



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS  
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**UNIDAD ZACATENCO**

**PROGRAMA DE DESARROLLO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO PARA  
LA SOCIEDAD**

**“Análisis de sostenibilidad de dos escenarios de gestión de  
residuos orgánicos: biorrefinería que genera bioenergías,  
enzimas industriales y nanobiopartículas (H-M-Z-S-NN) e  
incineración con recuperación de energía”**

**T E S I S**

Que presenta

**I.Q. ALEJANDRA GABRIELA YÁÑEZ VERGARA**

Para obtener el grado de

**DOCTORA EN CIENCIAS**

**EN LA ESPECIALIDAD DE DESARROLLO CIENTÍFICO Y  
TECNOLÓGICO PARA LA SOCIEDAD**

Director de la Tesis:

**Dr. Héctor M. Poggi-Varaldo**

Ciudad de México

AGOSTO, 2022

## COMITÉ TUTORIAL

**Dra. Perla Sotelo Navarro**, Asesor  
Programa en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad  
Cátedra CONACYT - Cinvestav

**Dr. José Víctor Calderón-Salinas**, Asesor  
Investigador Titular Cinvestav 3C  
Departamento de Bioquímica  
Cinvestav Zacatenco

**Dra. Rocío Sánchez-Pérez**, Asesor  
Secretaria Académica  
Centro Mexicano para la Producción más Limpia del IPN

**Dr. Yasuhiro Matsumoto-Kuwahara**, Asesor  
Investigador Cinvestav 3C  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Sección electrónica del estado sólido  
Cinvestav Zacatenco

**Dr. Miguel Ángel Pérez Angón**, Asesor  
Departamento de Física  
Cinvestav Zacatenco

**Dr. Héctor Mario Poggi Varaldo**, Director  
Investigador Titular 3D  
Departamento de Biotecnología y Bioingeniería  
Cinvestav Zacatenco

Alejandra Gabriela Yáñez Vergara agradece al Consejo Nacional de la Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (614106)

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente a mi Director de tesis el Dr. Héctor Mario Poggi-Varaldo por compartir su invaluable conocimiento, por su importante guía y acompañamiento en cada momento.

A mi Comité tutorial por sus importantes enseñanzas, y asesoría.

A la Dra. América Padilla Viveros por su acompañamiento, apoyo y guía en este proceso.

A mis Profesores y personal administrativo del Programa en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad.

A Sonia Solórzano Frias por su apoyo en las gestiones administrativas.

Al Lic. Miguel Sosa por su apoyo con el equipo técnico.

A Claudia Barbosa Fernández y Ana María Téllez González por sus servicios secretariales.

*Este trabajo es el producto de la bondad y la paciencia infinita de las personas maravillosas que me rodean y me inspiran a mejorar cada día.*

*Entre todas ellas, la principal es mi madre, quien siempre ha visto lo mejor de mí y quien ha trabajado incansablemente para asegurarse de que alcance mis metas.*

*A mi abuela por fortalecerme en todos los sentidos y por su apoyo incondicional.*

*A mi familia por hacerme mejor persona con su amor y apoyo.*

*A mis amigos por estar conmigo en cada momento y por creer en mí.*

NOS ENCONTRAMOS EN ESTE DÍA,  
EN ESTE TIEMPO, EN ESTE MOMENTO.

*Si tenemos suerte, despertaremos a  
las circunstancias, a la belleza que tenemos  
delante: un caleidoscopio asombroso y abierto  
de patrones interconectados de percepción.*

*El acto de despertar puede ocurrir por  
casualidad, o podemos decidir que vale la pena  
tomarnos el tiempo y el esfuerzo con el fin de  
crear las condiciones para que ocurra.*

*A veces, todo encuentra su lugar correspondiente,  
como un rompecabezas que esperaba ser resuelto;  
en otros momentos, los componentes de la forma,  
del movimiento, de la mente y de la atención  
parecen ser partes de historias que se entre mezclan.*

*Entonces, comprendemos que lo único que  
debemos hacer es estar presentes.*

## RESUMEN

Se realizó un análisis comparativo de la legislación de biorrefinerías (BRF's) en México, respecto a las legislaciones de la Unión Europea (UE) y de los Estados Unidos de América (EUA).

Los resultados muestran que no existen legislaciones en materia de BRF en México y por lo tanto en comparación con las legislaciones de EUA y la UE, México muestra un rezago. Sin embargo, la legislación en México ha tenido un avance importante en materia de bioenergía, lo cual puede ser utilizado como base para la generación de legislaciones sobre BRF.

Se realizó un análisis comparativo de sostenibilidad ambiental de dos tecnologías que procesan la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en México. El esquema de biorrefinería que produce bioenergías, enzimas, ácidos orgánicos y nanopartículas (H-M-Z-S-NN) e incineración con recuperación de energía (IRE).

El análisis se realizó mediante el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). La unidad funcional (UF) fue 1000 kg de FORSU. Se evaluaron 18 categorías de impactos ambientales potenciales utilizando el método ReCiPe (H) mid-point 2016.

Respecto a la generación de energía, la BRF H-M-S-Z-NN generó más energía eléctrica neta (170 kWh/UF) que la IRE (129.3 kWh/UF).

En ambas tecnologías predominaron cuatro impactos ambientales potenciales normalizados (NPEI, por sus siglas en inglés) ecotoxicidad marina, toxicidad humana cancerígena, toxicidad humana no cancerígena y ecotoxicidad en agua dulce.

La suma de los 18 NPEI fue 179.1 y 40.7 persona\*año para IRE y BRF, respectivamente. Para la IRE, las contribuciones de las emisiones al agua de Cr, As y Zn relacionados con la ecotoxicidad marina y de agua dulce.

Para la BRF, el proceso de mayor contribución a la categoría de toxicidad humana es la etapa Z. Debido a las emisiones derivadas del tratamiento de ácido fosfórico al suelo y al agua. Por su parte la etapa NN está implicado en la elaboración de carbón activado a partir de carbón fósil.

En cuanto a la generación de energía, la BRF H-M-S-Z-NN generó más energía eléctrica neta (170 kWh/UF) que la IRE (129.3 kWh/UF). El ACV indica que la BRF de FORSU es más ambientalmente sostenible que la IRE en México.

## ABSTRACT

A comparative analysis of the biorefinery legislation (BRFs) in Mexico was carried out, concerning the legislation of the European Union (EU) and the United States of America (USA).

The results show that there are no laws on BRF in Mexico and therefore compared to the laws of the US and the EU, Mexico shows a lag. However, the legislation in Mexico has had an important advance in the matter of bioenergy, which can be used as a basis for the generation of legislation on BRF.

A comparative analysis of the environmental sustainability of two technologies that process the organic fraction of urban solid waste (FORSU) in Mexico was carried out. The biorefinery scheme produces bioenergy, enzymes, organic acids, and nanoparticles (H-M-Z-S-NN) and incineration with energy recovery (IRE).

The analysis was performed using the Life Cycle Analysis (LCA). The functional unit (UF) was 1000 kg of FORSU. 18 categories of potential environmental impacts were evaluated using the ReCiPe (H) mid-point 2016 method.

Regarding energy generation, the BRF H-M-S-Z-NN generated more net electrical energy (170 kWh/UF) than the IRE (129.3 kWh/UF).

Four Standardized Potential Environmental Impacts (NPEIs) predominated in both technologies: freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity, carcinogenic human toxicity, and non-cancer human toxicity.

The sum of the 18 NPEIs was 179.1 and 40.7 person\*year for IRE and BRF, respectively. For the IRE, the contributions of emissions to the water of Cr, As and Zn are related to freshwater and marine ecotoxicity.

For the BRF, the process with the greatest contribution to the category of human toxicity is stage Z. Due to the emissions derived from the treatment of phosphoric acid in the soil and water. For its part, the NN stage is involved in the elaboration of activated carbon from fossil carbon.

Regarding energy generation, the BRF H-M-S-Z-NN generated more net electrical energy (170 kWh/UF) than the IRE (129.3 kWh/UF). The LCA indicates that FORSU's BRF is more environmentally sustainable than the IRE in Mexico.



## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS .....	xvii
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	20
1.1 Residuos sólidos urbanos en México .....	22
1.2 Biorrefinería de residuos sólidos orgánicos.....	24
1.3 Incineración de residuos sólidos urbanos.....	27
1.4 Análisis de ciclo de vida .....	29
2. JUSTIFICACIÓN.....	33
3. HIPÓTESIS.....	34
4. OBJETIVOS.....	35
5. ALCANCE.....	36
6. METODOLOGÍA .....	37
6.1 Plan de trabajo .....	37
6.2 Actividad 1. Análisis de legislación de biorrefinerías en México .....	38
6.2.1 Propósito .....	38
6.2.2 Métodos y procedimientos.....	38
6.3 Actividad 2. ACV de una planta de incineración con recuperación de energía que procesa la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.....	41
6.3.1 Propósito .....	41
6.3.2 Métodos y procedimientos.....	41
6.3.3 Definición de objetivo y alcance del estudio .....	41
6.3.3.1 Objetivo .....	41
6.3.3.2 Unidad funcional.....	42
6.3.3.3 Flujo de referencia .....	42
6.3.3.4 Sistema elegido y descripción .....	42
6.3.3.5 Límites del sistema .....	42
6.3.4 Análisis de inventarios de ciclo de vida .....	44
6.3.4.1 Descripción entradas y salidas del proceso de incineración.....	44
6.4 Actividad 3. ACV comparativo de dos tecnologías de procesamiento de RSO, biorrefinería HMZSNN e incineración con recuperación de energía. ....	47

6.4.1	Propósito .....	47
6.4.2	Métodos y procedimientos.....	47
6.4.3	Definición, objetivo y alcance .....	47
6.4.3.1	Objetivo .....	47
6.4.3.2	<i>Función del producto</i> .....	47
6.4.3.3	<i>Unidad funcional</i> .....	47
6.4.3.4	<i>Flujo de referencia</i> .....	48
6.4.3.5	<i>Sistema elegido y descripción</i> .....	48
6.4.3.6	Límites del sistema .....	48
6.4.4	Análisis de inventario.....	49
6.4.5	Análisis de impactos de ciclo de vida .....	49
6.4.5.1	Interpretación.....	50
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	51
7.1	Actividad 1. Análisis de Legislación de BRF en México y países selectos .....	51
7.1.1	Marco legal de biorrefinerías en México .....	51
7.1.2	Marco legal de biorrefinerías en la Unión Europea.....	53
7.1.3	Marco legal de biorrefinerías en Estados Unidos .....	54
7.1.4	Análisis del marco legal de México para la bioenergía.....	55
7.2	Actividad 2. Análisis de Ciclo de Vida de un incinerador con recuperación de energía que procesa la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos .....	62
7.2.1	Análisis de inventarios del ciclo de vida para incineración con recuperación de energía 62	
7.2.1.1	<i>Balance de masa</i> .....	65
7.2.1.2	<i>Requerimientos teóricos del aire</i> .....	66
7.2.1.3	Oxígeno requerido .....	69
7.2.1.4	<i>Productos de combustión</i> .....	70
7.2.1.5	Balance de energía.....	70
7.2.1.6	<i>Inventario del ciclo de vida de incineración con recuperación de energía</i> 71	
7.2.1.7	Análisis de calidad de datos .....	78
7.2.2	Resultados de evaluación de impactos del ciclo de vida de incineración con recuperación de energía.....	80
7.2.2.1	Resultados de análisis de impactos, por categoría de impacto, efectos porcentuales de incineración con recuperación de energía.....	80

7.2.2.2	Resultados de análisis de impactos, por categoría de impacto, efectos normalizados de incineración con recuperación de energía. ....	82
7.2.2.3	Resultados de contribución a procesos en la tecnología de IRE a categorías de impacto.....	85
7.2.2.3.1	Toxicidad humana cancerígena.....	85
7.2.2.3.2	Tóxicas a la salud humana no cancerígena .....	87
7.2.2.3.3	Ecotoxicidad marina .....	89
7.2.2.3.4	Ecotoxicidad al agua dulce .....	91
7.2.2.3.5	Calentamiento global.....	93
7.2.2.3.6	Ecotoxicidad terrestre.....	95
7.2.2.3.7	Formación de ozono y salud humana.....	97
7.2.2.3.8	Formación de ozono en ecosistemas terrestres .....	99
7.2.2.3.9	Deterioro de ozono en la estratósfera .....	101
7.2.3	Interpretación.....	102
7.3	Actividad 3. Análisis de Ciclo de Vida comparativo de dos tecnologías de procesamiento de RSO, biorrefinería HMZSNN e incineración con recuperación de energía. ....	109
7.3.1	Análisis de inventario de ciclo de vida .....	109
7.3.2	Resultados de Análisis de Impacto de vida.....	116
7.3.2.1.	Resultados de las categorías de impacto, efectos porcentuales de la BRF H-M-Z-S-NN .....	116
7.3.2.2.	Resultados de las categorías de impacto normalizados de la BRF H-M-Z-S-NN .....	120
7.3.3	Interpretación de BRF-H-M-S-Z-NN .....	121
7.3.4	Evaluación de impactos ambientales análisis comparativo de BRF H-M-S-Z-NN e incineración con recuperación de energía .....	129
7.3.4.1	Resultados de evaluación de impacto, análisis comparativo de BRF H-M-Z-NN e IRE sobre las categorías de impacto, efectos porcentuales.....	129
7.3.4.2	Resultados de análisis de impacto comparativo de BRF H-M-S-Z-NN e Incineración con recuperación de energía sobre las categorías de impacto, efectos normalizados.....	131
7.3.5	Interpretación de análisis comparativo de BRF H-M-S-Z-NN e incineración con recuperación de energía.....	133
8.	CONCLUSION.....	135
9.	REFERENCIAS .....	137

Anexo 1. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección del Medio Ambiente.....	145
Anexo 2. Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos .....	146
Anexo 3. Ley General del Cambio Climático .....	148
Anexo 4. Ley de Transición Energética .....	150
Anexo 5. Programa Nacional para la Prevención y Gestión integral de los Residuos 2017-2018. ....	152
Anexo 6. Detalles del artículo 28 de la LGEEPA .....	154
Anexo 7. Resultados de contribución de procesos a la categoría de radiación ionizante referente a la tecnología de IRE .....	155
Anexo 8. Resultados de contribución de procesos a la categoría de partículas finas 2.5 µm o menos referente a la tecnología de IRE .....	157
Anexo 9. Resultados de contribución de procesos a la categoría de acidificación terrestre referente a la tecnología de IRE .....	159
Anexo 10. Resultados de contribución de procesos a la categoría de eutroficación de agua dulce referente a la tecnología de IRE .....	161
Anexo 11. Resultados de contribución de procesos a la categoría de eutroficación marina referente a la tecnología de IRE .....	162
Anexo 12. Resultados de contribución de procesos a la categoría de uso de suelo referente a la tecnología de IRE .....	164
Anexo 13. Resultados de contribución de procesos a la categoría de escasez de recursos minerales referente a la tecnología de IRE .....	166
Anexo 14. Resultados de contribución de procesos a la categoría de escasez de recursos fósiles referente a la tecnología de IRE .....	168
Anexo 15. Resultados de contribución de procesos a la categoría de consumo de agua referente a la tecnología de IRE .....	170
Anexo 16. Resultados de contribución de procesos a la categoría de toxicidad humana cancerígena de la tecnología de BRF H-M-Z-S-NN.....	173
Anexo 17. Resultados de contribución de procesos a la categoría de toxicidad humana no cancerígena de la tecnología de BRF H-M-Z-S-NN.....	175
Anexo 18. Resultados de contribución de procesos a la categoría de ecotoxicidad marina de la tecnología de BRF H-M-Z-S-NN .....	177
Anexo 19. Resultados de contribución de procesos a la categoría de ecotoxicidad al agua dulce de BRF H-M-Z-S-NN .....	179
Anexo 20. Resultados de contribución de procesos a la categoría de ecotoxicidad terrestre de BRF H-M-Z-S-NN .....	181
Anexo 21. Resultados de contribución de procesos a la categoría de acidificación terrestre de BRF H-M-Z-S-NN .....	183

Anexo 22. Resultados de contribución de procesos a la categoría de eutroficación de agua dulce para BRF H-M-Z-S-NN.....	185
Anexo 23. Resultados de contribución de procesos a la categoría de calentamiento global de BRF H-M-Z-S-NN.....	187
Anexo 24. Resultados de contribución de procesos a la categoría de formación de ozono en ecosistemas terrestres de BRF H-M-Z-S-NN.....	189
Anexo 25. Resultados de contribución de procesos a la categoría deterioró de ozono en la estratosfera de BRF H-M-Z-S-NN.....	191
Anexo 26. Resultados de contribución de procesos a la categoría deterioró de ozono en la estratosfera de BRF H-M-Z-S-NN.....	193
Anexo 27. Resultados de contribución de procesos a la categoría deterioró de ozono en la estratosfera de BRF H-M-Z-S-NN.....	195
Anexo 28. Resultados de contribución de procesos a la categoría deterioró de ozono en la estratosfera de BRF H-M-Z-S-NN.....	197
Anexo 29. Resultados de contribución de procesos a la categoría de radiación ionizante de BRF H-M-Z-S-NN .....	199
Anexo 30. Resultados de contribución de procesos a la categoría de eutroficación marina de BRF H-M-Z-S-NN .....	201
Anexo 31. Resultados de contribución de procesos a la categoría de consumo de agua de BRF H-M-Z-S-NN .....	203
Anexo 32. Resultados de contribución de procesos a la categoría de escasez de recursos naturales de BRF H-M-Z-S-NN .....	205
Anexo 33. Resultados de contribución de procesos a la categoría de uso de suelo BRF H-M-Z-S-NN .....	206
Anexo 34. Proxis Ecoinvent SimaPro .....	208
Anexo 35. Publicaciones emanadas de la tesis.....	222

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.1. Composición de residuos sólidos urbanos en México.....	23
Tabla 1.2.1. Clasificación de biorrefinerías de acuerdo con la materia prima.....	25
Tabla 1.2.2. Ventajas y desventajas de la tecnología de biorrefinería.....	26
Tabla 1.2.3. Antecedentes de biorrefinerías en México.....	27
Tabla 1.3.1. Ventajas y desventajas de la IRE para RSU.....	28
Tabla 6.3.4.1 Descripción de entradas y salidas de la tecnología de IRE .....	44
Tabla 6.3.5.1. Descripción de categorías de impacto.....	46
Tabla 6.4.3.6. Descripción de las etapas principales de la biorrefinería HMZSNN.....	49
Tabla 7.1.1.1. Descripción de instrumentos regulatorios de bioenergía en México.....	52
Tabla 7.1.2.1 Marco legal de biorrefinerías en la Unión Europea (textos consolidados)..	53
Tabla 7.1.3.1. Marco legal de EUA referente a la tecnología de biorrefinería.....	54
Tabla 7.1.4.1. Producción de biocombustibles en la Unión Europea y México.....	56
Tabla 7.1.4.2. Número de biorrefinerías operativas en México y países selectos.....	57
Tabla 7.1.4.2. Análisis del marco legal de bioenergía en México con respecto a instrumentos económicos y de mercado.....	58
Tabla 7.1.4.3. Análisis del marco legal de bioenergía en México respecto a garantías ambientales.....	59
Tabla 7.1.4.4 Análisis sobre áreas de oportunidad en el marco legal de bioenergía en México.....	60
Tabla 7.2.1.1.1. Composición y contenido energético de los residuos sólidos orgánicos en México, características típicas (porcentaje en peso, base húmeda).....	66
Tabla 7.2.1.2.1. Peso de los elementos que conforman la FORSU seca.....	67
Tabla 7.2.1.2.2. Requerimientos teóricos de aire para la combustión de 650 kg FORSU seca.....	68
Tabla 7.2.1.4.1. Factores de adecuación tecnológica.....	70
Tabla 7.2.1.5.1. Balance de energía de IRE.....	71
Tabla 7.2.1.6.1. Inventario de ciclo de vida de IRE.....	72
Tabla 7.2.7.1. Análisis de calidad de datos de IRE .....	79
Tabla. 7.2.2.1.1. Efectos porcentuales de la IRE sobre las categorías de impactos ambientales.....	81
Tabla 7.2.2.2.1. Efectos normalizados de IRE sobre las categorías de impactos ambientales, organizado por productos: calor y energía eléctrica.....	83
Tabla 7.2.2.3.1.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE, a la categoría toxicidad humana de tipo cancerígena.....	86
Tabla 7.2.2.3.2.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE, a la categoría toxicidad humana de tipo no cancerígena.....	88

