativas. Por ejemplo: Connor et al. (2010 y 2011), identificaron el equipo médico (37% de las emisiones), el uso de la energía (21%) y el transporte de los pacientes (20%). Lim et al. (2013), identificaron los productos farmacéuticos (35.7%), el equipo médico (23.4%), el consumo de electricidad (5.2 a 18.6%) y el consumo de agua (4.0 a 11.6%). Chen et al. (2016), a los empaques (79.0 a 88.6%), la disposición de residuos (2.0 a 8.3%), el uso de electricidad (4.9 a 9%) y el transporte (2 a 2.6%). En este trabajo se encontró como variable de mayor peso en las emisiones de CO<sub>2</sub> eq, el tratamiento de las aguas residuales derivadas del servicio renal con el 44% de las emisiones globales. Este es un resultado contrastante con respecto a los anteriores y que hace pensar que sin un enfoque de ACV; es decir; considerando el transporte de materiales, el servicio y el fin de vida, esta información podría seguir siendo ignorada, desconociendo así el potencial de disminución del impacto al CC, reduciendo el consumo de agua durante los procesos unitarios que integran el servicio renal.

Aunque es importante conocer y estudiar la contribución al cambio climático de las actividades de atención a la salud, es más importante conocer su impacto ambiental global. Es decir; evaluar el impacto de las descargas de agua residual, las emisiones al suelo por la disposición de residuos sólidos, las emisiones al aire por la generación de energía eléctrica,



las emisiones derivadas del transporte de materias primas y personas, así como el agotamiento de los recursos naturales y las repercusiones sobre la salud humana y la calidad de los ecosistemas. Al respecto, este trabajo ha intentado responder estas preguntas analizando la huella ambiental global de la terapia de reemplazo renal y se ha identificado que más allá del impacto al CC, el daño ambiental de la HD es más importante sobre la contaminación del agua. La HD es llamada una terapia “sedienta de agua” (Agar 2008; Lim et al. 2013; Chen et al. 2016b), de este servicio se descargan dos tipos de agua residual: el primer volumen es aquel procedente del tratamiento previo a la HD que es desechado al desagüe sin contaminar. El segundo volumen es aquel derivado de los procesos que en este estudio son denominados higienización de filtros (HF), procesamiento de ácidos (PA) y la hemodiálisis (HD) y que contiene una carga de compuestos químicos y desechos metabólicos que como potencial impacto derivan en eutrofización y en ecotoxicidad marina y en agua fresca. Ambas categorías de impacto fueron señaladas como las más importantes en el análisis de normalización debido a la magnitud de impacto en cuanto a la contaminación del agua.

Además de responder a las preguntas en términos de cuáles son las variables, procesos unitarios y etapas del ciclo de vida que representan las mayores repercusiones ambientales, también se analizó el potencial para disminuir estos los impactos, mediante una evaluación de los costos ambientales, realizando escenarios de costo-beneficio. El análisis de influencia (sección 5.4.2), ha dictaminado que un servicio renal promedio, es decir; que cumpla con los requisitos de la NOM-003-SSA-2017 (DOF, 2017), cuenta con múltiples y potenciales oportunidades de mejora del desempeño ambiental.



Se han planteado tres alternativas de inversión para disminuir el impacto ambiental y se ha estimado los ahorros potenciales que se derivan de la implementación de cada una de las estrategias. Con base en esas estimaciones el impacto ambiental puede reducirse un 30% sobre las categorías de contaminación del agua (EM, EAF, EcM y EcAF), de un 15 a un 20% sobre el CC, el ACO, la RI y la EcT. Así mismo, se reduce el impacto sobre el ARM y el ARF. No obstante, se incrementa un 45% el impacto sobre el AA, pero se disminuye su consumo, pues se evita la descarga procedente del TA.

### **7.1. Limitaciones**

Se cuenta ya con diversos análisis de ciclo de vida para algunas actividades de atención a la salud, no obstante; para el más amplio conocimiento del autor no se ha publicado un ACV de la asistencia renal artificial en México o en alguna otra parte del mundo. Como ya fue declarado el ACV es la mejor herramienta para la EIA, pero es compleja su aplicación para el estudio de servicios como la salud, además de requerir de múltiples conocimientos y entrenamientos específicos. Por esta razón este trabajo cuenta con las siguientes limitantes:

- No fue posible agregar información de fondo en el estudio pues se carece de datos en las etapas de manufactura de los materiales empleados en el servicio renal. Esta limitante es importante, pues puede influir sobre la interpretación de los resultados pues el impacto ambiental se repartiría de manera significativa entre las etapas previas al servicio renal. Este vacío en la información, puede ser resuelto generando un marco de referencia sobre los consumos de energía, descargas al aire, agua y suelo atribuidas a la producción de los insumos para los servicios de salud.



- El perfil de impacto ambiental estimado, no puede generalizarse a todos los sistemas de atención renal debido a que se desconocen las condiciones y la operación de los procesos unitarios de un servicio de hemodiálisis. Esta limitante puede ser cubierta ampliando el universo de estudio, considerando una mayor cobertura geográfica de los datos.
- Los procesos unitarios globales y europeos seleccionados en el ICV solo generan una aproximación al impacto ambiental el cual podría variar con respecto a la región; los estudios futuros deberían alinear mejor los datos de fabricación de productos de la industria médica con el ICV.

En cuanto al alcance de la evaluación económica, este trabajo se limita en:

- En primer lugar, los costos de la materia prima para el servicio renal no fueron proporcionados por la unidad renal de estudio y se recurrió a consultas en los sitios *web* de los proveedores, por lo que los costos podrían estar sobre-estimados pues no consideran la compra al precio de mayoreo. Esta limitante puede ser minimizada pues se consideró el precio del proveedor más la inflación mensual a la que estarían sujetas las compras por periodo.
- Los precios o costos de inversión planteados por escenario de mejora pueden presentar incertidumbre pues los escenarios fueron planteados hipotéticamente a partir del análisis de influencia y no representan una situación real. La limitante en cuanto a los escenarios sería el partir del principio de que los escenarios generan un cambio positivo y se desconoce el comportamiento real de una intervención como las planteadas.





## 8. CONCLUSIONES

Este trabajo representa la primera evaluación del ciclo de vida de un servicio de asistencia renal en México. Adicionalmente, se ha modelado un análisis económico que muestra la potencial rentabilidad de las posibilidades para disminuir los impactos ambientales relacionados.

A diferencia de los trabajos anteriores, esta investigación puede fungir como pauta hacia redirigir el estudio del impacto ambiental de la asistencia renal hacia la contaminación y disponibilidad de agua. Es ampliamente conocido el reto que representa el CC para las sociedades y sobre todo para el sector salud; sin embargo, la disponibilidad de agua limpia es un problema urgente de atender pues se espera que, con la crisis climática de los años próximos, el estrés hídrico en algunas regiones del mundo se convierta en la emergencia principal.