Tabla 7.2.2.3.4.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología IRE, a la categoría ecotoxicidad al agua dulce.....	92
Tabla 7.2.2.3.5.1. Contribuciones de la IRE a la categoría de calentamiento global.....	94
Tabla 7.2.2.3.6.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE, a la categoría ecotoxicidad terrestre.....	96
Tabla 7.2.2.3.7.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE, a la categoría de ozono y salud humana.....	98
Tabla 7.2.2.3.8.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE, a la categoría formación de ozono en ecosistemas terrestres.....	100
Tabla 7.2.2.3.9.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE, a la categoría sobre deterioro de ozono en la estratósfera.....	102
Tabla 7.2.3.1 Contribuciones por proceso de la tecnología de IRE.....	104
Tabla 7.2.3.1. Resumen de principales emisiones de IRE .....	108
Tabla 7.3.1.1. Inventario del ciclo de vida de biorrefinería H-M-Z-S-NN.....	110
Tabla 7.3.1.2. Balance de energías eléctrica y calor en la BRF H-M-S-Z-NN.....	116
Tabla. 7.3.2.1.1. Identificación de asuntos significativos en la BRF H-M-Z-S-NN.....	118
Tabla. 7.3.3.1 Contribución de etapas y procesos de BRF HMZSNN a categorías de impactos ambientales.....	122
Tabla 7.3.3.2. Resumen de principales emisiones de la tecnología de BRF.....	128
Tabla 7.3.4.1.1. Efectos porcentuales de BRF H-M-Z-S-NN e IRE sobre las categorías de impactos ambientales, organizado por productos: calor y energía eléctrica.....	130
Tabla 7.3.4.2.1. Efectos normalizados de BRF H-M-Z-S-NN e IRE sobre categorías de impactos ambientales, organizado por productos: calor y energía eléctrica .....	132

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.4.1. Evaluación del ciclo de vida.....	29
Figura 1.4.2. Evaluación de inventario del ciclo de vida .....	31
Figura 1.4.3. Categorías de impacto de punto medio y su relación con las áreas de protección.....	32
Figura 6.1.1. Esquema de plan de trabajo.....	37
Figura 6.2.2.1 Metodología sobre el análisis de legislación de BRFs en México.....	39
Figura 7.2.1.1. Diagrama incineración con recuperación de energía.....	63
Figura 7.2.2.1.1. Tendencias de los efectos porcentuales de la incineración con recuperación de energía sobre las categorías de impactos ambientales.....	80
Figura 7.2.2.2.1. Tendencias sobre los efectos normalizados de la incineración con recuperación de energía sobre las categorías de impactos ambientales. ....	82
Figura 7.2.2.3.1.1. Contribuciones generales de los procesos de la IRE, a la categoría toxicidad humana de tipo cancerígena.....	85
Figura 7.2.2.3.2.1. Contribuciones generales de los procesos de la IRE, a la categoría de toxicidad humana no cancerígena.....	87
Figura 7.2.2.3.3.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología IRE, a la categoría ecotoxicidad marina.....	89
Figura 7.2.2.3.4.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE, a la categoría ecotoxicidad al agua dulce.....	91
Figura 7.2.2.3.5.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE a la categoría de calentamiento global.....	93
Figura 7.2.2.3.6 Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE, a la categoría de ecotoxicidad terrestre.....	95
Figura 7.2.2.3.7.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE, a la categoría formación de ozono y salud humana.....	97
Figura 7.2.2.3.8.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE, a la categoría sobre deterioro de ozono en ecosistemas terrestres.....	99
Figura 7.2.2.3.9.1. Contribuciones generales de la tecnología de IRE, a la categoría deterioro de ozono a la estratósfera.....	101
Figura 7.3.1.1. Diagrama biorrefinería H-M-Z-S-NN.....	109
Figura 7.3.2.1.1. Tendencias de los efectos porcentuales de las etapas de BRF H-M- Z-S-NN sobre las categorías de impactos ambientales.....	117
Figura 7.3.2.2.1. Tendencias de los efectos normalizados de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN sobre las categorías de impactos ambientales.....	120



**ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS**

ACV	análisis de ciclo de vida
AOV	ácidos orgánicos volátiles
BRF	biorrefinería
DBGIR	Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos
EUR-lex	Legislación de la Unión Europea
ESP	Precipitador electrostático para cenizas volantes
FORSU	fracción orgánica de los residuos sólidos orgánicos
GEI	gases de efecto invernadero
H	etapa de producción de hidrógeno
H-M-Z-S-NN	BRF que conjunta la producción biológica de hidrógeno, metano, enzimas para la industria y nanobiopartículas
M	etapa de generación de metano
NN	etapa de producción de nanobiopartículas en la BRF
S	etapa sacarificación o hidrólisis ácida de FW extraídos en la BRF
Z	etapa de producción de enzimas en la BRF
IRENA	Agencia Internacional de las Energías Renovables (por sus siglas en inglés)
LAERFTE	Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética
LHG	Limpieza húmeda de gases
LPDB	Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos
LGCC	Ley General de Cambio Climático
LGPGI	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

LOAPF	Ley orgánica de la Administración Pública Federal
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ODS	Objetivos del Desarrollo Sostenible
PIA	Potenciales impactos ambientales
PIAN	Potenciales impactos ambientales normalizados
PNPGIR	Prevención y Gestión Integral de Residuos
RSO	Residuos Sólidos Orgánicos
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SENER	Secretaría de Energía
SCR	Sistema de reducción catalítica selectiva
SNCR	Sistema de reducción catalítica no selectiva
TGC	Tratamiento de gases de combustión
WoS	Web of science

## Nomenclatura

IAPN	Impactos ambientales potenciales normalizados
$j$	elemento
$m_j$	masa seca de cada elemento
$m_{asr}$	masa de aire seco requerido
$m\mu$	cantidad de moles
$m\mu_{\text{FOR SU}}$	la cantidad de moles de aire requeridos para la combustión
$m_{atr}$	masa de aire requerido
$PA_j$	peso atómico del elemento
PM	peso molecular
$p$	proporción en porcentaje
$p_j$	proporción en porcentaje del elemento

## Letras griegas

$\omega$	kilos de oxígeno
$\alpha$	índice de impactos normalizados
$\Sigma$	sumatoria

## Subíndices

$\text{CH}_4$	metano
$\text{CO}_2$	dióxido de carbono
$\text{H}_2$	hidrógeno
$\text{O}_2$	oxígeno

## 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

De acuerdo con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) de la FAO es urgente tomar medidas para combatir el cambio climático, mediante políticas, estrategias nacionales y el uso eficiente de los recursos (FAO, 2015).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992), el Protocolo de Kioto (1997) y el Acuerdo de París (2015) son instrumentos que fueron creados con la finalidad de establecer las medidas para prevenir y minimizar las causas del cambio climático y tienen por objetivo imponer obligaciones a los países miembros y además regular a la bioenergía.

En respuesta a lo anterior, países líderes tienen por objetivo implementar políticas energéticas que promuevan el desarrollo de fuentes renovables de energía de manera más eficiente (Demirbas 2006, Tarapués *et al.*, 2020) y en consecuencia la producción de biocombustibles a nivel mundial ha ido en aumento, ya sea debido al cumplimiento de objetivos dirigidos al cambio climático, a intereses políticos o económicos (Bauer *et al.*, 2017, Espinoza-Pérez *et al.*, 2016).

La bioenergía moderna es un componente esencial del futuro sistema energético global bajo en carbono y es necesaria para cumplir los compromisos globales sobre el cambio climático (IEA, 2017).

No obstante, la tasa actual de despliegue de bioenergía se encuentra muy por debajo de la meta establecida, especialmente en el sector del transporte, donde se requiere que el consumo se triplique para 2030 (IEA, 2017).

En el caso de México la demanda energética aumentará aproximadamente un 70 % en el año 2030, sin embargo, se estima que el total de fuentes renovables de energía crecerá solo 6.6 % al año 2030, esto sin contemplar energías con tratamiento de biomasa (IRENA, 2015).

Actualmente en México, la biomasa usada para la producción de electricidad solo es privada y es producida a partir de: calor (combustión de bagazo de caña) y biogás (Pérez-Denicia *et al.*, 2017). Por su parte la producción existente de biodiesel es mínima y conlleva altos costos y es generado principalmente a partir de aceites usados y grasas (SEMARNAT, 2020).

En relación con los RSU, en México predomina una inadecuada gestión, pues de acuerdo con el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (DBGIR), diariamente se generan 56, 427 ton de RSO, de los cuales solo 1,327 ton al día son aprovechadas mediante compostaje (SEMARNAT, 2020). Es decir que 55, 100 ton de RSO podrían ser empleados en procesos sostenibles y a su vez reducir los GEI.

Por lo cual, es necesario un esquema de gestión de RSU en México que permita aprovechar la FORSU (55,100 ton de RSO), en procesos sostenibles (ambientalmente) que permitan la generación de bioenergía.

La tecnología de BRF utiliza procesos biotecnológicos que permiten generar bioenergías y productos de valor agregado a partir del uso de biomasa residual como materia prima (Escamilla-Alvarado *et al.*, 2017; Fava *et al.*, 2012; Kirtay, 2011; Poggi-Varaldo *et al.*, 2014).

Por otro lado, la tecnología IRE de RSU posee una eficiencia para generar electricidad y calor del 19 % y 65 % respectivamente, también es considerada uno de los métodos más eficaces de minimizar la masa y el volumen de residuos hasta en un 90 %, (Fruergaard & Astrup, 2011).

Además, la IRE evita el almacenamiento de RSU durante largos periodos de tiempo (en tiraderos o almacenes) y requiere de pequeñas extensiones de terreno (André & Cerdá, 2006). Por lo cual, en los últimos años las plantas de incineración a gran escala han ido en aumento, pues son una forma atractiva de lidiar con el fuerte aumento de RSU, consecuencia del aumento exponencial de la población (André & Cerdá, 2006; Lou *et al.*, 2015; Shi *et al.*, 2008; Tchobanoglous *et al.*, 1977; Xi *et al.*, 2003).

Sin embargo, existen diversas preocupaciones entorno a la tecnología de IRE de RSU, principalmente respecto a sanidad y medio ambiente (Monni, 2012; Vermeulen *et al.*, 2012). Ya que el impacto ambiental relativo aún no está claro, es necesario evaluar el comportamiento medioambiental de la incineración en plantas a gran escala (Lou *et al.*, 2015).

El ACV es una herramienta iterativa para la evaluación sistemática de los procesos industriales, es un conjunto de protocolos y metodologías (ISO, 2006) que evalúa los impactos ambientales y el consumo de recursos generados durante cada etapa de

fabricación, uso y disposición final, llamado comúnmente evaluación “de la cuna a la tumba” (Cherubini *et al.* 2009; Escamilla-Alvarado *et al.*, 2017; Guo & Murphy 2012).

La metodología del ACV se ha utilizado ampliamente para evaluar sistemas de gestión de residuos, incluida la incineración de residuos comparada con otras tecnologías como la digestión anaeróbica, la combustión, vertederos y reciclaje (Turconi *et al.*, 2011).

Bajo este concepto es necesario realizar un ACV para medir los impactos ambientales y las emisiones derivadas de los distintos procesos de residuos en México (SEMARNAT, 2017).

Aunado a lo anterior, existe la necesidad de avanzar en la generación de políticas energéticas sostenibles en México que apoyen a un marco regulatorio sólido en materia de bioenergía.

Por lo cual, el objetivo de este trabajo consistió en analizar el estado de la legislación de BRFs en México. También se evaluaron dos modelos de gestión de RSO mediante el ACV: BRF (H-M-Z-S-NN) que produce bioenergías, enzimas sacarificados y productos de valor agregado (nanobiopartículas) e IRE, y determinar la opción más sostenible en el tratamiento de RSO en la CDMX.

## **1.1 Residuos sólidos urbanos en México**

De acuerdo con el PNPGIR 2017-2018, la gestión de los RSU en México es deficiente pues cada año aproximadamente 6.8 M ton de RSU no son manejados de manera adecuada (SEMARNAT, 2018). Puesto que, el 79 % de los RSU generados no son reprocesados o reutilizados, solo el 61 % es consignado a rellenos sanitarios, 16 % en tiraderos y el 2 % remanente se desconoce su destino (SEMARNAT, 2018).

En la tabla 1.1.1. se observa la composición de los RSU en México. El 46% está conformada por RSO (residuos de alimentos, residuos de cultivos, madera etc.), el 32 % de los residuos son proclives para ser reciclados y el 22 % restante corresponde a residuos poco factibles para ser reutilizados (SEMARNAT, 2020). Estos datos muestran que existe un gran potencial para reintegrar y reprocesar una cantidad importante de los RSU.

En el caso de la CDMX, de acuerdo con Escamilla-Alvarado (2014) actualmente no existe de forma generalizada una correcta separación y disposición de la FORSU. En consecuencia, no puede ser aprovechado el alto contenido orgánico de los RSO. Por el contrario, se dispone junto con los demás componentes de los RSU en rellenos sanitarios y vertederos a cielo abierto, contribuyendo a la emisión de GEI.

En México las principales emisiones relacionadas con la gestión de RSU son CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y el carbono negro (SEMARNAT, 2012). Dichas emisiones son las de mayor contribución al cambio climático en México. De acuerdo con datos del Inventario Nacional de GEI, el 13.3 % es debido a los RSU, lo cual corresponde a 7,938.9 Gg de CH<sub>4</sub> (emisiones totales) (SEMARNAT, 2012a).

**Tabla 1.1.1. Composición de residuos sólidos urbanos en México**

Tipo de residuo	Composición del residuo	Porcentaje
Residuos susceptibles de aprovechamiento 39.57 %	Cartón	6.54
	Papel	6.20
	Componente ferroso	2.09
	Componente no ferroso	0.60
	Plástico rígido	7.22
	Cartón encerado	1.50
	Fibras sintéticas	0.90
	Poliuretano expandido	1.65
	Hule	1.21
	Lata	2.28
Residuos orgánicos 37.97 %	Vidrio	6.58
	Poliuretano	2.80
	Cuero	0.51
	Fibra dura vegetal	0.67
	Hueso	0.59
	Residuos alimenticios	25.57
Otros 22.47%	Residuos de jardinería	9.38
	Madera	1.25
	Residuo fino	3.76
	Pañal desechable	6.52
	Algodón	3.57
	Loza y cerámica	0.55
	Material de construcción	1.46
Varios	5.90	

Referencias: INEGI, 2012. Censo Nacional de Residuos Sólidos Urbanos Municipales, 2010

La FORSU está conformada por desechos de comida, vegetales, frutas, carne putrefacta, pasto, papel, cartón, etc. (Li *et al.*, 2007) y es el sustrato típico de la BRF.

Bajo este concepto, los RSO generados diariamente en México pueden ser aprovechados como materia prima en la BRF y ampara la Visión Nacional de México hacia una Gestión Sustentable: Cero Residuos, el cual tiene por objetivo (cita textual):

*“Transformar el esquema tradicional del manejo de los residuos en un modelo de economía circular, para el aprovechamiento racional de los recursos naturales y favorecer el desarrollo sustentable en el país”* (SEMARNAT, 2019).

## **1.2 Biorrefinería de residuos sólidos orgánicos**

De acuerdo con los ODS de la FAO, la bioenergía, la BRF y la bioeconomía tienen un papel importante que desempeñar en el crecimiento socioeconómico de las naciones, producción y consumo sostenible, en el fortalecimiento frente al cambio climático, y en la conservación de los recursos naturales (FAO, 2015).

La bioenergía es considerada un sustituto de los combustibles fósiles y por lo tanto es un factor importante para reducir los GEI (Goldemberg, 2000; Dincer, 2008).

El concepto de biocombustible o combustible biorenovable, se refiere a combustibles generados a partir de biomasa (preferentemente RSO) (Demirbas, 2010; Mohan *et al.*, 2016; Campos-Montiel *et al.*, 2018).

La tecnología de BRF de residuos propone la integración de la biotecnología e ingeniería de procesos, donde el sustrato alimentado (FORSU) está sujeto a varios tratamientos para poder maximizar los productos, reducir residuos y desechos (Poggi-Varaldo *et al.*, 2014). Con la finalidad de obtener como producto final bioenergías y bioproductos (productos de valor agregado)

Además, la BRF es considerada parte importante en el desarrollo de una bioeconomía sostenible (Bauer *et al.*, 2017).

En la Tabla 1.2.1, se observan la clasificación de BRFs de acuerdo con sus materias primas y los productos derivados de cada una de ellas (Demirbas, 2010).



**Tabla 1.2.1. Clasificación de biorrefinerías de acuerdo con la materia prima**

Biorrefinería	Materia prima	Productos
Biorrefinería de residuos	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	Bioenergías y bioproductos (productos de valor agregado)
Biorrefinería verde	Pastos y plantas verdes	Bioetanol
Biorrefinería de cereales	Cultivos de almidón, cultivos de azúcar y granos.	Bioetanol
Biorrefinería de oleaginosas	Cultivo de oleaginosas y aceite de plantas	Aceites vegetales y biodiesel
Biorrefinería del bosque	Residuos de cosecha forestal, cortezas, aserrín, pulpa de licores y fibras	Combustibles, energía, químicos y materiales
Biorrefinería lignocelulósica	Residuos de agricultura, residuos de cultivos, desechos de madera urbanos, desechos orgánicos industriales.	Bioetanol, bioaceite y productos gaseosos

Referencias: Elaboración propia con datos de Demirbas (2010)

Aunado a lo anterior la BRF también apoya el enfoque de “economía de base biológica” (biobased economy), tiene por objetivo el cambio gradual de productos basados en materias primas fósiles a biogénicas (Menrad *et al.*, 2009). Este enfoque está conformado por tres pilares principales: productos de base biológica, bioenergía y biocombustibles (Menrad *et al.*, 2009).

En esta línea, la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) menciona que es necesario un despliegue acelerado para aumentar la contribución de la bioenergía sostenible en todos los sectores (2017).

En la tabla 1.2.2. se muestran las ventajas y desventajas de la BRF. Entre las ventajas se encuentra que favorece la transición de las economías lineales hacia economías circulares de una manera sostenible (Dael *et al.*, 2014). Ya que promueve la fabricación de productos ecológicos, mediante procesos amables con el medio ambiente (Dael *et al.*, 2014). Además, permite disminuir las importaciones de materias primas fósiles hasta en un 65 % (Menrad *et al.*, 2009).

**Tabla 1.2.2 Ventajas y desventajas de la tecnología de biorrefinería**

Ventajas	Desventajas
Materia prima barata (biomasa), fácilmente disponible y renovable	Costo de productos variables sujetos a: distribución, demanda, costo de producción, almacenaje. Accesibilidad al mercado
Beneficios ambientales y aprovechamiento de residuos	Costo de producción en países desarrollados hasta tres veces mayor que el de un combustible fósil convencional
Costo de producción de biocombustibles más bajo países en vías de desarrollo	Costo de producción variable, de acuerdo con la materia prima, proceso de conversión, escala de producción y región.
Oportunidades de trabajo en zonas rurales y países en desarrollo	Impactos ambientales: uso de combustibles fósiles, efectos respiratorios y sustancias cancerígenas, uso de tierra y eutroficación del agua (suministro de HCl y al proceso de obtención de calor).

Referencias: Demirbas, 2010

En base a lo anterior, la tecnología de BRF proporciona alternativas dada la creciente demanda energética, así como para la gestión sostenible de residuos en países en desarrollo y una relación costo-beneficio efectiva (Eide 2008; Dael *et al.*, 2014; Nizami *et al.*, 2017; Tarapués *et al.*, 2020).

A continuación, se muestran los antecedentes de BRF en México (tabla 1.2.3.), cabe hacer mención que algunos no son BRFs, dado que no cumplen con el objetivo de una BRF. No obstante, se hacen llamar BRFs, por lo cual se incluyeron como antecedente.

Para ser llamadas BRFs deben producir al menos dos productos (bioenergías y productos de valor agregado). Además, deben usar como materia prima residuos y ser sostenibles (amb.), por lo cual no pueden llamarse BFRs.

En la tabla 1.2.3. se observa que el único proyecto de BRF en México fue discontinuado, el resto las BRFs son a escala laboratorio.

**Tabla 1.2.3 Antecedentes de biorrefinería en México**

Biorrefinería	Producto	Materia prima
GBAER, CINVESTAV Escala laboratorio	Biocombustibles, enzimas, ácido succínico, bionanopartículas	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos
INECOL Escala laboratorio (No BRF)	Biogás, biohidrógeno, biodiesel, bioetanol	Microalgas ( <i>Pistia stratiotes</i> ) y agua residual
Universidad Autónoma de Sinaloa (BRF, proyecto discontinuado)	Biogás, biohidrógeno, biodiesel, bioetanol, bioturbosina, glicerina, quitina y quitosano	Jatrofa, cascaras de camarón y cangrejo
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica Clúster de bioturbosina (2025-2030) (No BRF)	Bioturbosina	Grasas animales, aceites y vegetales
Biorefiery Group Universidad Autónoma de Coahuila (Escala lab.)	Bioproductos y biocombustibles	Biomasa lignocelulósica y acuática (macro y microalgas)
NopaliMex Zitácuaro, Michoacán (escala comercial, no BRF)	Biogás y electricidad	Nopal
CEDA Central de abastos de la CDMX (No BRF)	Biodiesel	Aceite vegetal usado
CICY (Escala lab, no BRF)	Biogas (metano) y bioetanol	Sargazo y hongo ligninolítico

Referencias: Elaboración propia con datos de Sotelo *et al.*, 2021

### 1.3 Incineración de residuos sólidos urbanos

El proceso de incineración permite minimizar el volumen de los RSU de un 80 - 90% (Tchobanoglous *et al.*, 1977).