La comunidad médica debe prestar más atención a los problemas ambientales que genera la atención a la salud y es necesario contar con una estrategia sustentable para la atención a la salud. Dicha estrategia debe incluir a todas las partes responsables desde:

- Los productores: desarrollando productos con menor cantidad de empaques y el empleo de materiales que puedan reciclarse. Contar con alternativas de transporte eficientes y promover la inversión en tecnologías “verdes” como vehículos eléctricos.
- Los servicios de salud: promoviendo la eficiencia energética, el diseño verde de los nuevos hospitales, la gestión de la calidad en el uso de materias primas, la promoción del manejo eficiente de residuos sólidos y el control de las sustancias químicas que se manejan en los nosocomios.



- Los ministerios de salud: promoviendo las practicas saludables y el cuidado a la salud, la educación para la salud, la inversión y el diseño de programas de salud basados en la evidencia, facilitar el acceso a la información y la cooperación multidisciplinaria en la investigación en salud pública.
- El usuario: concientización sobre el cuidado de su salud. La tendencia de la ERC revela que cada año se incorporarán 377 casos nuevos por cada millón de habitantes. Esto indica que cada año se tendrán más de 45 mil pacientes nuevos que conforme avance su enfermedad, van a requerir de una modalidad de asistencia renal. De seguir con esta tendencia la cantidad de recursos necesarios para la atención de los enfermos renales, serían mayores que lo invertido en prevención de las enfermedades.

### **8.1. Recomendaciones**

Con base en los resultados obtenidos, el análisis de los antecedentes realizado en la discusión y las conclusiones, se recomienda:

- Diseñar plataformas de acceso y generación de la información para las enfermedades crónicas como a ERC. No puede seguirse desconociendo el perfil epidemiológico de los pacientes con esta patología y el contar con una base de datos que contenga esta información, contribuirá a resolver este problema.
- Claramente el ACV tiene muchas aplicaciones dentro del cuidado de la salud. El trabajo futuro debería continuar con el desarrollo de bases de datos y factores de caracterización para materias primas, recursos energéticos, tratamiento de residuos y tratamiento de aguas residuales para países como México.



## 9. VALIDACIÓN DE OBJETIVOS

### Objetivo General

Identificar las variables responsables de los mayores impactos ambientales y económicos del ciclo de vida de la asistencia renal artificial.

### Objetivo cumplido

Las variables responsables de los mayores impactos ambientales y económicos del ciclo de vida de la asistencia renal artificial son:

- El tratamiento de agua residual
- La solución concentrada dializante

Entre otras como: el PVC del filtro dializador, la producción de electricidad, el tratamiento de RPBI y la extracción y distribución del agua potable.

### Objetivos particulares

- Estimar el impacto ambiental del ciclo de vida de la asistencia renal artificial a través de un servicio de hemodiálisis.

### Objetivo cumplido

Se realizó un ACV de la asistencia renal artificial. El estudio completo se presenta en el Capítulo II.

- Realizar un análisis de costo-beneficio de los impactos ambientales del ciclo de vida de la asistencia renal artificial.

### Objetivo cumplido

Se realizó un ACB para las oportunidades de mejora ambientales del ciclo de vida de la asistencia renal. El estudio completo se presenta en el Capítulo III.



## **10. VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS**

### **Hipótesis**

La huella y el costo ambiental derivados del ciclo de vida de la asistencia renal artificial, están relacionados con las descargas a la tecnósfera de los productos químicos necesarios para la terapia de reemplazo renal.

### **Hipótesis válida**

El ACV reveló que las descargas de agua residual fueron uno de los principales contribuyentes en la huella ambiental del ciclo de vida de la asistencia renal artificial y el ACB determinó que las acciones de mejora destinadas al ahorro en el consumo de agua fueron las que presentaron los mayores índices de rentabilidad o relación B/C



### 11. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

	1° Semestre (2016-2017)						2° Semestre (2017-2017)						3° Semestre (2017-2018)						4° Semestre (2018-2018)					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Materias MCIA																								
Capítulo I Antecedentes y problema de investigación																								
Capítulo II Análisis de ciclo de vida																								
Definición de objetivo y alcance																								
Inventario de ciclo de vida																								
Evaluación de impacto																								
Interpretación																								
Capítulo III Evaluación de costos ambientales																								
Perfil socioeconómico de la ERC																								
Análisis costo-beneficio																								
Interpretación																								
Estructuración final de la tesis																								
Evaluación tutorial																								
Escritura de artículo científico																								
Participación en eventos académicos																								
Examen de grado	Octubre 2018																							



## BIBLIOGRAFÍA

- Achieng O., P.F., 2007. *Environmental Impact Assessment General Procedures*, Naivasha, Kenya. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22105848>.
- Adler, S. et al., 2005. Comparison of economic and environmental impacts between disposable and reusable instruments used for laparoscopic cholecystectomy. *Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques*, 19(2), pp.268–272.
- Agar, J.W.M., 2008. Reusing Dialysis Wastewater: The Elephant in the Room. *American Journal of Kidney Diseases*, 52(1), pp.10–12.
- Altuve, J.G., 2004. El uso del valor actual neto y la tasa interna de retorno para la valoración de las decisiones de inversión. *Actualidad Contable FACES*, 7(9), pp.7–17. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=25700902>.
- Ávila-Palomares, P., López-Cervantes, M. & Durán-Arenas, L., 2010. Estimación del tamaño óptimo de una unidad de hemodiálisis con base en el potencial de su infraestructura. *Salud Publica de Mexico*, 52(4), pp.315–323.
- Ayres, R.U., 1995. Life cycle analysis: A critique. *Resources, Conservation and Recycling*, 14(3–4), pp.199–223.
- Azqueta O., D., 1998. *Valoración económica de la calidad ambiental*,
- Bambarén-Alatrística, C. & Alatrística-Gutiérrez, M.S., 2016. Huella de carbono en cinco establecimientos de salud del tercer nivel de atención de Perú, 2013. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 33(2), pp.274–277.
- Belboom, S. et al., 2011. A life cycle assessment of injectable drug primary packaging: Comparing the traditional process in glass vials with the closed vial technology (polymer vials). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(2), pp.159–167.
- Caballero, M., Lozano, S. & Ortega, B., 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la Tierra. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), p.12. Available at: <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm>.
- Campion, N. et al., 2012. Life cycle assessment perspectives on delivering an infant in the US. *Science of the Total Environment*, 425, pp.191–198. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.006>.
- Carvalho Filho, A.C. De, 2001. Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. , p.317.
- Chen, M. et al., 2016a. The carbon footprints of home and in-center peritoneal dialysis in China. *International Urology and Nephrology*, (89). Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11255-016-1418-5>.
- Chen, M. et al., 2016b. The carbon footprints of home and in - center peritoneal dialysis in China. *International Urology and Nephrology*, (89).
- Christ, C.F., 1955. A Review of Input-Output Analysis. In *Input-Output Analysis: An Appraisal*. Princeton University Press, pp. 137–182. Available at: <http://www.nber.org/books/unkn55-2>.
- Chung, J.W. & Meltzer, D.O., 2009. Estimate of the Carbon Footprint of the US Health Care Sector. *JAMA*, 302(18), p.1970. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19903917> [Accessed April 11, 2018].
- CONAPO, 2013. *Consejo Nacional de Población*. [En línea] Available at: [http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indices\\_de\\_Marginacion\\_Publicaciones](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indices_de_Marginacion_Publicaciones) [Último acceso: 15 Octubre 2017].
- Connor, A., Lillywhite, R. & Cooke, M.W., 2010. The carbon footprint of a renal service in the United Kingdom. *Q J Med*, 103(12), pp.965–975.
- Connor, A., Lillywhite, R. & Cooke, M.W., 2011. The carbon footprints of home and in-center maintenance hemodialysis in the United Kingdom. *Hemodialysis International*, 15, pp.39–51.
- Connor, A., Lillywhite, R. & Cooke, M.W., 2011. The carbon footprints of home and in-center maintenance hemodialysis in the United Kingdom. *Hemodialysis International*, 15(1), pp.39–51.
- Coria, I.D., 2008. El estudio de impacto ambiental: características y metodologías. *Invenio*, 11(20), pp.125–135. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87702010>.



- Correa, F., 2008. Tasa de descuento ambiental Gamma: una aplicación para Colombia. *Lecturas de Economía*, 69(69), pp.141–162.
- Dantés, O.G. et al., 2011. Sistema de salud de México. *Salud Publica Mex*, 53(Suppl 2), pp.s220–s232.
- Dhaliwal, H. et al., 2014. A life cycle assessment of packaging options for contrast media delivery: comparing polymer bottle vs. glass bottle. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(12), pp.1965–1973.
- Díaz, G., 2012. El Cambio Climático. *Ciencia y Sociedad*, XXXVII(2), pp.227–240. Available at: <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=87024179004>.
- DOF, 2003. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002, PROTECCIÓN AMBIENTAL - SALUD AMBIENTAL - RESIDUOS PELIGROSOS BIOLÓGICO-INFECCIOSOS - CLASIFICACIÓN Y ESPECIFICACIONES DE MANEJO, México, Distrito Federal: s.n.
- DOF, 2017. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SSA3-2016, para la práctica de hemodiálisis., Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Duane, B. et al., 2012. Taking a bite out of Scotland's dental carbon emissions in the transition to a low carbon future. *Public Health*, 126(9), pp.770–777. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.puhe.2012.05.032>.
- Durán-Arenas, L. et al., 2011. Costos directos de la hemodiálisis en unidades públicas y privadas. *Salud Publica de Mexico*, 53(SUPPL. 4).
- EC-JRC, 2011. *ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context* First Edit., Luxemburg: European Commission Joint Research Centre Institute for Environmental and Sustainability. Available at: [http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD Handbook Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context.pdf/at\\_download/file](http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD%20Handbook%20Recommendations%20for%20Life%20Cycle%20Impact%20Assessment%20in%20the%20European%20context.pdf/at_download/file).
- Fernández-Vitora, V.C., 1993. “*Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*” Segunda., Madrid, España: MUNDI-PRENSA.
- Fikri, E., Purwanto, P. & Sunoko, H.R., 2015. Modelling of Household Hazardous Waste (HHW) Management in Semarang City (Indonesia) by Using Life Cycle Assessment (LCA) Approach to Reduce Greenhouse Gas (GHG) Emissions. *Procedia Environmental Sciences*, 23(Ictcred 2014), pp.123–129. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029615000201>.
- Garc, J.C. & Vaca-boh, M.L., 2015. Valoración económica en salud y medio ambiente del control de contaminantes orgánicos persistentes en Colombia. , 17(6), pp.951–960.
- García-Rojas, H. R. G. & Gómez S., F., 2013. Valoración económica de un área natural protegida: El Parque Nacional Barranca del Cupatitzio, conservación como alternativa para el desarrollo local. En: J. Mondragón A., ed. *La sustentabilidad en el marco del desarrollo local*. Morelia(Michoacán): Morevalladolid, pp. 147-164.
- García-Rojas, H. R. G., Gómez S., F. & Rodríguez, V. J. F., 2013. Gestión de bosques por pago de servicios ambientales en la microcuenca el calabozo: análisis del costo de oportunidad del uso de suelo agrícola. En: F. J. Mondragón A., ed. *La sustentabilidad en el marco del desarrollo local*. Morelia(Michoacán): Morevalladolid, pp. 165-186.
- García, S., Suárez-varela, M.M. & Martí, A., 2017. Development of certified environmental management in hospital and outpatient haemodialysis units. *Nefrología*, 5(6), pp.539–546. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nefro.2015.09.004>.
- García V., S. et al., 2015. Desarrollo de la gestión medioambiental certificada en unidades hospitalarias y ambulatorias de hemodiálisis. *Nefrología*, 35(6), pp.539–546. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nefro.2015.09.004>.
- Gatenby, P.A.C., 2011. Modelling the carbon footprint of reflux control. *International Journal of Surgery*, 9(1), pp.72–74. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijssu.2010.09.008>.
- Gilliam, A.D., Davidson, B. & Guest, J., 2008a. The carbon footprint of laparoscopic surgery: should we offset? *Surgical Endoscopy*, 22(2), pp.573–573. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00464-007-9722-x>.
- Gilliam, A.D., Davidson, B. & Guest, J., 2008b. The carbon footprint of laparoscopic surgery: should we offset? *Surgical Endoscopy*, 22(2), pp.573–573. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00464-007-9722-x> [Accessed April 12, 2018].
- Giusti, L., 2009. A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste Management*, 29(8), pp.2227–2239. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X09001275>.



- Goedkoop, M. et al., 2013. *ReCiPe 2008 A life cycle assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level* First Edit., Leiden, Netherlands.
- Goedkoop, M., 1995. *The Eco-indicator 95*,
- González M., A.C., 2001. Costos y beneficios ambientales del reciclaje. *Gaceta ecológica*, 58, pp.17–26. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53905802>.
- Grafals, M. & Sanchez, R., 2016. The Environmental Impact of Dialysis vs Transplantation. - ATC Abstracts. *American Transplant Congress*. Available at: <http://atcmeetingabstracts.com/abstract/the-environmental-impact-of-dialysis-vs-transplantation/> [Accessed April 13, 2018].
- Griffiths, J., 2006. Environmental sustainability in the national health service in England. *Public Health*, 120(7), pp.609–612.
- Guevara, C. et al., 1997. *ISO 14000 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA*, Rio de Janeiro, Brasil. Available at: [http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENESEP1997\\_T6507.PDF](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENESEP1997_T6507.PDF).
- Gutiérrez Z., C. et al., 1994. Evaluación económica y toma de decisiones en salud ambiental. *Rev. Saúde Pública*, 28(2), pp.153–66.
- Hanson, J.J. & Hitchcock, R.W., 2009. Towards sustainable design for single-use medical devices. *Proceedings of the 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: Engineering the Future of Biomedicine, EMBC 2009*, 84112, pp.5602–5605.
- INEGI, 2010. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. [En línea] Available at: [http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/ccpv/2010/doc/cpv2010\\_cuest\\_basico\\_d.pdf](http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/ccpv/2010/doc/cpv2010_cuest_basico_d.pdf) [Último acceso: 15 Octubre 2017].
- IPCC, 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. [En línea] Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html> [Último acceso: 25 Enero 2017].
- IPCC, 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II, y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* R. K. Pachauri & A. Reisinger, eds., Ginebra, Suiza.
- ISO, 2006a. *ISO-14040. Life Cycle Assessment. Principles and Framework*, Ginebra, Suiza. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Environmental+management+-+Life+Cycle+assessment+-+Principles+and+framework#0>.
- ISO, 2006b. *ISO-14044. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines*., Suiza. Available at: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11367-011-0297-3>.
- ISO, 2015. Norma Iso 9001-2015. *Order A Journal On The Theory Of Ordered Sets And Its Applications*, 2015, p.58.
- Jiménez-González, C. et al., 2004. Cradle-to-gate life cycle inventory and assessment of pharmaceutical compounds. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(2), pp.114–121.
- Joan P., R. & Padilla R., E., 2008. La tasa de descuento y la sostenibilidad en la evaluación de proyectos con impacto ambiental. *Ingeniería de recursos naturales y del ambiente*, (7), pp.39–47.
- Jolliet, O. et al., 2003. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), pp.324–330.
- Leopold, L.B., et al., 1971. *A procedure for evaluating environmental impact*, Washington D. C.
- Lim, A.E.K., Perkins, A. & Agar, J.W.M., 2013. The carbon footprint of an Australian satellite haemodialysis unit. *Australian Health Review*, 37, pp.369–374.
- Loza, C. et al., 2011. Principios básicos de las evaluaciones económicas en salud. *Rev Peru Med Exp Salud Pública*, 28(3), pp.518–527.
- Malaquias, L.C., 2010. *Enfermedad Renal Crónica Y Su Atención Medicamentosa Tratamiento Sustitutivo En México*, Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0>.
- Malik, A. et al., 2018. The carbon footprint of Australian health care. *The Lancet Planetary Health*, 2(1), pp.e27–e35. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2542519617301808>.