A pesar de que esta tecnología ha avanzado, el control de la contaminación al aire continúa siendo un problema mayor. Incluso si se pueden cumplir controles más estrictos en las emisiones al aire mediante el uso de la tecnología existente y en desarrollo, el factor económico representa un problema mayor que con otras alternativas (Tchobanoglous *et al.*, 1977).

En la tabla 1.3.1. se muestran las ventajas y desventajas de la tecnología de IRE de RSU.

**Tabla 1.3.1. Ventajas y desventajas de IRE para RSU**

Ventajas	Desventajas
Elimina propiedades peligrosas (inflamables, infecciosas y tóxicas)	Proceso complejo, requiere una gran inversión y costos de operación elevados
Reducción en el volumen de RSU a menudo por un factor de 10 o más	La recuperación de calor tiene lugar en condiciones adversas (incrustaciones de la caldera, erosión, corrosión) y suele ser ineficiente
Destruye las corrientes de desechos líquidos y gaseosos (excepto para aquellos vinculados a la neutralización y tratamiento de gases de combustión)	Contaminantes no fáciles de controlar, algunos prohibidos como lo son: metales volátiles (mercurio, talio y cadmio), PBC, desechos radioactivos. A menos de contar con la tecnología adecuada para su tratamiento
El calor de la combustión generado puede ser utilizado como energía	Se debe garantizar el completa incineración de los gases de combustión y de los residuos.
Los residuos pueden ser reutilizados como materiales para la construcción	A medida que los códigos de emisiones se vuelven más estrictos, los costos operativos aumentan.

Referencias: Buekens (2013)

Las técnicas más comunes de incineración incluyen: tratamientos aceite-gas, inyección líquida y hornos rotatorios. Los incineradores de hornos rotatorios, (rotary kiln incinerators) son los más adecuados para el manejo de materiales peligrosos, pues poseen cámaras de altas temperaturas capaces de destruir residuos orgánicos altamente tóxicos (compuestos orgánicos clorados, PCB) de manera muy eficiente (Theodore & Reynolds, 1987).

La composición de los gases de combustión estará determinada por diversos factores como: características de los residuos alimentados, la tecnología usada en la combustión de residuos, condiciones de operación, entre otros factores (SEMARNAT, 2017).

En la Tabla 1.3.1. se muestran las ventajas y desventajas de la Incineración con recuperación de energía de acuerdo con Buekens (2013).

#### 1.4 Análisis de ciclo de vida

El ACV es una metodología basada en las normas ISO (14040 y 14044) para la evaluación de los potenciales impactos ambientales de un sistema o producto en todas las fases de su ciclo de vida, desde la extracción de recursos, producción, uso del producto y su disposición final (ISO, 2006a & 2006b).

La herramienta del ACV tiene como objetivo proponer recomendaciones y estrategias para minimizar residuos y emisiones al medio ambiente (Fruergaard & Astrup, 2011). Es una herramienta iterativa, por lo cual el estudio puede requerir modificaciones para cumplir con el objetivo propuesto, dichas modificaciones, junto con su justificación, deben estar debidamente documentadas (ISO 14040, 2006).

La metodología de un ACV se enfoca en cuatro fases (Figura 1.4.1): 1) definición del objetivo y alcance; 2) inventario del ciclo de vida (ICV); 3) evaluación del impacto; 4) interpretación (Curran, 1996). Finalmente, el ACV está enfocado principalmente en tres áreas de protección: medio ambiente, recursos naturales y salud humana (ISO, 2006; Kirkeby, 2005).

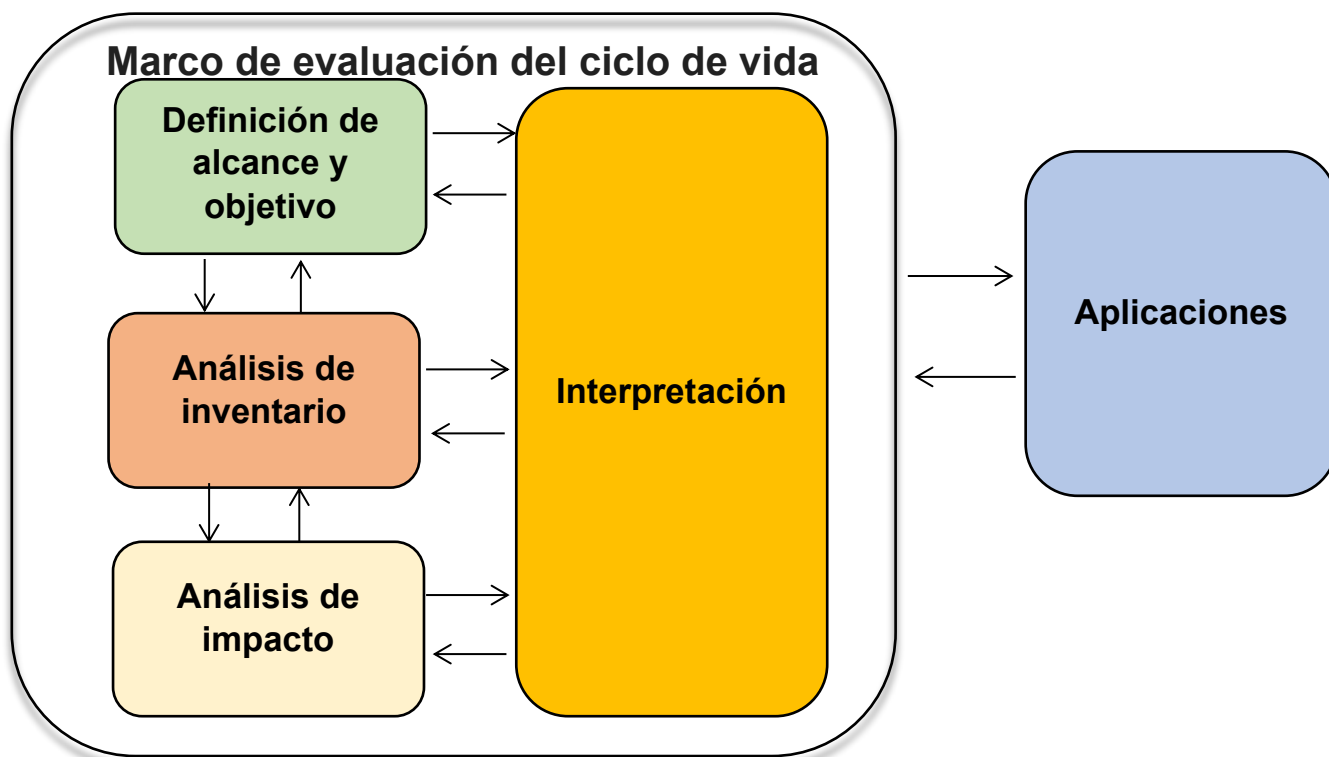


Figura 1.4.1 Evaluación del análisis de ciclo de vida (ISO 14044, 2006)

En esta línea el ACV también permite mejorar la comprensión y las comparaciones que deben hacerse en un sistema o producto, además permite evaluar las ventajas y desventajas asociadas con cada opción analizada (McDougall *et al.*, 2003).

A continuación, se describen las etapas del ACV mostradas en la figura 1.4.1 (ISO 14044, 2006; Guineé 2004):

## 1. Definición de objetivo y alcance

En el primer paso se debe establecer y justificar el objetivo del ACV, especificar el uso previsto de los resultados, así como las partes interesadas y el público objetivo a quien impactaran los resultados del análisis, se deben incluir temas como la cobertura temporal, geográfica y tecnológica. Se deben justificar la "Función, unidad funcional, alternativas y flujos de referencia" (Heijungs *et al.*, 1992; Guineé 2004).

### 1.1. Selección de unidad funcional

Seleccionar la base de cálculo a partir de la cual se realizarán los balances de materias y energía.

### 1.2. Límites del sistema

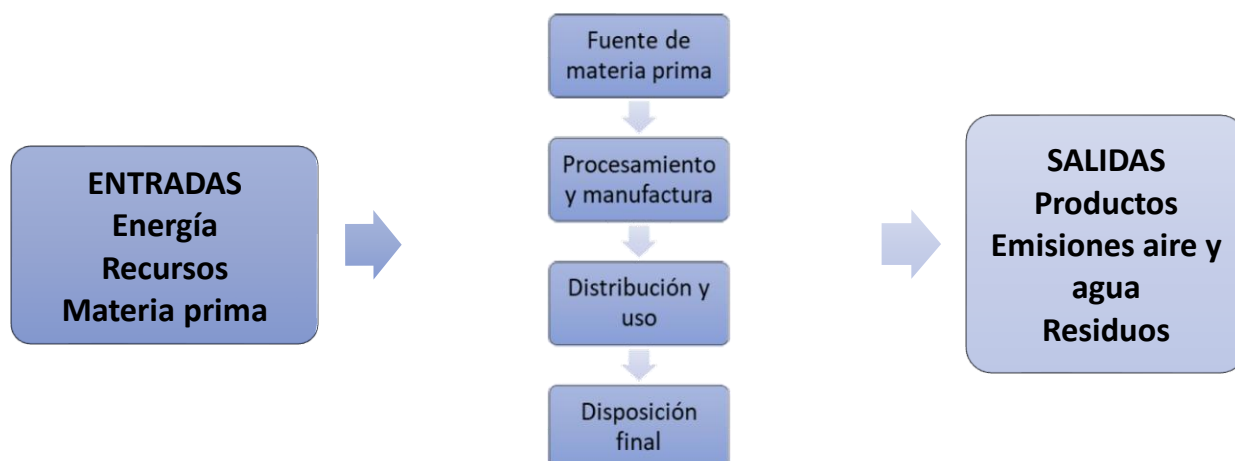
Establece las características principales de un ACV (cobertura temporal, geográfica y tecnológica), el análisis empleado y el nivel de profundidad del estudio y responde a las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el propósito del estudio?
- ¿Qué será sometido a comparación? ¿Cuál es la unidad funcional de comparación?
- ¿Cuáles son los límites del sistema?

## 2. Análisis de inventario del ciclo de vida.

En esta etapa son cuantificadas todas las entradas y salidas (materiales y energía) durante el ciclo de vida completo del producto o servicio (ISO 14044, 2006).

El inventario general del ciclo de vida permite analizar las operaciones de un sistema dado y puede proporcionar la base para aplicar e integrar otra información ambiental y herramientas de evaluación en una comparación de sistemas (McDougall *et al.*, 2003).



**Figura 1.4.2. Evaluación de inventario del ciclo de vida (ISO, 2006)**

### 3. Evaluación de impacto.

En esta fase se evalúa la importancia de los PIA del sistema de un producto. Se realiza la asignación de los impactos ambientales y humanos de los procesos y recursos utilizados, así como de los desechos generados (Figura 1.4.1).

Esta etapa incluye el análisis de: clasificación, caracterización, normalización y valoración, siendo la clasificación y caracterización elementos obligatorios en el ACV (ISO 14040 & ISO 14044, 2006).

La clasificación consiste en definir los efectos medioambientales potenciales, de acuerdo con las categorías de impacto: daño a los recursos naturales, daño a la salud humana y daño al ecosistema (Guineé, 2004).

Posteriormente el análisis de caracterización analiza la contribución de cada entrada y salida, de acuerdo con la categoría de impacto asignado (Guineé, 2004).

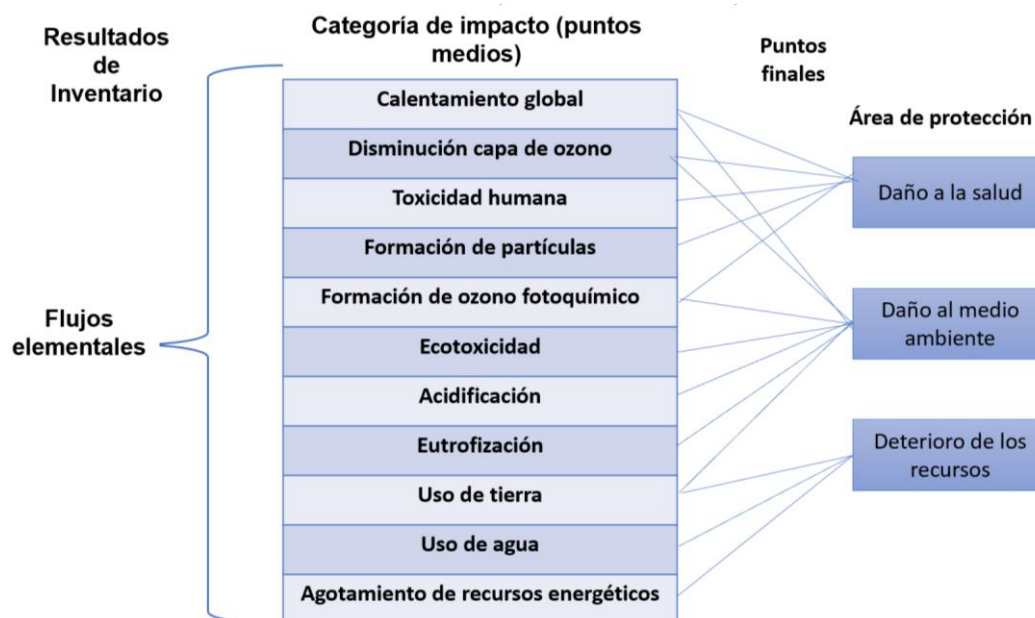


Figura 1.4.3. Categorías de impacto respecto a áreas de protección (Hauschild *et al.* 2013)

#### 4. Interpretación.

Esta fase se conforma por tres componentes principales: la evaluación de los resultados, formulación de las conclusiones y recomendaciones del estudio; además se debe tomar en cuenta la verificación de datos, las suposiciones realizadas, las especificaciones del sistema, metodología usada, modelos de cálculo y análisis de sensibilidad e incertidumbre (ISO 14044, 2006; Guineé, 2004).



## 2. JUSTIFICACIÓN

México además de incrementar a 35 % la generación de energía eléctrica a partir de energías sostenibles para el 2024 (SEMARNAT, 2012). Además, forma parte del Acuerdo de París (1995), el cual tiene por objetivo prevenir y minimizar los efectos del cambio climático mediante la reducción del 50 % de emisiones GEI para el año 2050.

La generación de bioenergía a partir de FORSU, propone una alternativa para solucionar las necesidades ante la creciente demanda de energía y disposición inadecuada de RSU en México.

Evidencias internacionales sugieren posibles beneficios de la legislación relacionada a BRFs y bioenergéticos sobre el desarrollo de esta tecnología, así como la relación virtuosa entre el desarrollo de BRF y el desarrollo sostenible.

Aunado a los beneficios que posee el esquema de BRF en la transición de las economías lineales hacia economías circulares de una manera sostenible.

Por lo cual es necesario avanzar en la generación de políticas energéticas sostenibles en México, que apoyen y den certeza a la producción de biocombustibles, bioenergías y bioproductos.

En este trabajo se analizará la legislación en materia de BRFs en México, además se compararán dos opciones para el aprovechamiento y tratamiento de residuos, BRF e IRE mediante el ACV.

Esta iniciativa se encuentra asociada a consecuencias sociales significativas, toda vez que la sostenibilidad se basa principalmente en el análisis de impactos ambientales de las opciones y los impactos ambientales.

Los cuales, a su vez determinan de manera importante la calidad de vida de la sociedad. También se vislumbran consecuencias económicas, puesto que cada opción genera: bioenergías y productos de valor agregado (biorrefinería).

### **3. HIPÓTESIS**

#### **Hipótesis general**

- La legislación sobre BRF representara un progreso en el desarrollo sostenible de la sociedad mexicana a través del apoyo al desarrollo de BRFs que generen bioenergías y productos de valor agregado.
- El esquema de BRF (H-M-S-NN) representará una opción más sostenible que la planta de incineración con recuperación de energía, en la gestión de residuos orgánicos en la Ciudad de México.

#### **Hipótesis particulares**

1. Existe un rezago en la legislación de BRF en México comparada con las legislaciones de EUA y la UE.
2. Los impactos toxicidad y ecotoxicidad serán los determinantes en el perfil de impactos ambientales normalizados de la IRE.

## **4. OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Evaluar los instrumentos legales existentes en México relacionados con la tecnología de BRF, la generación de biocombustibles y bioenergías.
- Desarrollar un análisis comparativo de sostenibilidad de dos opciones de gestión de residuos sólidos orgánicos: BRF (H-M-S-NN) que genera bioenergías y un escenario de gestión que contempla incineración con recuperación de energía en México.

### **Objetivos particulares**

1. Analizar las legislaciones que gestionan el manejo de RSU en México, con respecto a la tecnología de BRF y realizar un análisis comparativo respecto a las legislaciones de la UE y EUA.
2. Realizar el ACV de una planta de IRE que procesa FORSU, haciendo uso del proxi de incineración de bioresiduos de Eco invent.
3. Determinar el esquema más sostenible en la gestión de RSU (orgánicos) en México, BRF (H-M-Z-S-NN) o incineración con recuperación de energía mediante el ACV.

## **5. ALCANCE**

Se realizó un análisis de legislación respecto a la tecnología de BRF en México, comparado con las legislaciones de la UE y EUA, y así determinar el estado de la legislación en México respecto a este tema.

Se efectuó un análisis de sostenibilidad de dos tecnologías de gestión de residuos sólidos orgánicos en México: IRE y BRF H-M-Z-S-NN (hidrógeno, metano, enzimas, sacarificados y nanopartículas) (tomado del Informe “Análisis del Ciclo de Vida de una biorrefinería que procesa la FORSU y produce bioenergías, ácidos orgánicos, enzimas y nanopartículas” tomado con el consentimiento del autor Dr. Héctor Mario Poggi-Varaldo del año 2019). Se usó como herramienta principal el ACV (análisis de inventario: materias primas, procesos y de residuos generados), con información recopilada de la literatura existente y con proxis Sima pro.

Este trabajo devela el estado actual de la legislación de BRF y temas asociados en México. Concomitantemente se hará lo propio con EUA y UE por ser referencias importantes en este tema.

Este estudio permitirá proponer recomendaciones estratégicas a dichos esquemas de gestión de RSO y ser usado en la toma de decisiones en el ámbito de residuos y energía.

Este trabajo está dirigido a la comunidad académica y a los tomadores de decisión en el ámbito del gobierno.

Se espera que este análisis contribuya en la generación de políticas públicas en México, que a su vez influyan en la planeación y de tecnologías sostenibles para tratamiento de residuos.

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1 Plan de trabajo

Para llevar a cabo el proyecto de Tesis Doctoral, el plan de trabajo se dividió en 3 actividades como se muestra en la figura 6.1.1.

Actividad 1. Análisis de la legislación de biorrefinerías en México

Actividad 2. Análisis de sostenibilidad de una planta de incineración de con recuperación de energía que procesa la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

Actividad 3. Análisis comparativo de sostenibilidad de dos modelos de gestión de residuos sostenibilidad de incineración de residuos sólidos orgánicos con recuperación de energía y de la biorrefinería H-M-Z-S-NN (tomado del Informe “Análisis del Ciclo de Vida de una biorrefinería que procesa la fracción orgánica de RSU y produce bioenergías, ácidos orgánicos, enzimas y nanopartículas” con el consentimiento del autor Dr. Héctor Mario Poggi-Varaldo, 2019).