- Marin-Garcia, J.A., Pardo-del-Val, M. & Bonavia, T., 2008. Análisis de programas de mejora continua. Un estudio longitudinal en una empresa industrial. *Gestão & Produção*, 15(3), pp.433–447. Available at: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-530X2008000300002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2008000300002&lng=es&tlng=es).
- McGain, F. et al., 2012. A life cycle assessment of reusable and single-use central venous catheter insertion kits. *Anesthesia and Analgesia*, 114(5), pp.1073–1080.
- Méndez-Durán, A. et al., 2010. Epidemiología de la insuficiencia renal crónica en México. *Diálisis y Trasplante*, 31(1), pp.7–11.
- Méndez-Durán, A. et al., 2014. Panorama epidemiológico de la insuficiencia renal crónica en el segundo nivel de atención del Instituto Mexicano del Seguro Social. *Diálisis y Trasplante*, 35(4), pp.148–156.
- Méndez-Durána, A. et al., 2010a. Epidemiología de la insuficiencia renal crónica en México. *Diálisis y Transplante*, 31(1), pp.7–11. Available at: <http://paginas.facmed.unam.mx/deptos/sp/wp-content/uploads/2013/12/Anexo-4A--Mendez-M.-Epidemiologia-de-la-Insuficiencia-Renal-cronica-en-Mexico.pdf>.
- Méndez-Durána, A. et al., 2010b. Epidemiología de la insuficiencia renal en México. *Diálisis y Transplante*, 31(1), pp.7–11. Available at: <http://paginas.facmed.unam.mx/deptos/sp/wp-content/uploads/2013/12/Anexo-4A--Mendez-M.-Epidemiologia-de-la-Insuficiencia-Renal-cronica-en-Mexico.pdf>.
- Mercado-Martínez, F.J. & Correa-Mauricio, M.E., 2015. Viviendo con hemodiálisis y sin seguridad social: Las voces de los enfermos renales y sus familias. *Salud Publica de Mexico*, 57(2), pp.155–160.
- Mijangos-Ricardez, O.F. & López L., J., 2013. Metodologías para la identificación y valoración de impactos ambientales. *Temas de Ciencia y Tecnologia*, 17(50), pp.37–42. Available at: [http://www.utm.mx/edi\\_antiores/temas50/T50\\_2Notas1-MetodologiasparalalIdentificacion.pdf](http://www.utm.mx/edi_antiores/temas50/T50_2Notas1-MetodologiasparalalIdentificacion.pdf).
- Múner O., J.D. & Correa R., F., 2004. Valoración económica de costos ambientales: marco conceptual y métodos de estimación. *Semestre Económico*, 7(13), pp.159–193.
- Perevochtchikova, M., 2013. La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y política pública*, 22(2), pp.283–312. Available at: <http://www.scielo.org.mx/pdf/gpp/v22n2/v22n2a1.pdf>.
- Pérez-García, R. et al., 2016. Gestión de calidad del líquido de diálisis. *Nefrología*, 36(3), pp.e1–e52.
- Piccoli, G.B. et al., 2015. Eco-dialysis : the financial and ecological costs of dialysis waste products: is a ‘cradle-to-cradle’ model feasible for planet-friendly haemodialysis waste management? *Nephrology Dialysis Transplantation*, 30, pp.1018–1027.
- Pollard, A.S. et al., 2014. The carbon footprint of acute care: How energy intensive is critical care? *Public Health*, 128, pp.771–776. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.puhe.2014.06.015>.
- du Preez, M. & Lottering, T., 2009. A social cost benefit of extending an existing recycling plant to accommodate the recycling of the plastic fraction of cable scrap. *South African Journal of Industrial Engineering*, 20(2), pp.179–192.
- Rodríguez, C. & Ciroth, A., 2016. *LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories*, Berlin, Germany.
- Rosas D., A. y otros, 2003. Evaluación de la incineración de residuos peligrosos. *Gaceta ecológica*, Issue 66, pp. 27-40.
- Ruiz, N., 2007. *Aplicación del Análisis del Ciclo de Vida en el estudio ambiental de diferentes Procesos Avanzados de Oxidación*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Silva, M. Brain, L., 2006. *Validez y confiabilidad del estudio socioeconómico*, Available at: <http://132.248.204.112:8080/unamoa/bitstream/handle/123456789/378/ValidezyConfiabilidadDelEstudioSocioeconomico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Sirotiuk, P. V. & Viglizzo, E.F., 2013. Estimación de la Huella de Carbono del proceso de panificación en la cadena agroindustrial del trigo. *RIA Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 39(3), pp.281–289.
- Somner, J. et al., 2009. Ophthalmology carbon footprint: something to be considered? *Journal of cataract and refractive surgery*, 35(1), pp.202–3. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19101448> [Accessed April 12, 2018].
- Soriano P., L., Ruiz R., M. El & Ruiz L., E., 2015. Criterios de evaluación de impacto ambiental en el sector minero. *Industrial Data*, 18(2), pp.99–112. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81643819013>.



- SSA, 2016. *Dirección General de Información en Salud*. [En línea] Available at: <http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/sinais/gastoensalud.html>[Último acceso: 13 Diciembre 2016].
- SSD, 2011. *La Agenda Global para Hospitales Verdes y Saludables*, Buenos Aires, Argentina.
- Stancliffe, R., 2012. *The carbon impact of mental health services*,
- Teke, A., 2014. Assessing the energy efficiency improvement potentials of HVAC systems considering economic and environmental aspects at the hospitals. , 33, pp.224–235.
- The Economist, 2017. *Value-based health in renal care in Latin America*, Available at: <http://www.eiu.com/Handlers/WhitepaperHandler.ashx?fi=Value-based-health-in-renal-care-in-Latin-America.pdf&mode=wp&campaignid=renalcarelatam2018>.
- Thiel, C.L. et al., 2007. Life Cycle Assessment of Medical Procedures : Vaginal and Cesarean Section Births. *LCA Framework*, 85287.
- Thiel, C.L. et al., 2009. Use of Life Cycle Assessment in Healthcare : A Preliminary Cesarean Section Case Study. , p.504345.
- Tirado-Gómez, L.L. et al., 2011. Las unidades de hemodiálisis en México: una evaluación de sus características, procesos y resultados. *Salud Publica De Mexico*, 53(4), pp.S491–S498. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10621579013>.
- Trejo, V. & Fernández-Martínez, X., 2010. Balance Nacional De Energía Y Su Relación Con El Inventario Nacional De Emisiones. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 1(1), pp.52–72. Available at: [http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/especiales/revista-inter/num\\_1\\_2010/Doctos/RDE\\_Num01\\_Nov2010\\_Art06.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/especiales/revista-inter/num_1_2010/Doctos/RDE_Num01_Nov2010_Art06.pdf).
- Treviño-Becerra, A., 2004. Insuficiencia renal crónica: enfermedad emergente, catastrófica y por ello prioritaria. *Cirugia y cirujanos*, 72(1), pp.3–4.
- USRDS, 2015. *Chapter 13: International Comparisons*, Estados Unidos.
- WBCSD, 2014. *Greenhouse Gas Protocol*. [En línea] Available at: <http://www.ghgprotocol.org/>[Último acceso: 25 Enero 2017].
- WHO, 2011. *Health in the green economy*, Suiza.
- Zárate, V., 2010. Evaluaciones económicas en salud: Conceptos básicos y clasificación. *Revista Medica de Chile*, 138(Supl 2), pp.93–97.



# ANEXOS

**Marco conceptual para el análisis de ciclo de vida**

**Cálculos para generar el inventario de ciclo de vida**

**Perfil eléctrico**

**Perfil de agua**

**Estudio de caracterización**



## **Anexo 1. Marco conceptual para el análisis de ciclo de vida**

*Aseveración comparativa.* Declaración ambiental en relación con la superioridad o la equivalencia de un producto con respecto a un producto competidor que realiza la misma función.

*Producto.* Cualquier bien o servicio.

*Co-producto.* Cualquier producto de entre dos o más productos provenientes del mismo proceso unitario o sistema del producto.

*Proceso.* Conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.

*Flujo elemental.* Materia o energía que entra al sistema bajo estudio, que ha sido extraído del medio ambiente sin una transformación previa por el ser humano, o materia o energía que sale del sistema bajo estudio, que es liberado al medio ambiente sin una transformación posterior por el ser humano.

*Flujo de energía.* Entrada o salida de un proceso unitario o un sistema del producto, expresada en unidades de energía.

*Energía base.* Calor de combustión de una materia prima que no se utiliza como fuente de energía en un sistema del producto, expresado en términos de poder calorífico superior o de poder calorífico inferior.

*Entrada auxiliar.* Materia que entra y se utiliza en el proceso unitario de obtención del producto, pero que no constituye una parte del producto.

*Asignación.* Distribución de los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes.

*Criterios de corte.* Especificación de la cantidad de flujo de materia o de energía o del nivel de importancia ambiental asociado a los procesos unitarios o al sistema del producto para su exclusión del estudio.

*Calidad de los datos.* Característica de los datos que se relaciona con su capacidad para satisfacer los requisitos establecidos.

*Unidad funcional.* Desempeño cuantificado de un sistema del producto para su utilización como unidad de referencia.

*Flujo intermedio.* Flujo de producto, de materia o de energía que ocurre entre procesos unitarios del sistema del producto bajo estudio.

*Producto intermedio.* Salida de un proceso unitario que es entrada de otros procesos unitarios que requiere una transformación adicional dentro del sistema.

*Energía de proceso.* Entrada de energía requerida en un proceso unitario, para llevar a cabo el proceso o hacer funcionar el equipo, excluyendo las entradas de energía para la producción y suministro de esta energía.

*Sistema del producto.* Conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto, que desempeña una o más funciones definidas.

*Flujo de referencia.* Medida de las salidas de los procesos, en un sistema del producto determinado, requerida para cumplir la función expresada mediante la unidad funcional.

*Análisis de sensibilidad.* Procedimiento sistemático para estimar los efectos sobre el resultado de un estudio de las opciones elegidas en lo que respecta a métodos y datos.

*Análisis de la incertidumbre.* Procedimiento sistemático para cuantificar la incertidumbre introducida en los resultados de un análisis de inventario del ciclo de vida debido a los efectos acumulativos de la imprecisión del modelo, de la incertidumbre de las entradas y de la variabilidad de los datos.

*Proceso unitario.* Elemento más pequeño considerado en el análisis del inventario del ciclo de vida para el cual se cuantifican datos de entrada y salida.

*Residuo.* Cualquier objeto, material, sustancia, elemento o producto que se encuentra en estado

*Categoría de punto final.* Atributo o aspecto del entorno natural, la salud humana o los recursos que identifica un asunto ambiental de interés.

*Factor de caracterización.* Factor que surge de un modelo de caracterización, que se aplica para convertir el resultado del análisis del inventario del ciclo de vida asignado a la unidad común del indicador de categoría.



*Mecanismo ambiental.* Sistema de procesos físicos, químicos y biológicos para una categoría de impacto dada, que vincula los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida con indicadores de categoría y con puntos finales de categoría.

*Categoría de impacto.* Clase que representa asuntos ambientales de interés a la cual se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida.

*Indicador de categoría de impacto.* Representación cuantificable de una categoría de impacto.

*Verificación de integridad.* Proceso para verificar si la información de las fases de un análisis del ciclo de vida es suficientemente completa para llegar a conclusiones, de acuerdo con la definición del objetivo y el alcance.

*Verificación de coherencia.* Proceso, realizado antes de llegar a conclusiones, para verificar que las suposiciones, los métodos y los datos se aplican de forma coherente en todo el estudio y están de acuerdo con la definición del objetivo y el alcance.

*Verificación del análisis de sensibilidad.* Proceso para verificar que la información obtenida de un análisis de sensibilidad es pertinente para extraer conclusiones y formular recomendaciones.

*Revisión crítica.* Proceso que pretende asegurar la coherencia entre un análisis del ciclo de vida y los principios y requisitos de las normas internacionales sobre análisis del ciclo de vida.

*Parte interesada.* Persona o grupo que tiene un interés o está afectado por el desempeño ambiental de un sistema del producto o por los resultados del análisis del ciclo de vida.