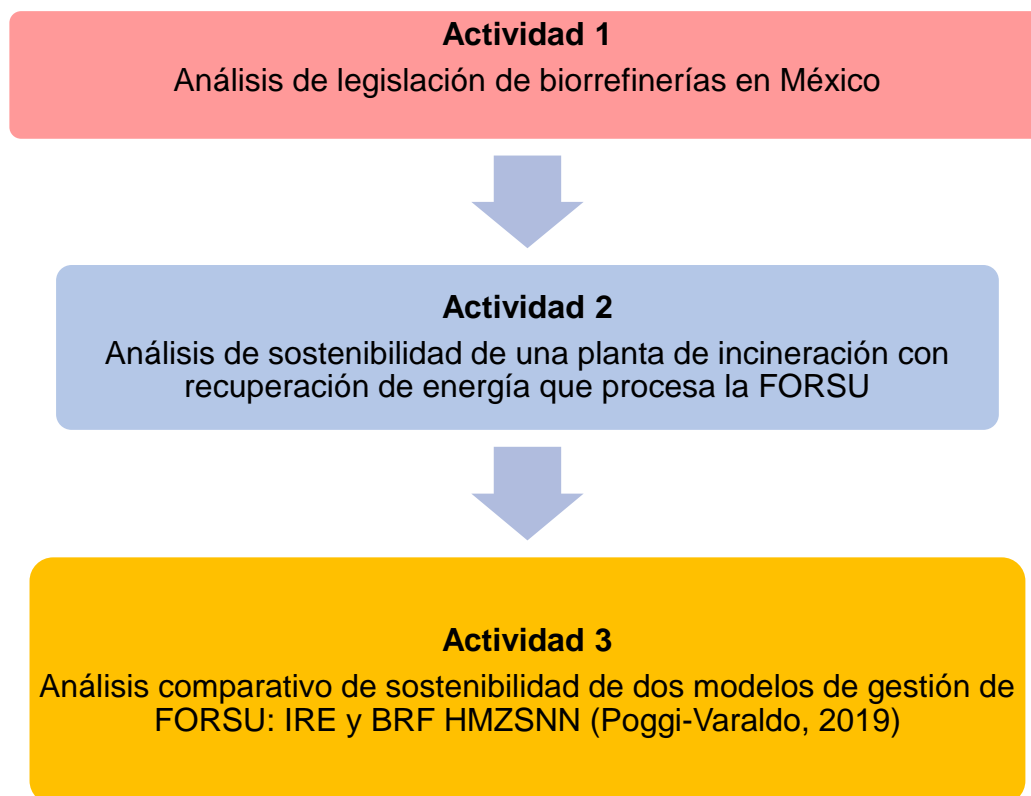


Figura 6.1.1. Esquema de plan de trabajo

## **6.2 Actividad 1. Análisis de legislación de biorrefinerías en México**

### *6.2.1 Propósito*

Evaluar los instrumentos legales en México relacionados con la tecnología de BRF, biocombustibles y bioenergías. Para determinar el estado de la legislación en este tema, así como los factores que pueden tener inherencia en el desarrollo de un marco regulatorio de biocombustibles, capaz de promover el desarrollo y comercialización de BRF en México.

### *6.2.2 Métodos y procedimientos*

Se utilizó el derecho comparado como disciplina académica, con el propósito de desarrollar investigación comparativa (Mancera Cota, 2017).

La metodología se dividió en dos apartados, *i)* revisión de legislaciones referentes al tema de BRF en México, EUA y la UE; seguido del *ii)* análisis del Marco Legal de México para la bioenergía. Cabe hacer mención que el alcance de este trabajo está limitado a la revisión de leyes ordinarias y reglamentarias federales.

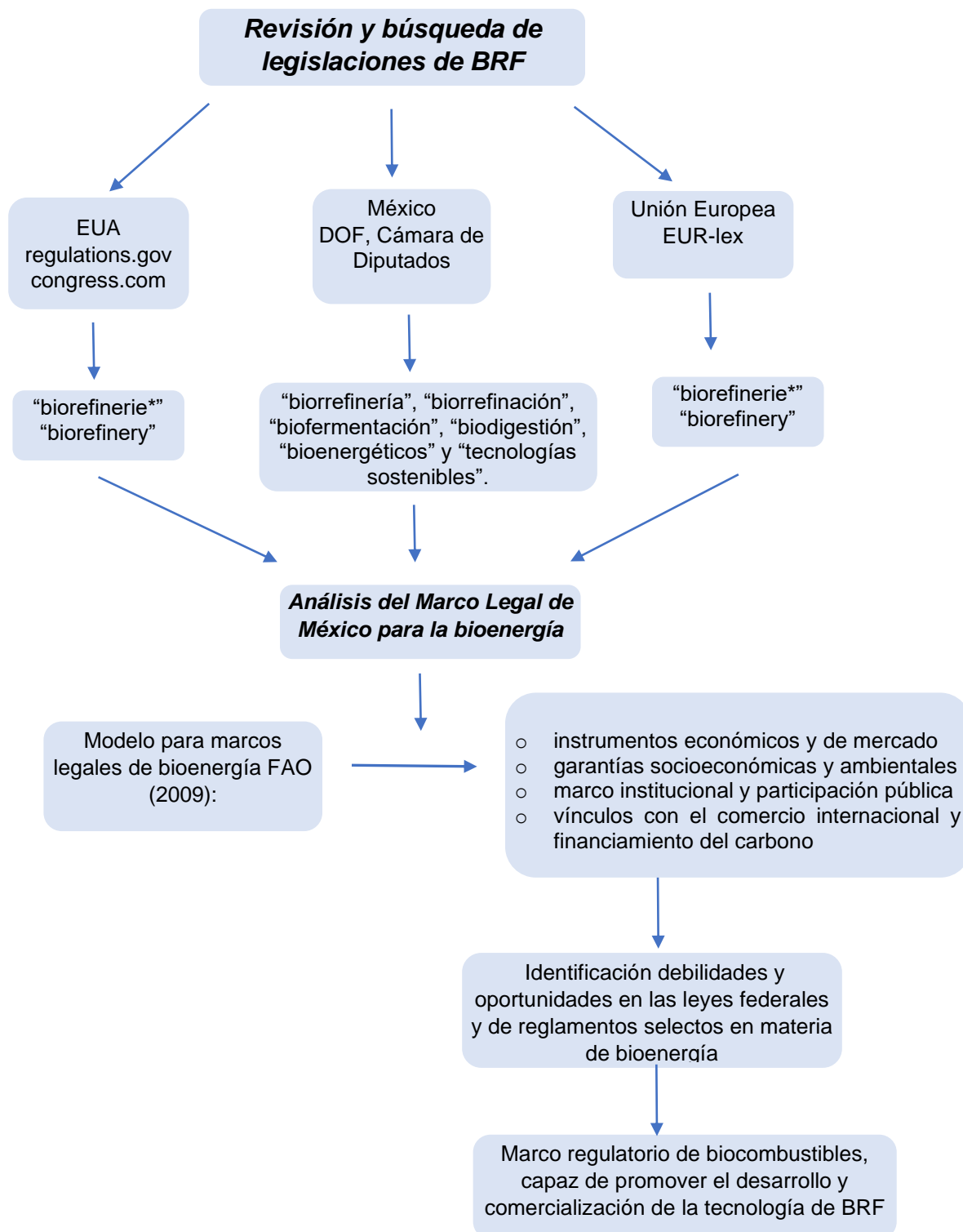
#### *i) Revisión de legislaciones referentes al tema de BRF*

La búsqueda de legislaciones en México se realizó a través del portal del DOF y en la página de la Cámara de Diputados, mediante el apartado correspondiente a Leyes y Reglamentos donde se introdujeron los términos de “biorrefinería”, “biorrefinación”, “biofermentación”, “biodigestión”, “bioenergéticos”.

Posteriormente se realizó la exploración de las legislaciones en cuyo título hiciera referencia a los términos de “bioenergéticos” y “sostenibilidad”. Se procedió a descargar estas leyes en formato PDF y se buscó el término de biorrefinería (Figura 6.2.2.1).

Dado el vínculo que existe entre la BRF y la bioenergía, como se mencionó previamente, el análisis de instrumentos regulatorios en México se enfocó principalmente en identificar aquellos relevantes en materia de cambio climático, residuos y bioenergía.

Por su parte, la revisión de legislaciones emitidas en EUA se realizó en la página de Regulaciones del Gobierno de EUA “regulations.gov” y en el portal del Congreso de los EUA “congress.com”, a través de la sección de búsqueda se introdujeron los términos “biorefinerie\*” y “biorefinery”.



**Figura 6.2.2.1 Metodología sobre el análisis de legislación de BRFs en México**

Posteriormente se refinaron los resultados en la sección de tipo de documento y se seleccionó la opción de reglamentos y se procedió a comparar los datos de ambas búsquedas.

La búsqueda de las legislaciones de la UE se realizó en el portal EUR-lex, como primer paso se introdujo en el apartado de búsqueda el término de “biorefinerie\*” y “biorefinery”, posteriormente se refinaron para seleccionar solo los textos consolidados.

*ii) Análisis del Marco Legal de México para la bioenergía.*

El análisis de la legislación se realizó aplicando el modelo implementado por la FAO (2009) para marcos legales de bioenergía y se abocó a la identificación de las debilidades, desafíos y oportunidades de leyes federales y de reglamentos selectos en materia de bioenergía de acuerdo con los temas propuestos por la FAO:

- instrumentos económicos y de mercado
- garantías socioeconómicas y ambientales
- marco institucional y participación pública
- vínculos con el comercio internacional y financiamiento del carbono



## **6.3 Actividad 2. ACV de una planta de incineración con recuperación de energía que procesa la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.**

### *6.3.1 Propósito*

Realizar el ACV de una planta de IRE que procesa FORSU y determinar la sostenibilidad del proceso mediante balances de materia y energía.

### *6.3.2 Métodos y procedimientos*

Se realizó de acuerdo con la metodología ACV (ISO 14040 & ISO 14044, 2006; Guinée 2004) se utilizó el software SimaPro v 9.0.0.35, Analyst/Professional. El método utilizado para realizar la evaluación del ciclo de vida fue ReCiPe 2016 jerárquico de punto intermedio v.1.03.

Se utilizaron los procesos “proxi” de la Base de datos Ecoinvent 3.5 y el proceso seleccionado fue “Biowaste {CH} treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, U” (PRé Consultants, 2021). Representan la incineración de bio residuos, en un incinerador de residuos sólidos municipales (MSWI) con extracción de cenizas, con modelado en Suiza. Recomendado para una mezcla de bio residuos típicos (mezcla de residuos de jardín, comida / cocina).

Los datos del ACV se realizaron de acuerdo con cálculos de materia y energía. También se tomaron como referencia datos del proxi Ecoinvent 3.5 “Biowaste {CH} treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, U” (PRé Consultants, 2021).

### *6.3.3 Definición de objetivo y alcance del estudio*

#### *6.3.3.1 Objetivo*

El objetivo consistió en realizar el análisis de sostenibilidad de una planta de IRE que procesa FORSU, definir las huellas medioambientales derivadas de esta acción y determinar si esta opción es sostenible el aprovechamiento de RSU en México.

Se espera que este estudio contribuya a la planeación y generación de tecnologías para tratamiento de residuos y en la toma de decisiones para el desarrollo de políticas públicas en México.

### 6.3.3.2 Unidad funcional

La unidad funcional consiste en gestionar el procesamiento mediante IRE de 1000 kg de FORSU proveniente de una planta de reciclaje.

### 6.3.3.3 Flujo de referencia

El flujo de referencia es 1000 kg de FORSU, con una humedad de 35% compuesta por residuos de comida, papel y cartón.

### 6.3.3.4 Sistema elegido y descripción

El sistema consta de una planta con incineradores de parrilla (planta suiza promedio de incineración de RSU en 2010). La planta está equipada con tratamiento de gases de combustión (TGC) compuesto por: un precipitador electrostático para cenizas volantes (ESP), un depurador húmedo de gases de combustión (LHG), un sistema de reducción catalítica no selectiva (SNCR) con una eficiencia del 25 %.

También cuenta con un sistema de reducción catalítica selectiva (SCR), SCR-alto polvo con eficiencia del 42.77 % e instalaciones con eficiencia del 32.68 % SCR-bajo polvo - DeNO<sub>x</sub> y 0% sin DeNO<sub>x</sub> (PRé Consultants, 2021).

Además, consta de instalaciones de DeNO<sub>x</sub> y 0% sin DeNO<sub>x</sub>. Finalmente cuenta con un tratamiento de cenizas de filtro (FLUWA), el cual contribuye con el 46.22 %, posee una eficiencia eléctrica y térmica bruta del 15.84 y 28.51 % respectivamente (PRé Consultants, 2021).

### 6.3.3.5 Límites del sistema

La FORSU está conformada por papel, cartón y residuos orgánicos (comúnmente residuos de alimentos), es producto de actividades humanas y por lo tanto no se toman en cuenta como emisiones directas o indirectas de tipo GEI (Escamilla-Alvarado *et al.*, 2017).

Las actividades de investigación de este trabajo están centradas en analizar las variables del proceso de IRE, desde la recepción de la FORSU en la entrada de la planta hasta la entrega de depósito de desechos de la incineradora. El análisis finaliza en las emisiones a corto plazo al agua procedentes de lixiviados y emisiones a largo plazo de

vertederos a aguas subterráneas no son consideradas en el análisis (PRé Consultants, 2021).

La incineración de residuos con extracción de cenizas consta de una planta de IRE alimentada con FORSU al 35 % de humedad. Los residuos entran a la cámara de combustión a través de parrillas de incineración.

El TGC comienza con un SNCR en la cámara de postcombustión para depurar los  $\text{NO}_x$  a una temperatura de entre 859 - 950 °C, donde amoníaco líquido es inyectado en el gas de combustión caliente (Dong *et al.*, 2020). A continuación, el gas de combustión se enfría y el calor se recupera para su uso (Neuwahl *et al.*, 2019), la temperatura después de la SNCR y la recuperación de calor se asume a 180 °C como valor típico.

Las cenizas volantes generadas son extraídas de los gases combustión mediante un ESP con una eficiencia del 42.77 %. Posteriormente mediante un sistema de LHG son inyectados reactivos alcalinos, (peróxido de hidrógeno y / o una solución de lavado compuesta por hidróxido de sodio, lechada de piedra caliza micronizada) para purificar los gases de combustión y eliminar los gases ácidos como, dióxido de azufre, halógenos gaseosos, HCl y HF (Neuwahl *et al.*, 2019).

Finalmente, la planta cuenta con un SCR-alto polvo), 32.68 % SCR-bajo polvo-De $\text{NO}_x$  (sistema de reducción dinámica de  $\text{NO}_x$ ) y 0 % sin De $\text{NO}_x$  (PRé Consultants, 2021).

La planta de IRE cuenta con una eficiencia de separación de chatarra de hierro recuperado de las escorias del 58% y una eficiencia de separación de chatarra no ferrosa de escoria del 31% (PRé Consultants, 2021).

Por su parte la combinación de tecnologías de tratamiento de cenizas (FLUWA) contribuyen con un 46.22 %, poseen una eficiencia eléctrica bruta de 15.84 % y una eficiencia térmica bruta de 28.51 % (PRé Consultants, 2021).

Los principales componentes involucrados en la generación y recuperación de energía son: boliers para la producción de calor, turbinas y generadores eléctricos para la conversión de energía (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

La combinación de generador-turbina de vapor es la más usada en la generación de vapor, producto de la incineración de RSU.

Usualmente en instalaciones de producción de energía, es necesaria una fuente auxiliar de energía, la cual varía de 4 – 8 % de la energía producida, asumiendo que el valor de energía de los RSU es de 4,500 BTU/ lb (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

#### 6.3.4 Análisis de inventarios de ciclo de vida

Los datos usados en este trabajo fueron tomados de la literatura, de Informes oficiales, así como de Agencias Internacionales (Tabla 6.3.4.1).

##### 6.3.4.1 Descripción entradas y salidas del proceso de incineración.

**Tabla 6.3.4.1 Descripción de entradas y salidas de la tecnología de IRE**

Etapa	Componentes/Proceso	Entrada	Salida
Combustión	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alimentación de FORSU 20 % ST</li> <li>Incineradores de parrilla (aire primario)</li> <li>Cámara de incineración (aire secundario)</li> <li>Alimentación de aire de incineración (sistema de conductos de aire)</li> <li>Descarga de cenizas (escorias) de fondo</li> </ul>	FORSU Aire primario y secundario	Escorias Gases de combustión
	Tratamiento gases de combustión	<ul style="list-style-type: none"> <li>ESP para cenizas volantes</li> <li>sistema de LHG</li> <li>SNCR al 25%</li> <li>SCR-alto polvo 42.77 %</li> <li>SCR-bajo polvo 32.68 %</li> </ul>	Cal viva (CaCO <sub>3</sub> ), NaOH 50% agua NH <sub>3</sub> 25 %
Recuperación de energía		<ul style="list-style-type: none"> <li>Caldera</li> <li>Turbogenerador</li> </ul>	Vapor Calor Agua

NOTAS: SNCR: sistema de reducción catalítica no selectiva, ESP: precipitador electrostático, SCR: sistema de reducción catalítica selectiva

Referencias: Neuwahl *et al.*, 2019; Buekens 2013; Kedrowski & Chromec 2012; Tchobanoglous & Kreith 2002.

El cálculo de datos se realizó a partir de procedimientos usados en la Ingeniería Química, Ingeniería de Procesos e Ingeniería Ambiental. Dichos datos fueron adaptados

al proxy de SimaPro de incineración de bioresiduos, Ecoinvent “Biowaste {CH} treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, U” y siguiendo la metodología ACV (ISO 14044, 2006) y en los programas SimaPro v 9.0.0.35 (PRé Consultants, 2021).

La literatura usada para la ejecución de los cálculos de balances de materia y energía fue: Best Available Technologies (Neuwahl *et al.*, 2019), Incineration Technologies, Buekens (2013), Hitachi Zosen Inova Technology Kedrowski & Chromec, 2012, Waste Management Tchobanoglous (1977), Handbook of Solid Waste Management Tchobanoglous & Kreith (2002).

### 6.3.5. Análisis de impactos de ciclo de vida

El análisis de impactos se desarrolló conforme a los requerimientos para un estudio corto ISO 14044 (2006).

Debido a que las librerías de este programa están realizadas en su mayor parte a partir de datos europeos y por el alcance de este proyecto, no se contempló la recopilación de tecnologías nacionales, por lo cual los resultados obtenidos en este análisis son considerados una aproximación para futuros estudios. Se utilizó un criterio de corte entre el orden de error 0.1 al 1%.

Se utilizó el software SimaPro v 9.0.0.35, Analyst/Professional. El método utilizado para realizar la evaluación del ciclo de vida fue ReCiPe 2016 jerárquico de punto intermedio v.1.03. ya que se centra en la categoría de midpoint (puntos intermedios) y evalúa los impactos ambientales inmediatos (PRé Consultants, 2021).

Los procesos proxy utilizados provienen de la Base de datos Ecoinvent 3.5 y el proceso seleccionado fue “Biowaste {CH} treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, U” (PRé Consultants, 2021).

Los datos utilizados son referentes a la tecnología de Suiza, debido a que solo la tecnología de incineración de residuos municipales contempla los bioresiduos como materia prima en dicho país, lo cual podría sugerir un cierto sesgo. Sin embargo, los bioresiduos son lo más parecido a FORSU, por lo cual se eligió para poder realizar el análisis.

La descripción de los indicadores de impactos de ciclo de vida se muestra en la tabla 6.3.5.1.

**Tabla 6.3.5.1. Descripción de categorías de impacto**

Categoría de impacto	Indicador
Cambio climático Kg CO <sub>2</sub> e	Incremento de gases de efecto invernadero
Radiación ionizante kBq Co-60 e	Aumento de dosis absorbida
Escasez de recursos fósiles kg oil e	Disminución de recursos naturales de origen fósil
Formación de ozono: calidad de ecosistemas kg NO <sub>x</sub> e	Aumento de ozono troposférico
Formación fotoquímica de oxidante: salud humana kg NO <sub>x</sub> e	Aumento de ingesta de ozono troposférico por población
Deterioro a la capa de ozono Kg CFC-11 e	Decremento de ozono en la estratosfera
Formación de partículas finas kg PM <sub>2.5</sub> e	Aumento de inhalación de PM 2.5 por población
Toxicidad humana: cáncer kg 1,4-DCB <sup>B</sup> al aire	Aumento del riesgo de incidencia de cáncer
Toxicidad humana: no cancerígena kg 1,4-DCB e	Aumento del riesgo de incidencia de enfermedades no cancerígenas
Ecosistema terrestre kg 1,4-DCB e	Aumento ponderado de riesgos en suelos naturales
Ecotoxicidad al agua dulce kg 1,4-DCB e	Aumento ponderado de riesgos en agua dulce
Uso de suelo m <sup>2</sup> a crop e	Uso de superficie de tierra con el potencial de dañar cadenas alimenticias o la biodiversidad
Escasez de recursos minerales kg Cu e	Disminución de recursos naturales de origen no fósil
Consumo de agua m <sup>3</sup>	Consumo de recursos hídricos

Referencias: Basado en Huijbregts *et al.*, 2017

### **6.4 Actividad 3. ACV comparativo de dos tecnologías de procesamiento de RSO, biorrefinería HMZSNN e incineración con recuperación de energía.**

#### *6.4.1 Propósito*

El propósito de este estudio es determinar la tecnología más sostenible en la gestión de RSO en la CDMX, IRE y BRF HMZSNN (tomado del Informe “Análisis del Ciclo de Vida de una biorrefinería que procesa la fracción orgánica de RSU y produce bioenergías, ácidos orgánicos, enzimas y nanopartículas”, tomado con el consentimiento del autor Dr. Héctor Mario Poggi-Varaldo del año 2019).

#### *6.4.2 Métodos y procedimientos*

Se realizó de acuerdo con la metodología ACV (ISO 14040 & 14044, 2006; Guinee, 2004), el software utilizado fue SimaPro v 9.0.0.35, Analyst/Professional.