## **Anexo 2. Procedimientos y cálculos para el desarrollo del inventario de ciclo de vida**

### 2.1 Transporte

El transporte de los materiales consideró la distancia desde el proveedor hasta la clínica renal. Esta información se consultó a partir del inventario general de compras y proveedores de la clínica. Con base en ello, se investigaron las ubicaciones de todos los proveedores y se trazó una ruta de transporte en la aplicación web “Google-Maps”. Para el medio de transporte, se consideraron las tecnologías “EURO3 rest of world” de la base de datos “Ecoinvent Allocation Default Unit” v 3.0 para los vehículos de carga. Al obtener la cantidad de materiales y la distancia de transporte, se procedió a calcular el indicador “toneladas-kilómetro con base en la Ecuación 2.1.

Ecuación 2.1. Cálculo de las toneladas-kilómetro

$$tkm = m * d$$

Donde:

*tkm:* Toneladas-kilómetro

*m:* Masa o cantidad de material transportado

*d:* Distancia recorrida

El medio de transporte y la procedencia de los pacientes y personal médico se consultaron directamente con ellos y de igual forma la ruta de transporte se trazó a partir de “Google-Maps”. Para la modelación del transporte, se consideraron las tecnologías “EURO3 rest of world” para los vehículos de pasajeros y el “Transport, transit bus, diesel powered” para transporte público.

### 2.2 Servicio renal

Para esta etapa los flujos de entrada incluyen: los materiales de cada proceso, agua potable y energía eléctrica y los flujos de salida incluyen: RSU, RPBI y AR. A continuación, se describen los métodos de cálculo de las entradas y salidas.

#### Materiales

A partir del inventario general de materiales, las cantidades y tipos de materiales empleados se clasificaron según los requerimientos de cada proceso, es decir; se agruparon los materiales para el TxA, los materiales para la E, el PA, la LF y la HD. Una vez agrupados todos los tipos de materiales se organizaron de acuerdo a la cantidad (piezas) y el peso (kg)

#### Electricidad

Se calcularon los requerimientos de energía eléctrica con base en la cantidad de aparatos, la potencia eléctrica del aparato y el tiempo de uso de la totalidad de equipos eléctricos utilizados en cada proceso. El cálculo se realizó con base en la Ecuación 2.2.

Ecuación 2.2. Cálculo de los requerimientos de electricidad



$$R_{EE} = (P * t) * FR$$

Donde:

$R_{EE}$ : Requerimiento de energía eléctrica

$P$ : Potencia eléctrica del equipo

$t$ : Tiempo de uso del equipo

$FR$ : Flujo de referencia

### 2.3 Agua

Se calcularon los requerimientos de agua en cada proceso consultando con el personal directamente encargado la cantidad de agua empleada para el PA, el LF y la HD. La Tabla 2.1, presenta los métodos y consideraciones para los cálculos de los requerimientos de agua.

Tabla 2.1 Cálculo de los requerimientos de agua en los procesos unitarios de la asistencia renal artificial

VARIABLES IMPLICADAS	Método
Procesamiento de ácidos ( $A_{PA}$ ) Agua para mezclado ( $A_M$ ) Agua para limpieza ( $A_L$ ) Flujo de referencia ( $FR$ )	Ecuación 2.1.1 Cálculo de los requerimientos de agua en el procesamiento de ácidos $A_{PA} = \sum (A_M * FR) + (A_L * FR)$
Limpieza de filtros ( $A_{LF}$ ) Tiempo de lavado ( $t_{FD}$ ) Volumen de agua ( $V_A$ ) Tiempo de lavado ( $t_{VAV}$ ) Volumen de agua ( $V_A$ ) Flujo de referencia	Ecuación 2.1.2 Cálculo de los requerimientos de agua en la higienización de filtros $A_{LF} = \sum (t_{FD} * V_A) + (t_{VAV} * V_A) * FR$
Hemodiálisis ( $A_{HD}$ ) Flujo de dializado ( $F_{HD}$ ) Tiempo de diálisis ( $t_{HD}$ ) Flujo de lavado ( $F_L$ ) Tiempo de lavado ( $t_L$ ) Flujo de referencia ( $FR$ )	Ecuación 2.1.3 Cálculo de los requerimientos de agua en la terapia de reemplazo renal $A_{HD} = \sum ((F_{HD} * t_{HD}) + (F_L * t_L)) * FR$
Tratamiento de agua ( $A_{TXA}$ ) Agua para PA ( $A_{PA}$ ) Agua para LF ( $A_{LF}$ ) Agua para HD ( $A_{HD}$ ) Agua de rechazo ( $A_{RTX}$ ) Flujo de referencia ( $FR$ )	Ecuación 2.1.4 Cálculo de los requerimientos de agua en el tratamiento de agua $A_{TXA} = \sum (A_{PA} + A_{LF} + A_{HD} + A_{RTX}) * FR$

### 2.4 Fin de vida

#### 2.4.1 Residuos sólidos urbanos

Los RSU incluyen todos los residuos del empaque derivados de los materiales empleados en los procesos unitarios del servicio renal. Se realizó un balance de masa entre los materiales de entrada y los materiales de salidas, los cuales incluyen el flujo de RSU (Figura 2.1).

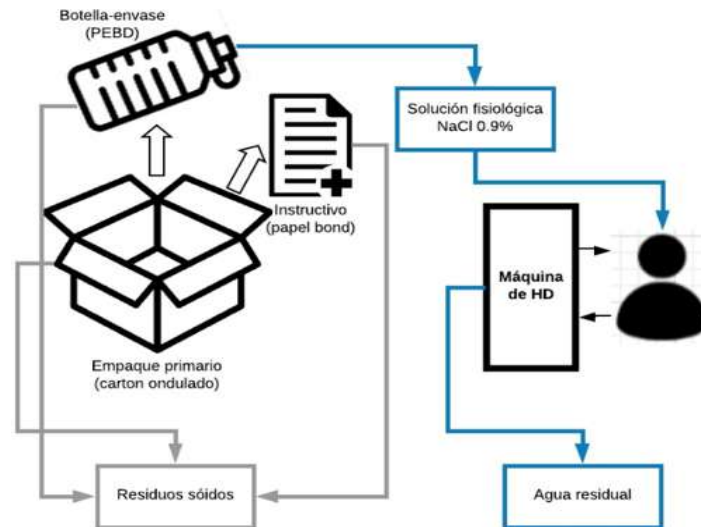


Figura 2.1 Balance entre el flujo de materiales y RSM. La caja de cartón ondulado contiene 12 envases de PEBD y un instructivo de papel bond, los cuales en su conjunto componen los RSM. La solución fisiológica NaCl al 0.9% en 1000 ml de solución es para el sostén del paciente y a través de la máquina de HD, el exceso de agua se vierte en el flujo de AR.

#### 2.4.2 Residuos peligrosos biológico-infecciosos

La cantidad de materiales peligrosos generados por la atención a un paciente se obtuvo a partir de los registros de la clínica. Además se realizó un balance de masa entre los materiales de entrada y los materiales de salidas, los cuales incluyen el flujo de RPBI (Figura 2.2).

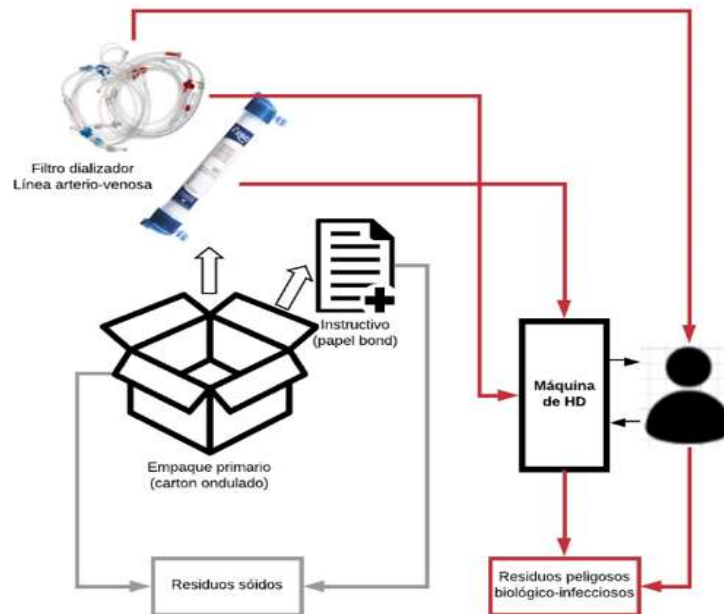


Figura 2.2 Balance entre el flujo de materiales y RPBI. La caja de cartón ondulado contiene 12 filtros dializadores y líneas arterio-venosas, ambos son utilizados durante la HD en un máximo de doce veces. Al fin de su vida útil, el filtro y las líneas arterio-venosas son eliminados en la corriente de RPBI y los materiales de empaque (cartón ondulado, PEBD y papel bond), se eliminan en el flujo de RSM.

#### 2.4.3 Agua residual

El cálculo del agua residual incluye un balance entre el agua empleada en los procesos de PA, LF, HD y TxA, más el agua de rechazo del sistema de tratamiento de agua (Ecuación 2.1.4). Finalmente los datos se organizaron en una plantilla de MS Excel y se asociaron con su nombre equivalente de las bases de datos de SimaPro v 8.5.0. La Tabla 3, muestra el inventario de ciclo de vida para la asistencia renal artificial. El material suplementario contiene la información con mayor detalle sobre el ICV de la asistencia renal artificial.

### Anexo 3. Perfil de consumo eléctrico

El perfil consistió en estimar la cantidad de energía eléctrica requerida por proceso unitario, de acuerdo a las actividades realizadas. Para esto, se realizó una inspección del uso de todos los aparatos eléctricos en todas las áreas de trabajo de la clínica. En cada área se registró el tipo, marca, potencia eléctrica (W), cantidad y tiempo de uso (h) de todos los aparatos eléctricos y a partir de estos datos se calculó la energía eléctrica utilizada (kWh) por día y mes con forme a la Ecuación 3.1

Ecuación 3.1. Cálculo del requerimiento de electricidad por proceso unitario

$$REE = Eq * P * t$$

Donde:

*REE*: Requerimiento de energía eléctrica (Wh día<sup>-1</sup>, kWh mes<sup>-1</sup>).

*Eq*: cantidad de equipos eléctricos.

*P*: potencia eléctrica del aparato (W, kW).

*t*: tiempo de uso del aparato (min., h, días).

Posteriormente, los resultados se compararon con los registros del recibo de CFE y determinar un tope máximo en los kWh registrados. A continuación se presentan los resultados de la distribución del consumo de electricidad.

Tabla 3.1 Distribución del consumo de electricidad para el servicio renal

Proceso	Tipo de aparato	Cantidad	Marca	Potencia (W)	Tiempo (h)	(kWh mes <sup>-1</sup> )
A	Lámpara de barra fluorescente	2	TECNO LIT	65	2	6.2
	Foco fluorescente	11	PHILLIPS	37	4	51.7
	Mini Split	1	MIRAGE	1200	8.4	219.1
	Laptop	1	HP	105	2	5.0
	Impresora	1	HP	449	1	10.8
	Teléfono	1	PANASONIC	3	24	1.9
	Panel LED	3	-----	37	9.4	16.2
	PC (Monitor y CPU)	8	-----	761	9	1,314.1
	Bocinas	4	-----	2	9	1.6
	Impresora	3	-----	384	5	138.3
	Laptop	1	ACER	107	4	10.3
	Módem	1	HUAWEI	28	9	6.1
	Teléfono	1	PANASONIC	3	9	0.7
	Cafetera	1	TAURUS	650	4	76.3
	Frigobar	1	GE	245	0.8	4.7
	Cafetera	1	DOLCA	145	0.4	1.4
	Televisor	1	PHILLIPS	150	0.4	1.4
	CPU	1	EMACHINES	235	0.4	2.3
	Dispensador para agua	1	WATER FRESH	520	0.8	10.0
	Receptor satelital	1	-----	25	0.4	0.2
	Teléfono	1	PANASONIC	2	0.4	0.0
	Laptop	1	HP	40	0.4	0.4
	Ventilador de Techo	1	-----	150	1	1.8
	Refrigerador	1	ACROS	125	4	12.0
	Microondas	1	LG	1450	0	3.5
Dispensador de agua	1	WATER FRESH	520	6	74.9	
TxA	Bomba de agua	4	SIX-TEAM	895	6	515.4
	Lámpara de barra fluorescente	4	PHILLIPS	70	1	6.7
	Tanque salmuera	1	AC ADAPTADOR PUG	9	8	1.7
	Filtro multimedia	1	IN CLASS	9	8	1.7
	Filtro suavizador	1	TRANSFORMER	10	8	1.9
	Filtro de carbono activado	2		10	8	3.8
	Bomba de agua	2	WATER TEC	746	5	178.9
	Bomba multipasos	2	ALTAMIRA	1118	5	268.4
	Filtro de rayos UV	1	POLARIS	20	24	11.5
	Bomba de agua	1	BALDOR RELIANCE	1118	5	134.2
	1	PEDROLLO	2645	5	317.4	
	1	DELTA	1100	5	132.0	



E	Foco fluorescente	1	PHILLIPS	37	2	1.8
	Esterilizador	1	ECO	6,000	2	288.0
PA	Lámpara de barra fluorescente	2	PHILLIPS	77	10	37.0
	Máquina de ácidos	1	MARATHON	249	3	17.9
HF	Lámpara de barra fluorescente	2	PHILLIPS	77	10	36.96
	Máquina de hemodiálisis	16	FRESENIUS 2008K	1400	12	3225.6
	Lámpara de barra fluorescente	20	OSRAM	30	6	86.4
HD	Lámpara de barra fluorescente	10	PHILLIPS	77	6	110.9
	Televisión	2	HITACHE	65	6	18.72
	PC (Monitor y CPU)	1	LENOVO	275	6	39.6
		1	LENOVO	65	6	9.36
	Lámpara de barra fluorescente	2	PHILLIPS	77	6	22.2
Ventilador de torre	1	LASKCO	40	2	1.9	

#### Anexo 4. Perfil de consumo de agua en el servicio renal

El perfil consistió en estimar la cantidad de agua requerida por proceso unitario. Los cálculos se realizaron con base a lo reportado por el personal responsable de cada área, y se empleó la Ecuación 4.1.