El método utilizado para realizar la evaluación del ciclo de vida fue ReCiPe 2016 jerárquico de punto intermedio v.1.03. Los procesos proxy utilizados provienen de la Base de datos Ecoinvent 3.5. (PRé Consultants, 2021).

#### *6.4.3 Definición, objetivo y alcance*

##### *6.4.3.1 Objetivo*

El objetivo consistió en realizar el análisis comparativo de sostenibilidad de dos opciones de gestión de RSO por medio del ACV: BRF HMZSNN (Poggi-Varaldo, 2019) que genera bioenergías y un escenario de gestión que contempla incineración con recuperación de energía en México.

##### *6.4.3.2 Función del producto*

Evaluar la gestión de la FORSU a través de dos esquemas de procesamiento de RSO que permiten obtener productos (energía y productos de valor agregado) y minimizar la disposición final de residuos: BRF HMSZNN e IRE.

##### *6.4.3.3 Unidad funcional*

La unidad funcional (UF) consiste en el procesamiento de 1000 kg de FORSU.

#### 6.4.3.4 *Flujo de referencia*

El flujo de referencia es 1000 kg de FORSU, con una humedad del 35 %, está compuesta de residuos alimenticios, papel y cartón.

#### 6.4.3.5 *Sistema elegido y descripción*

El análisis consiste en la comparación dos tecnologías de procesamiento de FORSU: BRF HMZNN que produce bioenergías, ácidos orgánicos, enzimas y nanobiopartículas y el esquema de IRE (descrito en la actividad 2, en el punto 6.3.3.5.)

#### 6.4.3.6 *Límites del sistema*

La FORSU es recibida en la puerta de la BRF y en la entrada del incinerador. La FORSU está constituida por RSO, papel y cartón, dado que son producto de actividades humanas, no se toman en cuenta como emisiones directas o indirectas de tipo GEI (Escamilla-Alvarado *et al.*, 2017; Poggi-Varaldo, 2019).

De acuerdo con el Informe “Análisis del Ciclo de Vida de una biorrefinería que procesa la fracción orgánica de RSU y produce bioenergías, ácidos orgánicos, enzimas y nanobiopartículas”, (Poggi-Varaldo, 2019). La BRF consta de 6 etapas: H-M-E-Z-S-NN (etapa E de extracción de AOVs de bajo peso molecular) (Tabla 6.4.3.6).

Las corrientes de salida consisten en sólidos de la sacarificación los cuales son enviados a relleno sanitario, en el caso de la energía es posible sustituir 100 % de la energía eléctrica y 60% del calor requerido con la energía producida por la BRF (Poggi-Varaldo, 2019).

Para este caso las asignaciones para calor y energía fueron 2/3 (energía eléctrica) y 1/3 (calor). Por su parte el biorreactor H que produce sólidos fermentados (FW) y biogás rico en hidrógeno, se asignó 20% al primero y 80% al segundo debido al valor del hidrógeno como combustible limpio (Poggi-Varaldo, 2019).

A continuación, se describen las etapas principales de la BRF H-M-Z-S-NN (Poggi-Varaldo, 2019):



**Tabla 6.4.3.6.1 Descripción de las etapas principales de la biorrefinería HMZSNN**

Etapa	Descripción
	Acondicionamiento, proporciona las condiciones necesarias de humedad y alcalinidad a la FORSU. Se usa agua residual doméstica (o efluentes internos recirculadas al Acondicionamiento).
Hidrógeno	-Producción de hidrógeno (biogás, BG-H) y sólidos fermentados (FW) -Purificación de hidrógeno a 99% v/v -Generación de energía eléctrica usando H <sub>2</sub> purificado con celdas de combustible.
Metano 40% de FW	-Producción de metano (biogás, BG-M) -Purificación de metano a 96% v/v -Generación de energía eléctrica y calor (usando CH <sub>4</sub> previamente purificado) en una planta de cogeneración de electricidad y calor en ciclo combinado
Extracción	Separación de ácidos orgánicos del 60% de la corriente de FW
Z	Producción de enzimas industriales con 40% de la corriente
S 20% de la corriente FW	-Producción de sacarificados, mediante hidrólisis ácida de FW extraídos, -Neutralización de los licores, -Detoxificación de sacarificados con carbón activado.
NN	-Producción de bionanobiopartículas en biorreactores metanogénicos a partir de sacarificados, (biorreactores metanogénicos para colonizar y nanodecorar las biopartículas) -Purificación del biogás metanogénico -Cogeneración de energía eléctrica y calor

Referencias: Elaborado a partir de Poggi-Varaldo (2019).

#### 6.4.4 Análisis de inventario

Los datos usados en esta actividad fueron tomados del Informe “Análisis del Ciclo de Vida de una biorrefinería que procesa la fracción orgánica de RSU y produce bioenergías, ácidos orgánicos, enzimas y nanopartículas” (Poggi-Varaldo, 2019).

#### 6.4.5 Análisis de impactos de ciclo de vida

El análisis de impactos de ciclo de vida se desarrolló conforme a los requerimientos para un estudio corto (ISO 14044, 2006). Se utilizó el software SimaPro v 9.0.0.35, Analyst/Professional.

El método utilizado para realizar la evaluación del ciclo de vida fue ReCiPe 2016 jerárquico de punto intermedio v.1.03. Ya que se centra en la categoría de midpoint

(puntos intermedios) y evalúa los impactos ambientales inmediatos (PRé Consultants, 2021).

En la tabla 6.3.5.1. ubicada en la actividad 2, se encuentran descritos las categorías de impacto analizados en esta sección.

#### 6.4.5.1 Interpretación

En esta fase los resultados de un LCI y de la evaluación de impacto del ciclo de vida son resumidos y discutidos para realizar las sugerencias necesarias y las conclusiones pertinentes (Guineé, 2004).

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 Actividad 1. Análisis de Legislación de BRF en México y países selectos

#### 7.1.1 Marco legal de biorrefinerías en México

En la revisión realizada en este trabajo no se encontraron leyes que mencionaran a la tecnología de BRF en México. Sin embargo, existen antecedentes importantes en materia de sostenibilidad (Tabla 7.1.1.1.) tales como instrumentos regulatorios de control como leyes, decretos y reglamentaciones.

Un ejemplo de estos instrumentos regulatorios de control es la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos de 1917, donde estipula el desarrollo nacional sostenible. Por lo cual del desarrollo e implementación de tecnologías no deben generar impactos a la sociedad, a la economía y al ecosistema (artículos 25 y 26) (DOF, 1917). En consecuencia, el gobierno es responsable de disponer del uso adecuado de la tierra, así como preservar y restaurar el equilibrio ecológico.

Por su parte la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) instaurada en el año 2003, tiene como uno de sus propósitos desarrollar el Plan Nacional de Prevención y Gestión Integral de los residuos - PNPGIR (ver Anexo 5) (SEMARNAT, 2003).

En este ámbito la ley más importante para el desarrollo de BRFs en México es la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos – LPDB publicada en el año 2008 (artículo 1º. Fracción I y II) es el instrumento regulatorio más relevante en México para el desarrollo de una industria de bioenergéticos (ver Anexo 2).

La LPDB establece las bases para favorecer la generación de insumos necesarios para la fabricación de bioenergéticos, además apoya al sector rural mediante la generación, venta y uso sostenible de los bioenergéticos sin comprometer la seguridad alimentaria del México (SENER, 2008).

En esta línea la Ley General de Cambio Climático (LGCC) en el año 2012 (art. 34, fracción IV) (cita textual), también es importante para esta investigación pues tiene como propósito:

*“Desarrollar acciones y promover el desarrollo y la instalación de infraestructura para minimizar y valorizar los residuos, así como para reducir*

*y evitar las emisiones de metano provenientes de los residuos sólidos urbanos”*

La LGCC por su parte también es un instrumento de control de relevancia ambiental (ver Anexo 3) pues tiene por finalidad reducir los GEI un 30 % para el año 2020 y un 50 % el 2050, así como alcanzar para el año 2024 el 35 % (relación con el año 2000) de producción de electricidad a partir de fuentes sostenibles (SEMARNAT, 2012).

**Tabla 7.1.1.1. Descripción de instrumentos regulatorios de bioenergía en México**

Año	Instrumento regulatorio
2019	Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024, tiene como uno de sus objetivos el rescate del sector energético mediante el desarrollo sostenible, incorporando a la sociedad mediante fuentes renovables de energía. Así como la implantación de sistemas de energía renovable
2018	PNPGIR 2017-2018, tiene por objeto cumplir con los derechos y obligaciones de la agenda internacional correspondientes al manejo integral de los RSU (ver Anexo 5)
2015	LTE, tiene por objetivo reglamentar y promover el desarrollo sostenible de la energía y la reducción de emisiones contaminantes, así como la implementación del sector energético de recursos renovables.
2012	Ley General de Cambio Climático, tiene por objetivo disminuir los GEI, mediante acciones que promuevan el desarrollo de infraestructura para minimizar y valorizar los RSU.
2008	LPDB, define y establece la producción, almacenamiento y comercialización de bioenergía, como etanol anhidro y biodiesel.
2003	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) tiene la facultad de: enunciar y administrar la política nacional de los RSU
1976	Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, establece que es responsabilidad de la SENER coordinar la política energética nacional, así como la planeación energética a mediano y largo plazo, la disminución de impactos ambientales derivados del consumo de energía y favorecer la implementación de las energías renovables.
1917	Constitución de los Estados Unidos Mexicanos, la cual decreta que corresponde al Estado planear y orientar la actividad económica nacional de manera sostenible

Referencia: Elaboración propia con datos del DOF

### 7.1.2 Marco legal de biorrefinerías en la Unión Europea

En la revisión realizada en el Diario Oficial de la Unión Europea se encontraron 38 documentos publicados referentes a la tecnología de BRF, de los cuales 4 son textos consolidados, los cuales fueron publicados desde el año 2006 hasta el año 2017 (Tabla 7.1.2.1.) y los temas predominantes son: Investigación e innovación, importación de productos y promoción del uso de energía de recursos renovables y presupuesto.

**Tabla 7.1.2.1. Marco legal de biorrefinerías en la Unión Europea (textos consolidados)**

Instrumento Regulatorio	Descripción
Reglamento (UE) N°1291/2013 Año: 2014	Programa Marco de investigación e innovación (2014-2020) Promueve bioindustrias sostenibles y competitivas. Fomenta la bioeconomía y la eficiencia de los procesos y productos industriales, mediante la implementación de BRF (2a generación o subsiguientes). También contempla la mejorar el empleo de la biomasa y la creación de mercados.
Reglamento (UE) N° 560/2014 Año: 2014	Referente a la empresa común para las bio industrias. Uno de los objetivos es acelerar la transición de la UE hacia una bioeconomía, mediante la construcción de BRF que procesen biomasa para obtener una gama de productos innovadores y en particular establecer BRF que utilicen tecnologías y modelos de negocio para biomateriales, sustancias químicas y combustibles, que demuestren mejoras de costo y rendimiento a niveles competitivos con las alternativas fósiles.
Decisión 2013/743/EU Año: 2013	Programa Marco de Investigación e Innovación (2014-2020) Promover la transición de industrias operadas con combustibles fósiles a industrias sostenibles y eficientes, mediante el desarrollo de BRF integradas, así alcanzar la madurez comercial de las tecnologías de bioenergía y producir de manera sostenible a gran escala biocombustibles avanzados. Generar a partir de residuos y biomasa, gas para el transporte y generación de bioenergías. Apoya actividades que impulsen bioproductos (productos de valor agregado) y las bioenergías.
Decisión 1982/2006/CE Año Los resultados 2006	Relacionada con el 7° Programa Marco de la Comunidad Europea. Con el objetivo de promover el desarrollo tecnológico y la investigación (2007 a 2013). Desarrollar una bioeconomía europea basada en el conocimiento científico e industrial, con el objetivo de promover las oportunidades de investigación emergentes respecto a temas medioambientales, económicos y sociales; impulsa actividades referentes a sistemas de cultivo, bioprocesos y BRF.

Referencia: Elaboración propia con datos de la EUR-lex

### 7.1.3 Marco legal de biorrefinerías en Estados Unidos

Los resultados de la búsqueda de legislaciones en EUA (Tabla 7.1.3.1.) muestran que desde el año 2000 se han emitido 19 leyes que refieren el término de BRF, en el ámbito de inversión, independencia energética, investigación y desarrollo, seguridad agrícola, además la ley busca promover creación de empleos, la conservación de la salud y el ambiente a partir de la tecnología de BRF.

**Tabla 7.1.3.1. Marco legal de EUA referente a la tecnología de biorrefinería**

Año	Instrumento Regulatorio
2000	Ley Pública 106-224. Ley de protección contra riesgos agrícolas
2002	Ley Pública 107-171. Ley de Seguridad Agrícola e Inversión Rural. Tiene por objeto asegurar la continuidad de programas agrícolas hasta el año fiscal 2007 y para otros fines.
2005	Ley Pública 109-58. Ley de política energética. Referente a la Ley de investigación y desarrollo sobre hidratos de metano de 2000; Ley de investigación y desarrollo del carbón de 1960; Ley federal de investigación y desarrollo de la energía no nuclear de 1974. Tiene por objeto garantizar empleos para un futuro con energía segura, asequible y confiable.
2007	Ley Pública 110-140. Establece la Seguridad e Independencia Energética y promover la investigación.
2008	Ley Pública 110-246. Define la conservación de los alimentos y de la energía. Aumentar la independencia energética, impulsar la conservación de recursos, la salud pública y el ambiente. Diversificar el mercado de productos agrícolas (material de desecho agrícola). Crear empleos y mejorar el desarrollo económico de la economía rural.
2008	Ley Pública 110-289. Ley de Vivienda y Recuperación Económica.
2008	Ley Pública 110-234. Referente a la conservación de los alimentos y de la energía
2009	Ley Pública 111-5. Establece los parámetros para conservar y generar empleos. También menciona la inversión para la infraestructura, eficiencia energética y estabilización fiscal a nivel estatal y local.
2010	Ley Pública 111-80. Ley de Apropiaciones para la Agricultura, el Desarrollo Rural, la gestión de Alimentos y Medicamentos y las agencias relacionadas.
2010	Ley Pública 111-212. Ley de asignaciones suplementarias
2012	Ley Pública 112-240. Tiene por objeto ayudar al contribuyente estadounidense
2012	Ley Pública 112-55. Ley de Apropiaciones Consolidadas y continuas Establece asignaciones consolidadas para los departamentos de vivienda, desarrollo urbano, comercio, justicia, agricultura y transporte

Elaboración propia con datos de: [regulations.gov](http://regulations.gov) y [congress.com](http://congress.com)

**Tabla 7.1.3.1. Marco legal de EUA referente a la tecnología de biorrefinería (continuación)**

Año	Instrumento regulatorio
2013	Ley Pública 113-6. Ley de Apropriaciones Consolidadas y continuas Establece apropiaciones y otras asignaciones continuas para el año fiscal que finaliza y para otros fines.
2014	Ley Pública 113–79. Ley de agricultura Tiene por objeto prever la reforma y continuación de los programas agrícolas y de otro tipo del Departamento de Agricultura hasta el año fiscal 2018 y para otros fines.
2014	Ley Pública 113-76. Ley de asignaciones consolidadas Rescinde los fondos CCC especificados de los saldos no comprometidos para la asistencia de biorrefinerías.
2015	Ley Pública 113-235. Ley de Apropriaciones Consolidadas y Continuas Establece créditos consolidados para el año fiscal y para otros fines.
2016	Ley Pública 114-113 Ley de Asignaciones Consolidadas Hacer asignaciones para la construcción militar, el Departamento de Asuntos de Veteranos y agencias relacionadas
2017	Ley Pública 115-31, establece las apropiaciones consolidadas para el año y para otros fines.
2018	Ley Pública 115-334, tiene por objetivo prever la reforma y continuación de los programas agrícolas y de otro tipo del Departamento de Agricultura hasta el año fiscal 2023 y para otros fines.

Elaboración propia con datos de: [regulations.gov](http://regulations.gov) y [congress.com](http://congress.com)

#### *7.1.4 Análisis del marco legal de México para la bioenergía*

Es importante hacer mención a la importancia de los instrumentos de política implementados en la UE, puesto que han sido de gran influencia en la eficiencia de la gestión de RSU y en consecuencia la mayoría de los países han desarrollado más de dos planes nacionales de gestión de residuos (European Environment Agency 2016).

De acuerdo con datos de la Comisión Europea (2021), en la UE durante el año 2018 se generaron 2337 millones de toneladas de RSU, de los cuales el 37.9 % fueron reciclados y el 30.5 % fue dispuesto en rellenos sanitarios. Aunado a esto, el compostaje y digestión aumentó un 18.6% durante el período 2008-2017 (European Environment Agency 2019).

Por su parte EUA, de acuerdo con datos de la EPA, en el 2018 se generaron aproximadamente 292 millones de toneladas de RSU, de los cuales fueron reciclados aproximadamente 69 millones de toneladas (22.6 %) y 25 millones de toneladas fueron

enviados a composta (8.6 %). Además, alrededor de 18 millones de toneladas de alimentos (6.1 %) se procesaron a través de otras vías de manejo de residuos y más de 146 millones de toneladas (50 %) fueron enviados a rellenos sanitarios (EPA 2020).

Aunado a lo anterior, EUA cuenta con una capacidad total de procesamiento de RSO mediante digestión anaerobia de aproximadamente 24.3 millones de toneladas (2019).

Esto en contraste con México, donde aproximadamente el 79 % de los RSU actualmente es destinada a rellenos sanitarios (PNPGIR 2018) y el reciclaje se estima cercano a tan solo el 9 % a nivel nacional. Muy por detrás de EUA y de la UE quienes tienen tasas de reciclaje del 22.9 y 39.9 % respectivamente (PNPGIR 2018).

Los resultados muestran que EUA posee el mayor número de leyes en materia de BRF (19), respecto a la UE y a México (4 leyes y 1 respectivamente), se realizó la comparación de producción de bioenergéticos de la UE con respecto a México, para poder observar el impacto que tiene el número de leyes consolidadas en la UE y su producción de bioenergéticos.

En la tabla 7.1.4.1. se muestran los bioenergéticos más representativos como: bioetanol, biodiesel y biogás, en unidades de Peta Joules (PJ) por año (1 Peta =  $10^{15}$ ). Primero se hizo un promedio de la producción por país europeo, posteriormente se dividieron los totales de cada bioenergético de la UE entre 27 (número de países que conforman la UE).

Se observa (Tabla 7.1.4.1.) que la producción de bioetanol de la UE (promedio por país) es mayor a la de México por un factor de 12.6 y para biodiesel de 5.8. No obstante, en cuanto a la producción de biogás, México es superior por un factor de al menos 4.4. a la UE.

**Tabla 7.1.4.1. Producción de biocombustibles en la Unión Europea y México**

País o región	Bioetanol (PJ/año)	Biodiesel (PJ/año)	Biogás (PJ/año)
UE <sup>a</sup>	432	118	< 20
UE promedio por país <sup>b</sup>	16	4.37	< 0.65
México	1.271	0.75	2.84

<sup>a</sup> UE, Unión Europea, <sup>b</sup> promedio por país de la UE dividiendo los totales entre el número de países (27) que conforman esa entidad.

Referencias: Yáñez-Vergara *et al.*, 2022, CEDRASSA 2020, IRENA 2018, SADER 2017, SENER 2019.



Cabe hacer mención que el bioetanol es uno de los biocombustibles cuyo uso se ha intensificado en el sector autotransporte, particularmente en EUA y Brasil. En 2019 se produjeron 109 582 millones de litros de bioetanol, de los cuales 55 % correspondieron a EUA y 28 % a Brasil (CEDRSSA 2020).

Por su parte México apenas produjo 54 millones de litros de etanol, de los cuales exportó 3 millones de litros, sin embargo, importó 179 millones de litros, principalmente de EUA (CEDRSSA 2020).

De acuerdo con la información disponible, el número de BRFs operativas en México y países selectos, así como el avance de la legislación correspondiente a BRF se muestra en la tabla 7.1.4.2. (elaborado sobre la base de datos publicados por BIC 2017, Parisi 2020, Sotelo-Navarro et al. 2021).

**Tabla 7.1.4.2. Número de biorrefinerías operativas en México y países selectos**

País	No. de BRF en operación en escala piloto o industrial	Avance de la legislación sobre BRF
EUA	250	Alto
Alemania	58	Moderado a alto
México	0	Bajo

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Sotelo-Navarro et al. (2021) BIC 2017, Parisi 2020

La información en la tabla 7.1.4.2. sugiere una correlación positiva entre los niveles de número de BRF en operación y el nivel de desarrollo de la legislación sobre BRF.