Ecuación 4.1. Cálculo del caudal

$$Q = V * A$$

Donde:

$Q$ : Caudal o flujo de agua ( $m^3 s^{-1}$ ,  $L min^{-1}$ ,  $cm^3 s^{-1}$ )

$V$ : Velocidad con la que se desplaza el flujo ( $m s^{-1}$ ,  $km h^{-1}$ )

$A$ : Área de la sección transversal del tubo por donde fluye el agua ( $m^2$ ,  $cm^2$ ,  $mm^2$ )

Posteriormente, los resultados se compararon con los registros del recibo de OOAPAS para determinar un tope máximo de  $m^3$  registrados. A continuación, se presentan los resultados de la distribución del consumo de agua.

Tabla 4.1. Resultados del perfil de consumo de agua en el servicio renal

Proceso/Área	Asignación	L día <sup>a</sup>	m <sup>3</sup> mes <sup>a</sup>
Cocina	Al menos uno de cada tres trabajadores (10) utilizan la cocina una vez por día. Por cada uso, se consumen aproximadamente 3 L de agua, con un flujo de 1 L/15 segundos.	30.0	0.7
Sala de espera	La tercera parte de los usuarios (31) entre pacientes y acompañantes, utilizan el sanitario al menos 1 vez. Por cada uso, el sanitario desecha 12 L de agua más 3 L por el lavado de manos, con un flujo de 1L/15 segundos.	465.0	11.2
A Estacionamiento	Al menos dos trabajadores utilizan el sanitario del estacionamiento por día. Por cada uso, el sanitario desecha 12 L de agua más 3 L por el lavado de manos, con un flujo de 1L/15 segundos.	30.0	0.7
Administración	La mitad de los trabajadores (16) utilizan el sanitario de la unidad al menos una vez al día. Por cada uso, el sanitario desecha 12 L de agua más 3 L por el lavado de manos, con un flujo de 1L/15 segundos.	240.0	5.8
Mantenimiento y aseo general	Aproximadamente se utilizan 150 L por día para el aseo de la clínica y cada fin de semana se emplean 250 L en aseo general de toda la clínica.	191.7	4.6
TxA Tratamiento de aguas	En promedio al día son sometidos a tratamiento un flujo cercano a 19 m <sup>3</sup> de agua. El sistema de tratamiento tiene una eficiencia del 50%, por lo que 9.5 m <sup>3</sup> entran al servicio de hemodiálisis y el restante 9.5 m <sup>3</sup> son rechazados al desagüe.	9956.5	239.0
HF Procesamiento de ácidos	Cada día se esterilizan 34 filtros dializadores con línea arterio-venosa. Por cada filtro se requieren aproximadamente 142 L de agua, con un flujo de 1 L/6.9 segundos durante 12 minutos	4828.0	115.9
PA Procesamiento de ácidos	Al mes se preparan 7 mezclas de solución con dializadora y por mezclado son requeridos 500 L. Considerando que se laboran 24 días al mes, cada día son requeridos alrededor de 190 L de solución dializadora	145.8	3.5
HD Sala de HD	Al día son realizadas 34 sesiones de HD. Cada sesión se realiza con un flujo de 800 ml min <sup>-1</sup> durante tres horas.	4896.0	117.5
Total		20783.0	498.8

**Anexo 5. Estudio de caracterización de residuos sólidos municipales**

Se realizó un estudio de caracterización de residuos sólidos, con la finalidad de identificar la composición de la corriente de residuos generados por el servicio de HD. A partir de este estudio se realizaron las proyecciones de la generación de residuos para el periodo que marca la unidad funcional (un mes de servicio).

Procedimiento:

El estudio de caracterización se realizó durante cinco días continuos en el sitio de estudio. En el lugar, se pesó la totalidad de residuos generados el día anterior y de estos se extrajo una muestra representativa con base. La muestra fue seleccionada de acuerdo al método de cuarteo de residuos con forme a la norma técnica NMX-AA-015-1985. El tamaño de la muestra seleccionado durante los cinco días de muestreo, osciló entre el 32 y 59% del total de los residuos generados (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Generación y tamaño de la muestra de residuos. Estudio de caracterización

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Generación de RS (kg)	39.9	39.5	47.4	32.7	42.6
Tamaño de la muestra (kg)	13.1	21.6	25.2	19.0	23.1
Porcentaje medido (%)	32.8	54.8	53.1	58.1	54.2

Posteriormente, la muestra de residuos seleccionada se clasificó según las categorías que marca la NMX-AA-022-1985 (DOF, 1992a,b), y con base en la fracción porcentual caracterizada, se realizó la proyección de la generación total de residuos.

Por ejemplo:

$$\frac{250 \text{ g}}{X} = \frac{32.8 \%}{100 \%}$$

En el día 1 del estudio se caracterizó un total de 250 g de papel bond. Asumiendo que la muestra es 100% homogénea, la cantidad encontrada de papel bond corresponde al 32.8%.

$$\frac{250 \text{ g} (100 \%)}{32.8 \%}$$

De este modo, se realiza la extrapolación lineal multiplicando los factores cruzados.

$$x = 762.2 \text{ g}$$

El resultado significa que en esa corriente de residuos, se habría encontrado un total de 762.2 g de papel bond.

Este procedimiento se repitió para todas las cantidades de residuos identificadas. En la Tabla 5.2, se muestran los resultados.



Tabla 5.2 Resultados del estudio de caracterización de residuos sólidos

Categoría		n total (kg)		Generación (kg)	
Papel	Bond	0.7	1.6	1.9	7.7
	Periódico	0.1	0.1	0.2	0.6
	Encerado	1.6	3.1	3.7	14.9
	Estraza	2.8	5.6	6.8	27.0
	Total	5.1	10.5	12.6	50.3
Cartón	Compacto	3.0	6.1	7.3	29.1
	Ondulado	33.3	0.0	40.0	159.8
	Encerado	3.5	7.1	8.6	34.2
	Total	39.9	13.2	55.8	223.2
Plástico	PEAD	4.4	8.1	9.7	38.9
	PEBD	11.2	22.2	26.7	106.8
	PP	4.1	7.9	9.5	38.1
	PVC	1.4	2.5	3.0	12.2
	PS	3.8	7.3	8.8	35.0
	PET	2.0	4.1	5.0	19.8
	Total	26.7	52.2	62.7	250.8
Metal	Ferroso	0.0	0.1	0.2	0.7
	No ferroso	0.4	0.8	1.0	3.9
	Total	0.5	1.0	1.1	4.6
Vidrio	Medicamento	2.5	5.0	6.0	24.0
	Alimentos	2.1	3.9	4.6	18.5
	Total	4.5	8.9	10.6	42.5
Textiles	Sintéticos	1.5	3.0	3.6	14.3
	Algodón	2.0	4.0	4.8	19.1
	Total	3.5	7.0	8.3	33.4
Sanitarios	Pañales	0.4	0.7	0.8	3.2
	Papel sanitario	14.9	29.5	35.4	141.5
	Látex	7.5	15.5	18.6	74.2
Orgánicos		4.5	10.1	12.1	48.3
Otros		20.2	0.4	24.5	98.0
Total		127.8	148.8	242.5	969.9