Sin embargo, la producción de bioenergéticos puede ser resultado no únicamente debido a la legislación de bioenergéticos, sino también pueden estar involucrados aspectos ambientales, técnicos, económicos, logísticos y sociales (Alibardi *et al.*, 2020).

No obstante, existen autores que argumentan la importancia de un marco legal sólido de biocombustibles (y BRF) (Centro Mario Molina, 2012; Bautista *et al.*, 2016; Espinoza - Pérez *et al.*, 2017; OECD, 2017).

En este contexto, Espinosa-Pérez *et al.* (2017) menciona que la ausencia de la legislación en esta materia puede ser factor de incertidumbre en la cadena de suministro de BRF. En consecuencia, la legislación en esta materia posibilitará crear las condiciones

económicas favorables y estimular el mercado, por medio de subsidios, exenciones de impuestos y obligaciones de consumo (por ejemplo la mezcla diésel-biodiésel) (Bautista *et al.*, 2016).

En esta línea los instrumentos económicos y de mercado, tienen el propósito de impulsar el desarrollo, investigación e innovación de bioenergéticos, mediante el establecimiento de objetivos y mecanismos fiscales como: incentivos, créditos, fondos y subsidios (FAO, 2009).

Respecto a incentivos gubernamentales, Espinoza-Pérez *et al.* (2017) y la OCDE (2017), mencionan que son considerados como fuente de rentabilidad para la empresa.

**Tabla 7.1.4.3. Análisis del marco legal de bioenergía en México con respecto a instrumentos económicos y de mercado.**

Instrumento legal	Análisis respecto a instrumentos económicos y de mercado
Ley General del Cambio Climático (2012)	Promueve la generación de fondos al desarrollo y ejecución de proyectos para la producción de bioenergéticos de segunda generación y a la promoción de fuentes renovables de energía.
Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (2008)	La Comisión de Bioenergéticos debe especificar las regulaciones respecto a la producción y comercialización y uso eficiente de bioenergéticos (art. 8). El Programa de Introducción de bioenergéticos (art.12), tiene por objetivo integrar el biodiesel y el etanol (como componente de la gasolina) y generar las especificaciones de producción, transporte y comercialización. Sin embargo, la ley no contiene objetivos obligatorios ni requerimientos para promover la creación de un mercado interno de bioenergía.
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (1988)	La ley faculta al gobierno federal y a las autoridades estatales para formular incentivos económicos y alentar los objetivos de la política ambiental que aplique en su caso (ver Anexo 6).
Ley del Impuesto sobre la Renta (2013)	La SENER debe promover la implementación de fuentes de energía renovable, así como proponer los estímulos correspondientes (art. 33).
Ley Orgánica de la Administración Pública Federal (1976)	La Ley impulsa proyectos de fuentes de energía renovable y promueve incentivos para la operación o mantenimiento de maquinaria para la producción de estos.
Ley de Desarrollo Rural Sostenible (2001)	Establece los fondos para el uso de fuentes de energía renovables: fondo verde, fondo para tecnologías emergentes, fondo para electrificación rural, fondo de bioenergía.

Referencia: Elaboración propia con datos del DOF

Tal es el caso de países como Colombia, Brasil, Argentina, Perú, EUA y UE, entre otros, donde gracias a incentivos gubernamentales han desarrollado condiciones para el surgimiento de la industria de biocombustibles y bioproductos (OCDE, 2017).

Por lo cual la legislación de BRF de residuos debe ser impulsada y reforzada, para otorgar credibilidad política y contribuir a una comunicación más eficiente entre las secretarías de agricultura, medio ambiente y energía OCDE (2017).

Siguiendo esta línea, se analizaron los instrumentos regulatorios bioenergía en México con respecto a instrumentos económicos y de mercado (Tabla 7.1.4.3). Se muestra que, en cuanto a establecimiento de precios de los biocombustibles, no se encontró mención alguna en la legislación revisada.

El análisis del marco legal de bioenergía respecto a garantías ambientales en México se muestra en la tabla 7.1.4.4. Para dicho análisis se tomaron en consideración las disposiciones generales de protección del ambiente, y la evaluación de impacto ambiental, la protección de bosques y áreas biodiversas.

**Tabla 7.1.4.4. Análisis del marco legal de bioenergía en México respecto a garantías ambientales**

Instrumento legal	Análisis respecto a garantías ambientales
Ley de Promoción y Desarrollo de la Bioenergéticos (2008)	Promueve el desarrollo sustentable de la producción y comercialización y el uso eficiente de bioenergéticos (art. 15).
Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2001)	Tiene por objetivo la conservación forestal a través de la protección y el uso sostenible, además mantiene y promueve la restauración de su diversidad e integridad.
Ley Orgánica de la Administración Pública Federal (1976)	Estipula que corresponde a la SENER reglamenta e impulsa la generación y uso de fuentes renovables de energía con el propósito de reducir los impactos ambientales consecuencia de la producción y consumo de energía (art. 33).
Ley de Transición Energética (2015)	Regula el empleo sustentable de la energía (art.1), mediante la implementación de recursos renovables y de los residuos (art.2). Además de generar estrategias que contengan medidas y políticas para promover el aprovechamiento energético de recursos renovables y sustituyan a los combustibles fósiles (art. 5).

Referencias: Elaboración propia con datos de la DOF (SENER, 2008 & 2015; SEMARNAT, 1976 & 2001)

Por su parte el análisis del marco legal a BRF en cuanto a garantías sociales, se realizó con base en temas de empleo, desarrollo rural, seguridad alimentaria, gestión y planificación del uso de la tierra.

En este ámbito la ley que incluye los temas ya mencionados en la LPDB (SENER, 2008). Pues entre objetivos de la LPDB se encuentra la protección de la seguridad alimentaria, estimular las actividades del sector rural, mediante la implementación de empleos(art.1) (SENER, 2008). Además, la ley establece que la producción de biocombustibles no debe realizar cambios en el uso de la tierra para cultivo de energéticos y también se deben realizar prácticas de restauración (SENER, 2008).

**Tabla 7.1.4.5. Análisis sobre áreas de oportunidad en el marco legal de bioenergía en México**

Legislación	Situación actual de la legislación	Área de oportunidad
Ley para la Promoción y el Desarrollo de la Bioenergía (SENER 2008)	Establece el fondo de bioenergía, con el objetivo de subsidiar el precio de costo y venta de los bioenergéticos. Estimula actividades del sector rural (generación de empleos). Estipula que la producción de biocombustibles no debe alterar el equilibrio del ecosistema, tampoco realizar cambios en el uso de la tierra para cultivo.	No menciona objetivos obligatorios para promover un mercado de bioenergía. Tampoco establece un sistema de permisos respecto a la producción, almacenamiento, transporte y comercialización de bioenergía. Sistema que regule la producción de biocombustibles.
Ley de Transición energética (SENER 2015)	La ley menciona que se deben generar estrategias que impulsen el uso de recursos renovables y sustituyan a los combustibles fósiles (art. 5).	La ley no profundiza ni menciona específicamente las estrategias y políticas obligatorias.
Ley General del Cambio Climático (SEMARNAT 2012)	La ley menciona que se destinarán fondos al desarrollo y de proyectos relacionados con bioenergéticos de segunda generación (art. 82).	La ley no menciona acciones específicas para el desarrollo de infraestructura de bioenergéticos.

Referencia: Elaboración propia con datos del DOF (SENER, 2008 & 2015; SEMARNAT, 2012)

En esta línea la LPDB también (SENER, 2008) implementa un sistema de permisos para llevar a cabo actividades y servicios relacionados con la producción, almacenamiento, transporte, distribución y comercialización de bioenergía.

Aunado a lo anterior, también proporciona un marco institucional de apoyo para las actividades de bioenergía, por ejemplo: la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo Rural Sostenible; el Comité del Sector Energético sobre Cambio Climático; y el Consejo Consultivo para el Mejoramiento de las Energías Renovables.

El desarrollo y comercialización de biocombustibles, solo podrá ser implementada de manera sostenible si se hace frente a las limitantes en el ámbito social, ambiental, legal y económico (FAO, 2000). Aunado a una estructura de gobernanza de biocombustibles mediante un marco regulatorio, que tome en cuenta las barreras sociales, ambientales y económicas existentes (Wang, 2011).

Por lo cual es indispensable analizar e identificar las limitantes y fortalezas existentes en el Marco Legal de bioenergía en México (Tabla 7.1.4.4).

En este ámbito la LPDB impulsa el desarrollo rural sostenible, protección del medio ambiente y derechos agrarios (art. 21) y tiene por objetivo instaurar estrategias y promuevan fuentes de energía renovable a comunidades rurales (art. 11) (SENER, 2008).

Finalmente, en cuanto a vínculos con el comercio internacional y el fondo de carbono, la LTE (Anexo 4) es la responsable de emitir las obligaciones pertinentes para el desarrollo económico respecto a la generación de energía eléctrica con base en energías limpias (SENER 2015). Por su parte la SENER es la responsable de que se cumplan las obligaciones relacionadas con el aprovechamiento de las energías renovables y cambio climático en el ámbito internacional y nacional (SENER 2008).

El análisis realizado al marco legal de bioenergía de México sugiere que la generación de legislaciones de BRF favorecerán el desarrollo y producción de biocombustibles. Y la falta de legislaciones para BRF, retrasaría el desarrollo e implementación de dicha tecnología, debido a la incertidumbre legal existente.

Por lo cual la regulación específica para las BRF puede servir de protección y estímulo en la etapa naciente de ese tipo de aprovechamiento integral de residuos.

## **7.2 Actividad 2. Análisis de Ciclo de Vida de un incinerador con recuperación de energía que procesa la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos**

### *7.2.1 Análisis de inventarios del ciclo de vida para incineración con recuperación de energía*

El funcionamiento de la planta de IRE se dividió en tres etapas principales: (1) combustión de residuos (2) TGC y (3) recuperación de energía. En la figura 7.2.1.1. se muestra el diagrama de IRE.

#### *(1) Combustión*

La FORSU es descargada dentro de la cámara de combustión, donde es incinerada mediante la tecnología de incineración de parrilla (Kedrowski & Chromec, 2012).

Dentro de la cámara de combustión, por medio del sistema de inyección de aire (ventiladores), el aire primario es inyectado a través de pequeñas aberturas por debajo de la parrilla (rejilla) de incineración hacia la FORSU, con la finalidad de enfriar la parrilla y transportar el oxígeno suficiente para la combustión de los residuos (Kedrowski & Chromec, 2012).

El aire primario generalmente es tomado del depósito de desechos, lo cual mantiene una ligera presión negativa en la sala del búnker y elimina la mayoría de olores y polvo del área del búnker (Neuwahl *et al.*, 2019).

Posteriormente el aire secundario es tomado desde la sala de calderas debajo del techo y mediante un ventilador de aire es vertido sobre la rejilla. Una parte de los gases de combustión limpios se recircula de nuevo a el horno, con el propósito de generar un flujo de turbulencia en la cámara de combustión. El cual estabiliza el flujo de los gases de combustión en el horno y asegura la combustión eficiente de los residuos con menos exceso de aire (Neuwahl *et al.*, 2019; Kedrowski & Chromec, 2012).

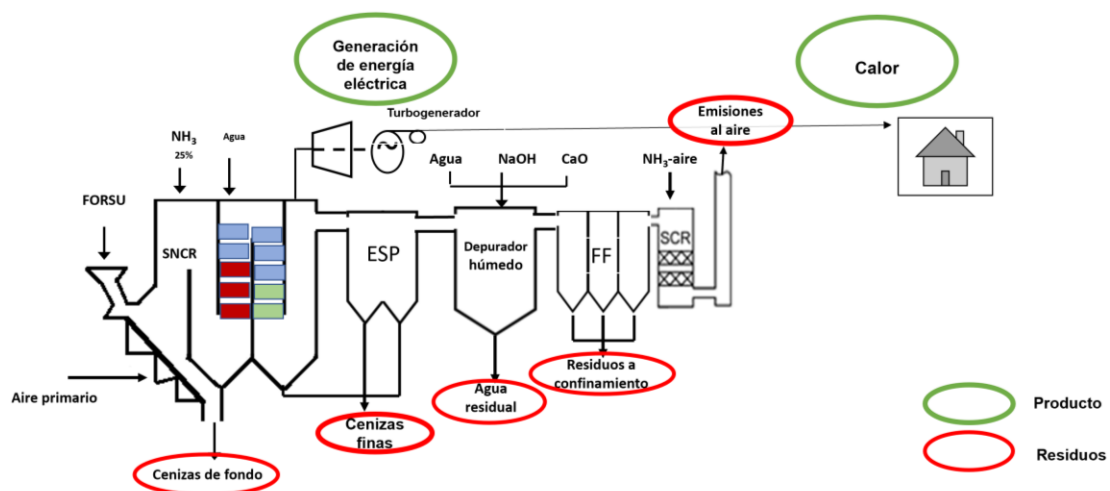
Las cenizas generadas son descargadas de manera continua al final de la rejilla, donde son recuperadas mediante un sistema de cenizas de fondo. Lo cual a su vez funciona como un sello de aire para el horno, evitando las emisiones de gases de combustión y la entrada incontrolada de aire al horno (Neuwahl *et al.*, 2019; Kedrowski & Chromec, 2012).

## (2) Tratamiento de gases de combustión

Como primer paso, el proceso SNCR tiene lugar en la caldera y permite la eliminación de los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ). Por medio de la inyección de una solución acuosa de amoníaco (25 %) como agente reductor en el horno a una temperatura de entre 850 y 950 °C (Neuwahl *et al.*, 2019; Kedrowski & Chromec, 2012).

Como siguiente paso, los gases de combustión generados son enfriados parcialmente mediante la inyección de aire secundario y así evitar la fusión de las cenizas volantes calientes en la caldera (la temperatura de los gases de combustión no debe superar 180 °C (valor típico) a la salida de la cámara de incineración) (Neuwahl *et al.*, 2019). Las cenizas volantes generadas son extraídas de los gases combustión mediante un ESP.

El proceso de LHG involucra el uso de una solución acuosa para extraer los contaminantes del gas de combustión. El proceso se realiza en dos etapas: primero, se eliminan el HCl y el HF en un lavador de agua, seguido de la absorción de  $\text{SO}_2$  en un lavador de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o NaOH y opera a un pH de 6-8 principalmente para la eliminación de  $\text{SO}_2$  (Dong *et al.*, 2020; Neuwahl *et al.*, 2019).



**Figura 7.2.1.1. Diagrama incineración con recuperación de energía**

Referencias: Buekens, 2013. Notas: ESP: precipitador electrostático para cenizas volantes, sistema de limpieza húmedo de gases de combustión (wet flue gas scrubber), SNCR: sistema de reducción catalítica no selectiva, SCR: sistema de reducción catalítica selectiva, FF: filtro de fábrica

Los principales elementos del proceso de LHG de acuerdo con Neuwahl *et al.* (2019) se pueden resumir en: neutralización (adición de cal, NaOH / HCl); reactivos específicos para la precipitación de metales como hidróxidos o sulfuros metálicos (agentes de floculación, trimercapto-s-triazina, sulfuros, polielectrolitos); eliminación de sedimentos.

Normalmente, los flujos provenientes de la sección ácida del TGC (que contienen NaCl, CaCl<sub>2</sub>, Hg, CaF<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>) se mezclan con el flujo alcalino (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) para precipitar parte de la cal y disminuir el concentración de sulfato (a menos de 2 g / l) (Neuwahl *et al.*, 2019).

Posteriormente los residuos generados debido al TGC son tratados mediante un proceso de lixiviación de cenizas de filtración ácidas,

La planta de IRE también cuenta con un sistema de FLUWA, el cual consta de un proceso de lixiviación de cenizas de filtro ácidas, donde el ácido del agua del depurador moviliza y extrae los metales pesados contenidos en las cenizas volantes (Neuwahl *et al.*, 2019). En la etapa de filtración, la torta de ceniza de filtro de bajo contenido en metales se separa de la fase de filtrado metalífero, que se trata posteriormente con un proceso hidrometalúrgico para separar y recuperar los metales contenidos (Neuwahl *et al.*, 2019).

Finalmente, los gases de combustión son sometidos a un proceso de SCR ubicado justo antes de la chimenea. De acuerdo con Neuwahl *et al* (2019) este sistema permite eliminar los óxidos de nitrógeno mediante el uso de un catalizador (como beneficio secundario, las dioxinas y los furanos también son oxidados en el catalizador). Se agrega una mezcla de amoníaco-aire (el agente reductor) al gas de combustión y se pasa sobre un catalizador, generalmente una malla (por ejemplo, platino, rodio, TiO<sub>2</sub>, zeolitas), además de sustancias activas como V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y WO<sub>3</sub>.

Al pasar a través del catalizador, el amoníaco reacciona con NO<sub>x</sub> para producir nitrógeno y vapor de agua (la reacción puede alcanzar una eficiencia de hasta un 90%) (Neuwahl *et al.*, 2019).



### *(3) Recuperación de energía*

El calor generado en la cámara de combustión es recuperado por medio de una caldera tubular para la producción de vapor (Tchoubanoglous & Kreith, 2002). Las paredes de la cámara de combustión están cubiertas por tuberías de intercambio de calor llenas de agua (paredes de membrana refrigeradas por agua).

El vapor es producido en haces de tubos ubicados en paso de los gases de combustión (haces de intercambio de calor) (Neuwahl *et al.*, 2019).

El primer paso generalmente debe estar vacío, (debido a que los gases a altas temperaturas son muy corrosivos) en los siguientes pasos se encuentra el evaporador y el sobrecalentador, los cuales están diseñados con paredes de membrana refrigeradas por agua. Finalmente se encuentra el economizador (Tchoubanoglous & Kreith, 2002).

Posteriormente, el vapor generado pasa través de un turbogenerador para la conversión de energía (Tchoubanoglous & Kreith, 2002).

Adicionalmente la temperatura del agua de alimentación es elevada por medio de un des aireador. El condensado se devuelve al des aireador actúa para ayudar a liberar el oxígeno disuelto en el agua de alimentación (Buekens, 2013).

El agua de alimentación debe recibir un tratamiento mediante la adición de: ablandadores, sulfito de sodio (elimina químicamente el oxígeno disuelto) aminos (control de pH), fosfatos (precipitar calcio residual), para prevenir la formación de incrustaciones y la corrosión de las superficies de las calderas mediante (Tchoubanoglous & Kreith, 2002).

#### *7.2.1.1 Balance de masa*

El consumo energético de la planta de incineración está relacionado con el poder calorífico de los residuos y al volumen generado de los gases de combustión (Tchoubanoglous & Kreith, 2002; Neuwahl *et al.*, 2019).

A continuación, en la tabla 7.2.1.1.1. se muestra la composición típica de los residuos sólidos orgánicos en México y su contenido energético.

**Tabla 7.2.1.1.1. Composición y contenido energético de los residuos sólidos orgánicos en México, características típicas (porcentaje en peso, base húmeda)**

Composición	FORSU kg	Residuos inertes** %	Peso seco kg	Energía ** BTU/lb	Energía kJ/kg	Energía total kJ
Residuos de comida	423	5	274.9	2,000	4,652	1967386.62
Madera	21	1.5	13.9	8,000	18,608	399141.6
Residuos de jardinería	155	4.5	100.8	2,800	6,513	1010135.28
Cartón	205	6	133.1	7,000	16,282	3333739.5
Papel	195	5	126.9	7,200	16,747	3270728.16
<b>Total</b>	<b>1000</b>		<b>649.7</b>			<b>9,981,131.16</b>

NOTAS: \*Datos INEGI, 2017 \*\*Contenido energético típico de los residuos a la descarga (Tchobanoglous *et al.*, 2002). Referencias: INEGI, 2017 y Tchoubanougous & Kreith, 2002

### 7.2.1.2 Requerimientos teóricos del aire

Se determinó la cantidad de aire requerido para la combustión de la FORSU. Se calculó el oxígeno necesario para la oxidación del carbón, hidrógeno y azufre contenido en la FORSU (Tabla 7.2.1.2.1.) de acuerdo con las reacciones de combustión presentadas a continuación (Tchoubanougous & Kreith, 2002):

*Carbón:*  $(C + O_2 \rightarrow CO_2) \rightarrow 11.52 \text{ kg de aire seco/kg C quemado}$

*Hidrógeno:*  $(2H + O_2 \rightarrow 2H_2O) \rightarrow 34.56 \text{ kg de aire seco/kg H quemado}$

*Azufre:*  $(S + O_2 \rightarrow SO_2) \rightarrow 4.31 \text{ kg de aire seco/kg S quemado}$

Se supone que el aire seco contiene: 23.15 % peso de  $O_2$ . Por lo tanto, las cantidades correspondientes de aire seco requerido para oxidar 1 kg de carbón, 1 kg de hidrógeno y 1 kg de azufre son:

$(PMO_2/PA_j)/(100/p_j) = m_{j \text{ aire seco}} \text{ (kg)/kg elemento oxidado ó quemados}$

Ec. [7.2.1.2.1],  $j = C, H, \text{ ó } S$

donde  $m_j$  aire seco es la masa (en kg) de aire seco requerido para quemar 1 kg de elemento j;  $PM_{O_2}$  es 32 kg ;  $PA_j$  es el peso atómico del elemento C, ó S, ó H;  $p_j$  es la proporción en porcentaje del elemento j en la FORSU seca.

Carbón:  $[(32 \text{ kg de } O_2 / 12 \text{ kg de C}) (1 / 0.2315)] = 11.52 \text{ kg de aire seco / kg de C}$   
Ec. [7.2.1.2.2]

Hidrógeno:  $[(32 \text{ kg de } O_2 / 4 \text{ kg de H}_2) (1 / 0.2315)] = 34.56 \text{ kg de aire seco / kg de H}_2$   
Ec. [7.2.1.2.3]

Azufre:  $[(32 \text{ kg de } O_2 / 32.1 \text{ kg de S}) (1 / 0.2315)] = 4.31 \text{ kg de aire seco / kg de S}$   
Ec. [7.2.1.2.4]

En la Tabla 7.2.1.2.1. se muestra la masa seca ( $m_j$ ,  $j = C, H, S$ ) de cada elemento en una unidad funcional de FORSU seca (650 kg  $m_j$ )

Cada fila se calculó como sigue

$$m_j = m_{\text{FORSU}} * (p/100) \quad \text{Ec. [7.2.1.2.5]}$$

donde  $m_j$  es la masa seca de cada elemento en kg,  $m_{\text{FORSU}}$  es la  $m_j$  de FORSU en kg,  $p$  se definió en la Ec [7.2.1.2.1]

**Tabla 7.2.1.2.1. Peso de los elementos que conforman la FORSU seca**

Elemento	Peso seco, en base decimal	Peso seco, en base porcentual (b.s.) (%) w/w	Kg elemento en 650 kg FORSU seca
Carbón	0.4630	46.30	300.82
Hidrógeno	0.0615	6.15	39.95
Oxígeno	0.4046	40.46	262.84
Nitrógeno	0.0175	1.75	11.38
Azufre	0.0030	0.30	1.94
Cenizas	0.0503	5.03	32.67
Total		99.99	649.60

Referencias: Elaboración propia (Tchoubanougous & Kreith, 2002)

La Tabla 7.2.1.2.2. muestra la masa en kg de aire seco requerido por la masa de cada elemento en 650 kg de FORSU seca.

Cada una de las primeras 3 filas se calcula como sigue:

$$m_{\text{asrj}} = m_j * m_{\text{j aire seco}} \quad \text{Ec. [7.2.1.2.6]}, \text{ basándonos en las Ecs. [7.2.1.2.7] y [7.2.1.2.8]}$$

donde  $m_{\text{asrj}}$  es la masa de aire seco (en kg) requerido para oxidar la masa del elemento j presente en 650 kg de FORSU seca;

**Tabla 7.2.1.2.2. Requerimientos teóricos de aire para la combustión de 650 kg FORSU seca**

Elemento	Aire requerido kg
Carbón	3465.44
Hidrógeno	1380.58
Azufre	8.36
Total aire teórico seco	4854.37
Total aire (100% exceso)	4854.37 <sup>a</sup>
Humedad (1%)	48.54
recirculación del aire (20%)	1951.46 <sup>b</sup>
Aire total requerido	7805.82

Referencias: Elaboración propia con datos de (Tchoubanoglous & Kreith, 2002)

a. Se toma exceso de aire de 100% del teórico según las recomendaciones de Tchoubanoglous & Kreith, 2002; Neuwahl *et al.*, 2019.

b. la recirculación de aire es 20 % (Tchoubanoglous & Kreith, 2002; Neuwahl *et al.*, 2019)

La masa de aire requerido, considerando el exceso de 100% de la cantidad teórica, totaliza 7805.82 kg aire como viene. Esto se requiere para quemar 650 kg de FORSU seca.

Sea  $m_{\mu \text{ FORSU}}$  la cantidad de moles de aire requeridos para la combustión de 100 kg de FORSU. Entonces,

$$m_{\mu \text{ FORSU}} = m_{\text{atr}} / PM_{\text{aire}} * 100 / 650 \quad \text{Ec. [7.2.1.3.1]}$$

entonces,  $m_{\text{atr}}$  = masa de aire requerido

$$m_{\text{atr}} = (7805.82 \text{ kg}_{\text{atr}} / 28.7 \text{ kg}_{\text{aire}} / \text{mol}_{\text{aire}}) (100 / 650) = 41.84 \text{ moles}_{\text{atr}}$$

### 7.2.1.3 Oxígeno requerido

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 7.2.1.2.2. se realizaron los cálculos del oxígeno requerido.

Para ello, se supone como PM del aire 28.7 kg / kmol, composición del aire en fracción volumen de oxígeno 0.2069. Se supone el comportamiento de gases ideales, por lo cual el volumen de las fracciones puede ser tomados como fracciones molares y ser iguales a los porcentajes de volumen divididos por 100 (Tchoubanoglous & Kreith, 2002).

$$\mu_{O_2} \text{ (moles } O_2 / 1000 \text{ kg FORSU seca)} = m_{atr} (100/650) \quad \text{Ec. [7.2.1.3.2]}$$

$$\mu_{O_2} \text{ (moles } O_2 / 1000 \text{ kg FORSU seca)} = 41.84 \text{ moles}_{atr} / 1000 \text{ kg FORSU seca} (0.2069 \text{ moles de } O_2) = 8.66 \text{ mol } O_2 / 1000 \text{ kg FORSU seca}$$

Para calcular la masa del  $O_2$

$\omega$  = kilos de oxígeno

$$\omega = \text{kg } O_2 / 1000 \text{ kg FORSU seca} (\text{PM } O_2 \text{ kg } O_2 / \text{mol } O_2) (650 \text{ FORSU seca} / 100 \text{ kg FORSU seca}) (650 \text{ FORSU seca} / 1000 \text{ kg}) \quad \text{Ec. [7.2.1.3.3]}$$

$$\omega = 8.66 \text{ mol } O_2 / 100 \text{ kg FORSU seca} (32 \text{ } O_2 \text{ kg } O_2 / \text{mol } O_2) (650 \text{ FORSU seca} / 100 \text{ kg FORSU seca}) (650 \text{ FORSU seca} / 1000 \text{ kg})$$

$$\omega = 1170.83 \text{ kg } O_2 / 1000 \text{ kg FORSU}$$

Para calcular el  $O_2$  neto, a los kg de  $O_2$  requeridos para la combustión de 1000 kg FORSU, se deben restar 262 kg de  $O_2$  (Tabla 7.2.1.2.1.) autóctonos de la FORSU, es decir

$$1170.83 \text{ kg } O_2 / 1000 \text{ kg FORSU} - 262 \text{ kg de } O_2 (650 \text{ FORSU seca} / 1000 \text{ kg}) = 908 \text{ kg } O_2 \text{ netos} / 1000 \text{ kg FORSU}$$

#### 7.2.1.4 Productos de combustión

A continuación, se presentan los cálculos realizados para el cálculo de CO<sub>2</sub>, dichos cálculos se realizaron de acuerdo con Tchoubanoglous & Kreith, 2002.

Se debe tomar el O<sub>2</sub> netos

$$O_2 = 908 \text{ kg } O_2 \text{ netos} / 1000 \text{ kg FORSU}$$

$$(32 \text{ kg } O_2 / \text{mol } O_2) / (12 \text{ kg C} / \text{mol C}) = 2.66$$

$$(301 \text{ kg de C}) (32 \text{ kg } O_2 / \text{mol } O_2) / (12 \text{ kg C} / \text{mol C}) + (301 \text{ kg de C}) = 1101.66 \text{ kg CO}_2$$

Se realizó el cálculo de los factores de adecuación tecnológica para aquellas emisiones de mayor importancia ambiental para la tecnología de IRE. Los factores de permisibilidad fueron calculados de acuerdo con los límites de emisión establecidos por la normatividad correspondiente en Europa y México (Tabla 7.2.1.4.1).

**Tabla 7.2.1.4.1 Factores de adecuación tecnológica**

Componente	Límite de emisiones (mg/m <sup>3</sup> )		Factor permisibilidad
	Europa	México	
CO	12.50	63.00	5.04
SO <sub>2</sub>	20.00	80.00	4.00
Hg	0.01	0.07	7.00
Dioxinas y furanos	0.05	0.20	4.00
			5.00

Referencia: EEA, 2022; SEMARNAT, 2014

#### 7.2.1.5 Balance de energía

El balance de energía se realizó de acuerdo con Niessen (2002) y Tchoubanoglous & Kreith (2002), es una expresión cuantitativa de la ley de conservación de la energía. Los cálculos realizados se muestran en la tabla 7.2.1.5.1.

De acuerdo con lo anterior es necesario determinar los siguientes aspectos:

1. Energía química: el calor de las reacciones químicas (sobre todo, reacciones de oxidación) que incluyen combustión y disociación. Esta cantidad debe corregirse

para cualquier valor de combustible "inédito" en los residuos o gases de escape.

2. Calor latente: el calor para cambiar el estado de los materiales, que incluye la sublimación,

fusión y vaporización.

3. Calor sensible: el contenido de calor relacionado con la temperatura de los materiales.

4. Pérdidas de calor: a las paredes de los sistemas de combustión.

5. Calor útil: entregado a la caldera proveniente del proceso de combustión.

**Tabla 7.2.1.5.1 Balance de energía de IRE**

Energía del sistema	kJ
Calor de combustión	9981131.164
Calor latente	1797292
Total	8183839.16
Pérdidas de calor (5%) de la cámara de combustión	409191.958
Pérdidas de calor en el residuo incinerado(fused)	13671.0811
Energía dentro del boiler	7760976.12
Pérdidas de calor del boiler (5 %)	388048.806
Pérdida de calor de los gases de chimenea (kJ/kg (538 °C y 100% exceso d aire)	6545.7812
Energía neta (kJ)	7366381.54
Calor residual (kJ)	2614749.63
Calor 80% (kJ)	5893105.23
Energía eléctrica 20% (kJ)	1473276.31
Generación de energía eléctrica total kWh	129.30

Referencias: Elaboración propia; Niessen, 2002; Tchoubanougous & Kreith, 2002

#### 7.2.1.6 Inventario del ciclo de vida de incineración con recuperación de energía

En esta sección se muestran los resultados de los balances de materia y energía de la IRE de 1000 kg de FORSU (UF) También se observan los productos generados, calor y energía(Tabla 7.2.1.6.1.).

En la tabla 7.2.1.6.1. se muestran las emisiones al agua, aire y tierra; así como también la base de datos de sonde se extrajeron estos datos. Las principales emisiones de la IRE de FORSU se encuentran remarcadas en un recuadro rojo.

Tabla 7.2.1.6.1. Inventario de ciclo de vida de incineración con recuperación de energía (1/7)

Productos	Cantidad	Unidad	Observaciones		
Energía eléctrica	129.3	kWh	68 % asignación		
Calor	5893	MJ	32 % asignación		
Entrada	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
FORSU	1000	kg	-	Creado	400 kg residuos papel, 600 kg residuos orgánicos (Escamilla-Alvarado et al., 2017)
Oxygen	950.00	kg	-	Eoinvent 3	Oxygen from ambient air needed to combust and oxidise this waste. Net demand, i.e. without O2 leaving the plant in flue gas uncombusted. (Tchoubanougious & Kreith, 2002)
Ammonia	0.996	kg	Ammonia, liquid {RER}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Input to DeNOx stage (100% NH3).
Cationic resin	5.746E-04	kg	Cationic resin {RER}  market for cationic resin   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Auxilliary input for mercury removal in filter ash treatment (FLUWA).
Cement	9.808	kg	Cement, unspecified {CH}  market for cement, unspecified   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Cement required for solidification of landfilled residual material.
Chemical, inorganic	0.135	kg	Chemical, inorganic {GLO}  market for chemicals, inorganic   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Auxilliary inputs for the wastewater treatment stage of the incinerator plant. Proxy for Polyelectrolyte.
Chemical, organic	1.041E-03	kg	Chemical, organic {GLO}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Auxilliary inputs for the wastewater treatment stage of the incinerator plant. Proxy for (pure) Trisodium-trimercapto-s-triazine (CAS 17766-26-6), used as 15% diluted solution, aka TMT15.
Chromium oxide	1.274E-03	kg	Chromium oxide, flakes {GLO}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Input to DeNOx stage. Active component in SCR catalyst (vanadium pentoxide, V2O5), here approximated with the available chromium trioxide.
Heat, natural gas	186.294	MJ	Heat, district or industrial, natural gas {CH}  market for heat, district or industrial, natural gas   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Input to DeNOx stage, to heat up flue gas in low-dust SCR.
Hydrochloric acid 30%	0.715	kg	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RER}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Auxilliary inputs for the wastewater treatment stage of the incinerator plant.
Hydrogen peroxide 50%	1.730	kg	Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RER}  market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Auxilliary oxidising agent for filter ash treatment (FLUWA).
Iron (III) chloride 40%	0.002	kg	Iron (III) chloride, without water, in 40% solution state {GLO}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Auxilliary inputs for the wastewater treatment stage of the incinerator plant.
Metalliferous hydroxide sludge	-5.381	kg	Metalliferous hydroxide sludge {GLO}  metalliferous hydroxide sludge, Recycled Content cut-off   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Metalliferous hydroxide sludge from filter ash leaching (FLUWA).
Municipal waste incineration facility	4.643E-07	p	Municipal waste incineration facility {CH}  construction   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Demands per kilogram waste.



Tabla 7.2.1.6.1. Inventario de ciclo de vida de incineración con recuperación de energía (2/7)

Entrada	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Process-specific burdens, residual material landfill	48.889	kg	Process-specific burdens, residual material landfill {CH}  market for process-specific burdens, residual material landfill   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Mass-specific expenditures required for landfilling of incineration residues.
Process-specific burdens, slag landfill	264.938	kg	Process-specific burdens, slag landfill {CH}  market for process-specific burdens, slag landfill   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Mass-specific expenditures required for landfilling of bottom ash.
Quicklime, milled, packed	2.563	kg	Quicklime, milled, packed {RER}  market for quicklime, milled, packed   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Auxilliary inputs for the flue gas treatment stage of the incinerator plant.
Residual material landfill	1.019E-07	p	Residual material landfill {CH}  construction   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Landfill infrastructure required for landfilling of incineration residues.
Slag landfill	4.710E-07	p	Slag landfill {CH}  construction   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Auxilliary inputs for the flue gas treatment stage of the incinerator plant, and partially in the filter ash treatment (FLUWA).
Sodium hydroxide 50%	2.007	kg	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Input to DeNOx stage (TiO2 catalyst carrier)
Titanium dioxide	0.062	kg	Titanium dioxide {RER}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Transport services to transport incineration residues to landfills and filter ash to external treatments (FLUWA).
Transport, freight, lorry, unspecified	12.125	tkm	Transport, freight, lorry, unspecified {RER}  market for transport, freight, lorry, unspecified   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Landfill infrastructure required for landfilling of bottom ash.
Water, decarbonised, at user	1595.590	kg	Water, decarbonised, at user {GLO}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Incinerator process water used in flue gas scrubber stage.
SALIDAS (Emisiones al aire)	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Aluminium	6.600E-05	kg	Aluminium	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Ammonia	5.857E-03	kg	Ammonia	Ecoinvent 3	Nitrogen species emitted to air after DeNOx stage.
Arsenic	1.269E-04	kg	Arsenic	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Benzene	3.864E-04	kg	Benzene	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Benzene, hexachloro-	8.080E-07	kg	Benzene, hexachloro-	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Benzene, pentachloro-	2.042E-06	kg	Benzene, pentachloro-	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Benzo(a)pyrene	8.599E-09	kg	Benzo(a)pyrene	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Bromine	2.427E-05	kg	Bromine	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Cadmium	5.697E-07	kg	Cadmium	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Calcium	1.389	kg	Calcium	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Carbon dioxide, biogenic	1190	kg	Carbon dioxide, biogenic	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Carbon monoxide, biogenic	0.657	kg	Carbon monoxide, biogenic	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Chromium	5.66E-05	kg	Chromium	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.

Tabla 7.2.1.6.1. Inventario de ciclo de vida de incineración con recuperación de energía (3/7)

SALIDAS (Emisiones al aire)	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Cobalt	7.36E-05	kg	Cobalt	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Copper	1.34E-05	kg	Copper	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Cyanide	0.104	kg	Cyanide	Ecoinvent 3	Nitrogen species emitted to air after DeNOx stage.
Dinitrogen monoxide	0.483	kg	Dinitrogen monoxide	Ecoinvent 3	Nitrogen species emitted to air after DeNOx stage.
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	6.18E-10	kg	Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Heat, waste	2614.749	MJ	Heat, waste	Creado	Waste heat generated from heating value of this waste plus any electricity required to process it. Tchoubanougous & Kreith, 2002)
Hydrogen chloride	1.85E-02	kg	Hydrogen chloride	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Hydrogen fluoride	1.09E-02	kg	Hydrogen fluoride	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Iodine	2.47E-07	kg	Iodine	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Iron	8.71E-06	kg	Iron	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Lead	1.24E-05	kg	Lead	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Magnesium	2.41E-02	kg	Magnesium	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Manganese	6.65E-06	kg	Manganese	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Mercury	2.25E-05	kg	Mercury	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Methane, biogenic	5.80E-03	kg	Methane, biogenic	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Molybdenum	4.26E-06	kg	Molybdenum	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Nickel	5.51E-05	kg	Nickel	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Nitrogen oxides	1.855	kg	Nitrogen oxides	Ecoinvent 3	Sum of fuel-Nox and thermal-NOx emitted to air after DeNOx stage.
NMVOC	1.76E-02	kg	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Particulates, < 2.5 um	4.61E-02	kg	Particulates, < 2.5 um	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	2.32E-04	kg	Particulates, > 2.5 um, and < 10um	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Phenol, pentachloro-	1.68E-07	kg	Phenol, pentachloro-	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Phosphorus	9.30E-03	kg	Phosphorus	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Potassium	1.40E-01	kg	Potassium	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Selenium	4.83E-05	kg	Selenium	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Silicon	5.04E-04	kg	Silicon	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.

Tabla 7.2.1.6.1. Inventario de ciclo de vida de incineración con recuperación de energía (4/7)

SALIDAS (Emisiones al aire)	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Sodium	9.97E-02	kg	Sodium	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Sulfur dioxide	1.03E-01	kg	Sulfur dioxide	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Tin	4.23E-08	kg	Tin	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Toluene	7.73E-04	kg	Toluene	Ecoinvent 3	Incomplete combustion product emitted to air.
Vanadium	5.15E-04	kg	Vanadium	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
Water/m3	12.580	m <sup>3</sup>	Water/m3	Ecoinvent 3	Water vapour from waste humidity, hydrogen oxidation and part of the process water.
Zinc	3.16E-04	kg	Zinc	Ecoinvent 3	Emission to air from waste composition and transfer coefficients.
SALIDAS (Emisiones al agua)	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Aluminium	6.01E-03	kg	Aluminium	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Aluminium	62.489	kg	Aluminium	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Antimony	7.50E-06	kg	Antimony	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Antimony	4.08E-06	kg	Antimony	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Arsenic	9.87E-03	kg	Arsenic	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Arsenic	6.51E-03	kg	Arsenic	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
BOD5, Biological Oxygen Demand	3.188	kg	BOD5, Biological Oxygen Demand	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
BOD5, Biological Oxygen Demand	0.978	kg	BOD5, Biological Oxygen Demand	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Boron	0.068	kg	Boron	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Boron	8.59E-04	kg	Boron	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Bromine	4.51E-02	kg	Bromine	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Bromine	2.52E-03	kg	Bromine	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Cadmium	1.99E-07	kg	Cadmium	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Cadmium	1.79E-04	kg	Cadmium	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Calcium	149.869	kg	Calcium	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Calcium	3.173	kg	Calcium	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Chloride	27.515	kg	Chloride	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Chloride	4.080	kg	Chloride	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Chromium	8.41E-06	kg	Chromium	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.

Tabla 7.2.1.6.1. Inventario de ciclo de vida de incineración con recuperación de energía (5/7)

SALIDAS (Emisiones al agua)	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Chromium VI	3.69E-03	kg	Chromium VI	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Chromium VI	1.07E-03	kg	Chromium VI	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Cobalt	6.73E-06	kg	Cobalt	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Cobalt	3.55E-02	kg	Cobalt	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
COD	1.000	kg	COD, Chemical Oxygen Demand	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
COD	9.746	kg	COD, Chemical Oxygen Demand	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Copper	0.137	kg	Copper	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Copper	1.26E-05	kg	Copper	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
DOC	3.857	kg	DOC, Dissolved Organic Carbon	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
DOC	0.436	kg	DOC, Dissolved Organic Carbon	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Fluoride	1.081	kg	Fluoride	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Fluoride	0.471	kg	Fluoride	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Iodide	4.34E-04	kg	Iodide	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Iron	2.492	kg	Iron	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Iron	1.02E-04	kg	Iron	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Lead	1.02E-05	kg	Lead	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Lead	0.106	kg	Lead	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Magnesium	21.270	kg	Magnesium	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Magnesium	0.173	kg	Magnesium	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Manganese	4.36E-06	kg	Manganese	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Manganese	2.77E-02	kg	Manganese	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Mercury	1.19E-04	kg	Mercury	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Mercury	3.02E-06	kg	Mercury	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Molybdenum	5.39E-04	kg	Molybdenum	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Molybdenum	2.50E-03	kg	Molybdenum	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Nickel	4.33E-02	kg	Nickel	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.

**Tabla 7.2.1.6.1. Inventario de ciclo de vida de incineración con recuperación de energía (6/7)**

SALIDAS (Emisiones al agua)	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Nickel	2.97E-05	kg	Nickel	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Nitrate	0.416	kg	Nitrate	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Nitrate	1.162	kg	Nitrate	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Phosphate	0.014	kg	Phosphate	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Phosphate	0.823	kg	Phosphate	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Potassium	20.339	kg	Potassium	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Potassium	7.686	kg	Potassium	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Selenium	8.06E-04	kg	Selenium	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Selenium	3.11E-03	kg	Selenium	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Silicon	23.909	kg	Silicon	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Silicon	0.077	kg	Silicon	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Sodium	7.951	kg	Sodium	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Sodium	3.998	kg	Sodium	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Sulfate	4.962	kg	Sulfate	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Sulfate	29.030	kg	Sulfate	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Thallium	9.16E-06	kg	Thallium	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Thallium	1.53E-08	kg	Thallium	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Tin	4.30E-02	kg	Tin	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Tin	5.85E-05	kg	Tin	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
TOC, Total Organic Carbon	0.436	kg	TOC, Total Organic Carbon	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
TOC, Total Organic Carbon	3.857	kg	TOC, Total Organic Carbon	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Vanadium	3.57E-05	kg	Vanadium	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.
Vanadium	9.49E-03	kg	Vanadium	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Water, CH	2.695	m <sup>3</sup>	Water, CH	Ecoinvent 3	Process water released to surface water.
Zinc	0.212	kg	Zinc	Ecoinvent 3	Long-term emissions from landfilling of incineration residues.
Zinc	2.89E-05	kg	Zinc	Ecoinvent 3	Emissions to water from waste composition and transfer coefficients in incinerator and landfills.

**Tabla 7.2.1.6.1. Inventario de ciclo de vida de incineración con recuperación de energía (7/7)**

<b>SALIDAS (Emisiones al suelo)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Flujo</b>	<b>Base de datos</b>	<b>Observaciones</b>
Slags	32.670	kg	Slags	Creado	(Tchoubanougous & Kreith, 2002)
Fly ash	3.200	kg	Fly ash	Creado	(Tchoubanougous & Kreith, 2002)
<b>SALIDAS (residuos para tratamiento)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Flujo</b>	<b>Base de datos</b>	<b>Observaciones</b>
Spent activated carbon with mercury	6.05E-04	kg	Spent activated carbon with mercury {GLO}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Spent ion exchanger charged with mercury, from FLUWA filter ash treatment, approximated here with Spent activated carbon with mercury, deposited underground in a polyethylene Big Bag.
Waste cement, hydrated	24.522	kg	Waste cement, hydrated {CH}  market for waste cement, hydrated   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Hydrated cement output for solidification of landfilled residual material.

Referencia: Elaboración propia con datos de proxy Ecoinvent “Biowaste {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction| Cut-off, U”, PRé Consultants, 2021; ISO 14044, 2006; Niessen, 2002; Tchoubanougous & Kreith, 2002.

### 7.2.1.7 Análisis de calidad de datos

A continuación, se muestra en análisis de calidad de datos (tabla 7.2.1.7.1.). Los datos y procesos mostrados fueron tomados de la descripción del método de Ecoinvent “Biowaste {CH}| treatment of, municipal incineration with fly ash extraction”. Se observa que la calidad es buena. En cuanto a precisión e integridad, es buena y alta, respectivamente, puesto que las fuentes de información provienen de fuentes oficiales. La incertidumbre se refiere a la certeza de la información, la cual puede ser calificada como baja, media o alta.

Tabla 7.2.1.7.1. Análisis de calidad de datos de IRE

Etapa de proceso	Dato	Tiempo	Geografía	Tecnología	Precisión	Integridad	Representatividad	Reproducibilidad	Coherencia	Fuentes de información	Incertidumbre
Obtención de FORSU	Materia prima (residuos orgánicos y papel)	2021	Suiza	NA	Buena	alta	Buena	✓	✓	Reporte de generación de residuos CDMX	Baja
Incinerador de parrilla	Producción- calor	2021	N/A	N/A	Buena	alta	Buena	✓	✓	Cálculos de acuerdo con el proceso Tchoubanouglous & Kreith, 2002	Baja
	Producción gases de combustión	2006-2018	Suiza	Moderna	Buena	alta	Buena	✓	✓	Ecoinvent	Baja
ESP cenizas volantes	Emisiones agua, aire y tierra	2006-2018	Suiza	Moderna	Buena	alta	Buena	✓	✓	Ecoinvent	Baja
Sistema de limpieza de gases de combustión húmedo	Emisiones aire y agua	2006-2018	Suiza	Moderna	Buena	alta	Buena	✓	✓	Ecoinvent	Baja
SNCR	Emisiones al agua	2006-2018	Suiza	Moderna	Buena	alta	Buena	✓	✓	Ecoinvent	Baja
SCR- alto polvo	Emisiones aire y agua	2006-2018	Suiza	Moderna	Buena	alta	Buena	✓	✓	Ecoinvent	Baja
SCR-bajo polvo	Emisiones aire y agua	2006-2018	Suiza	Moderna	Buena	alta	Buena	✓	✓	Ecoinvent	Baja
Sistema DeNOX-polvo	Emisiones aire y agua	2006-2018	Suiza	Moderna	Buena	alta	Buena	✓	✓	Ecoinvent	Baja
Tratamiento filtro de cenizas (FLUWA)	Emisiones tierra y agua	2006-2018	Suiza	Moderna	Buena	alta	Buena	✓	✓	Ecoinvent	Baja
Separación de restos de hierro de las escorias	Emisiones tierra y agua	2006-2018	Suiza	Moderna	Buena	alta	Buena	✓	✓	Ecoinvent	Baja
Tecnología de eficiencia eléctrica bruta	Electricidad-consumo	2021	N/A	N/A	Buena	alta	Buena	✓	✓	Cálculos de acuerdo con el proceso Tchoubanouglous & Kreith, 2002	Baja
	Emisiones aire y agua	2006-2018	Suiza	Moderna	Buena	alta	Buena	✓	✓	Ecoinvent	Baja
Tecnología de eficiencia térmica bruta	Calor-consumo	2021	N/A	N/A	Buena	alta	Buena	✓	✓	Cálculos de acuerdo con el proceso Tchoubanouglous & Kreith, 2002	Baja
	Emisiones aire y agua	2006-2018	Suiza	Moderna	Buena	alta	Buena	✓	✓	Ecoinvent	Baja

NOTAS: SNCR: sistema de reducción catalítica no selectiva, ESP: precipitador electrostático, SCR: sistema de reducción catalítica selectiva.

Referencia: Elaboración propia con datos del proxy Ecoinvent "Biowaste {CH} treatment of, municipal incineration with fly ash extraction", ISO 14044, 2006; Tchoubanouglous & Kreith, 2002.

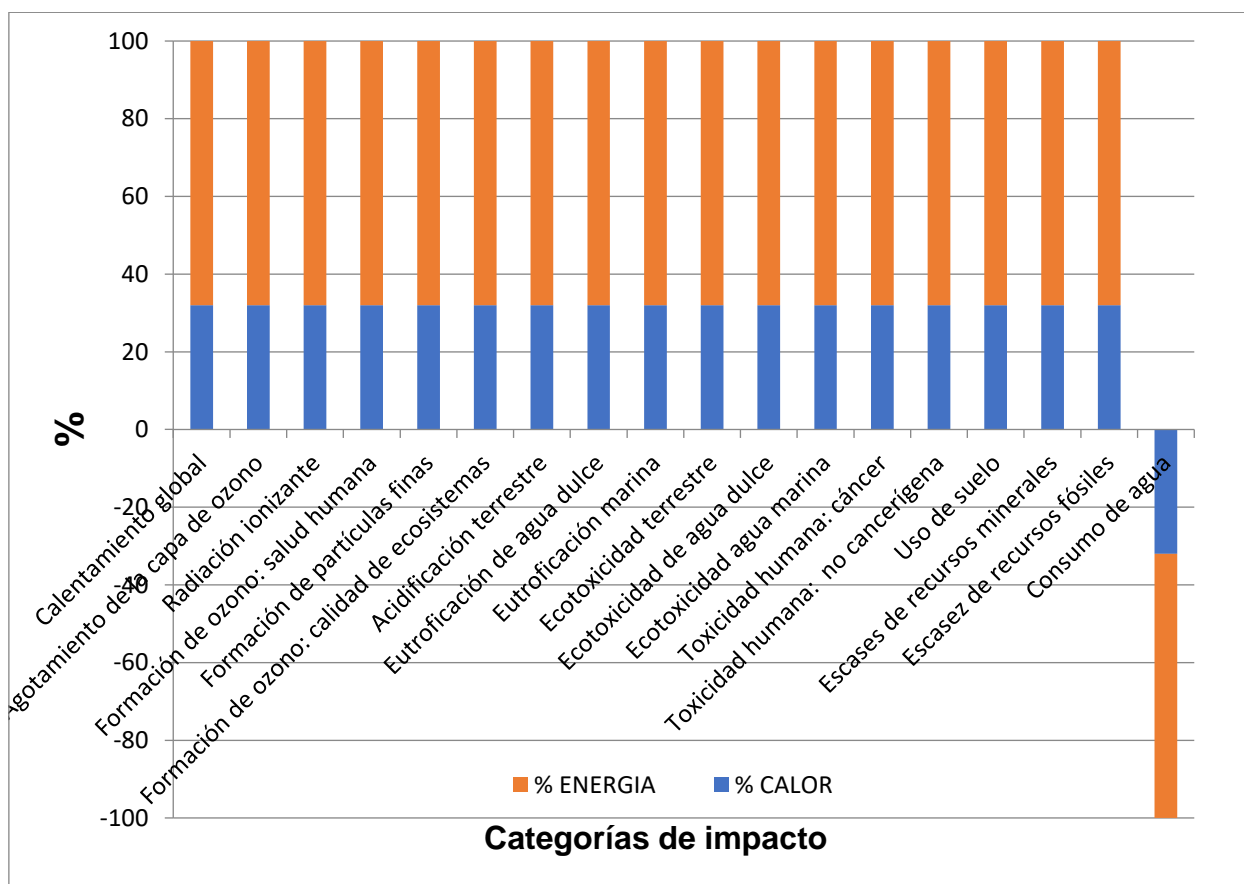
### 7.2.2 Resultados de evaluación de impactos del ciclo de vida de incineración con recuperación de energía

En esta sección se muestran los resultados de la evaluación impactos del inventario de ciclo de vida de IRE presentado en la tabla 7.2.1.6.1.

Cabe recordar que con el propósito de evaluar los impactos ambientales inmediatos fue usado el método ReCiPe 2016 jerárquico de punto intermedio v.1.03. midpoint (puntos intermedios).

#### 7.2.2.1 Resultados de análisis de impactos, por categoría de impacto, efectos porcentuales de incineración con recuperación de energía.

A continuación, en la figura 7.2.2.1.1 y en la tabla 7.2.2.1.1 se muestran los resultados del análisis de impactos de IRE sobre las categorías de impactos ambientales por producto.



**Figura 7.2.2.1.1. Tendencias de los efectos porcentuales de IRE sobre las categorías de impactos ambientales (ISO 14044, 2006)**



En la figura. 7.2.2.1.1. se observa que la generación de energía es el proceso que más contribuye a las categorías de impacto de la IRE. También se muestra un valor negativo en el consumo de agua, lo cual supone un “ahorro”. Puesto que el agua usada en la generación de energía puede ser empleada como agua de proceso (recirculación, precalentamiento) o incluso puede ser consumida en áreas cercanas a la planta.

**Tabla. 7.2.2.1.1. Efectos porcentuales de IRE sobre las categorías de impactos ambientales, organizado por productos: calor y energía eléctrica**

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDADES	TOTAL	% CALOR	% ENERGIA
Calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> e	167.952	32.0	68.0
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 e	0.005	32.0	68.0
Radiación ionizante	kBq Co-60 e	1.219	32.0	68.0
Formación de ozono: salud humana	kg NO <sub>x</sub> e	1.897	32.0	68.0
Formación de partículas finas	kg PM <sub>2.5</sub> e	0.300	32.0	68.0
Formación de ozono: calidad de ecosistemas	kg NO <sub>x</sub> e	1.899	32.0	68.0
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> e	0.830	32.0	68.0
Eutroficación de agua dulce	kg P e	0.281	32.0	68.0
Eutroficación marina	kg N e	0.106	32.0	68.0
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB e	246.743	32.0	68.0
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB e	71.903	32.0	68.0
Ecotoxicidad agua marina	kg 1,4-DCB e	96.550	32.0	68.0
Toxicidad humana: cáncer	kg 1,4-DCB e	38.163	32.0	68.0
Toxicidad humana: no cancerígena	kg 1,4-DCB e	1809.024	32.0	68.0
Uso de suelo	m <sup>2</sup> a crop e	0.124	32.0	68.0
Escases de recursos minerales	kg Cu e	0.046	32.0	68.0
Escasez de recursos fósiles	kg oil e	5.395	32.0	68.0
Consumo de agua	m <sup>3</sup>	-0.820	-32	-68

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006)

En la tabla 7.2.2.1.1. se observa que la energía predomina en todas las categorías, debido principalmente al proceso de combustión y a las emisiones que contribuyen a las categorías de ecotoxicidad y toxicidad humana como: As (V), Zn (II) y Cr (VI) (Hauschild *et al.*, 2018).

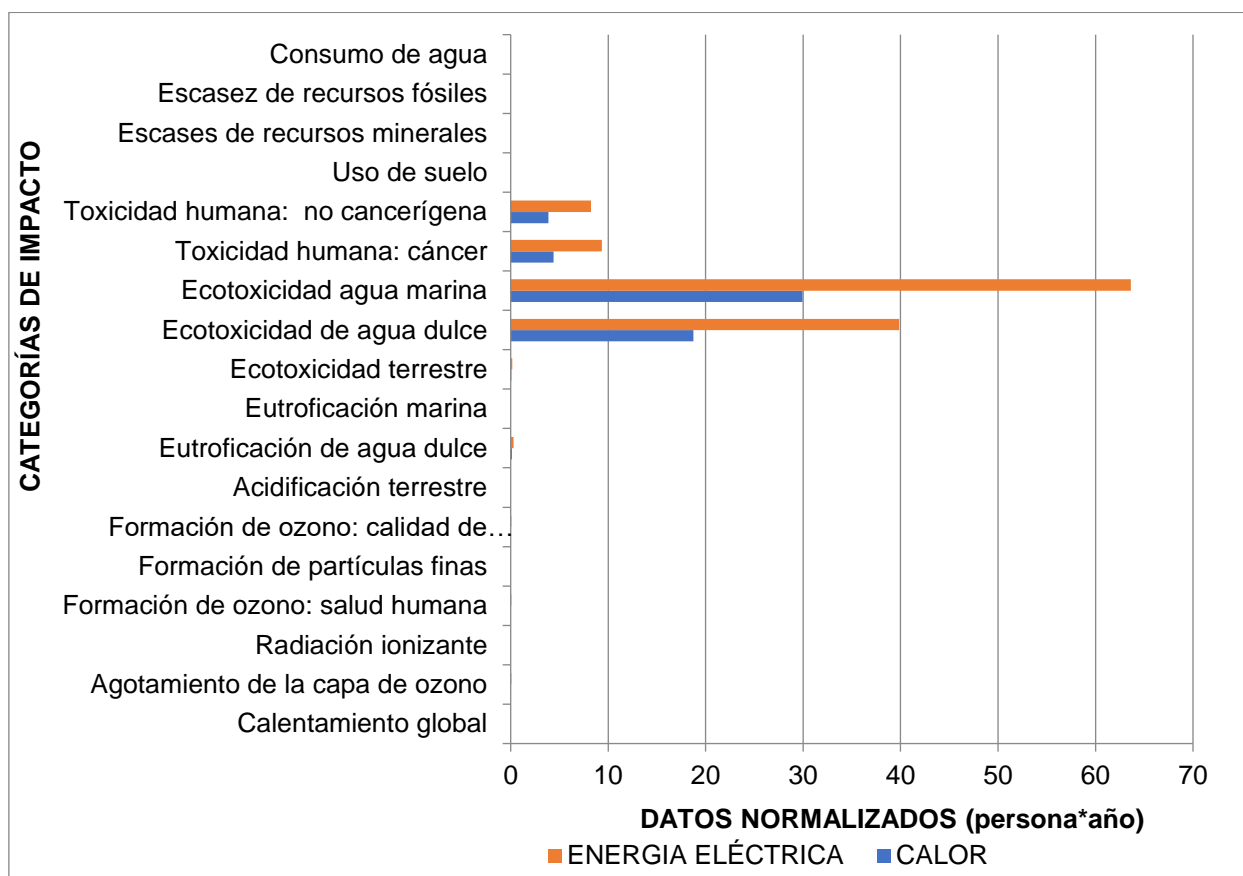
Lo anterior coincide por lo reportado con Turconi *et al.*, 2021, quien refiere a la generación de energía como el principal proceso al cual se le atribuyen el mayor número de categorías de impacto.

Por su parte el proceso de TGC también contribuye de manera importante a las categorías de impacto y es parte del proceso de generación de energía (Dong *et al.*, 2020)

Los lixiviados provenientes de este proceso ricos en sales solubles (aproximadamente el 50 %) resultantes de la eliminación de gases ácidos y contribuyen de manera importante al proceso de generación de energía, el cual será analizado más adelante (Tchoubanougous & Kreith, 2002).

7.2.2.2 Resultados de análisis de impactos, por categoría de impacto, efectos normalizados de incineración con recuperación de energía.

A continuación, en la figura 7.2.2.2.1. y en la tabla 7.2.2.2.1. se muestran los resultados de los potenciales impactos ambientales normalizados (PIAN), para IRE.



**Figura 7.2.2.2.1. Tendencias sobre los efectos normalizados de la incineración con recuperación de energía sobre las categorías de impactos ambientales (ISO 14044, 2006)**

Se observa en la figura 7.2.2.2.1 que la categoría predominante es la ecotoxicidad marina, seguido por la ecotoxicidad al agua dulce y el proceso de mayor contribución es la generación de energía eléctrica. Lo cual está relacionado principalmente con los procesos de combustión de residuos y TGC (Lou *et al.*, 2015).

En menor proporción se encuentra la toxicidad humana cancerígena y no cancerígena. Más adelante estas categorías de impacto serán analizadas con mayor detalle en la sección destinada a análisis de procesos.

**Tabla 7.2.2.2.1. Efectos normalizados de la IRE sobre categorías de impactos ambientales, organizado por productos: calor y energía eléctrica (persona\*año)**

CATEGORÍA DE IMPACTO	CALOR	ENERGIA ELÉCTRICA
Calentamiento global	0.007	0.014
Agotamiento de la capa de ozono	0.028	0.061
Radiación ionizante	0.001	0.002
Formación de ozono: salud humana	0.029	0.063
Formación de partículas finas	0.004	0.008
Formación de ozono: calidad de ecosistemas	0.034	0.073
Acidificación terrestre	0.006	0.014
Eutroficación de agua dulce	0.138	0.294
Eutroficación marina	0.007	0.016
Ecotoxicidad terrestre	0.076	0.162
Ecotoxicidad de agua dulce	18.752	39.849
Ecotoxicidad agua marina	29.938	63.619
Toxicidad humana: cáncer	4.409	9.368
Toxicidad humana: no cancerígena	3.884	8.254
Uso de suelo	6.45E-06	1.37E-05
Escases de recursos minerales	1.22E-07	2.59E-07
Escasez de recursos fósiles	0.002	0.004
Consumo de agua	-0.001	-0.002
Subtotal por producto	57.3165	121.7996
Total efectos normalizados $\alpha$	179.1161	

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006).

En la tabla 7.2.2.2.1 se observa que el total de efectos normalizados es  $\alpha = 179.11$  (persona\*año). Los PIAN predominantes (marcados en color amarillo) corresponden a las categorías de ecotoxicidad marina (63.6) y al agua dulce (39.8). Seguidos por la toxicidad humana cancerígena (9.3) y no cancerígena (8.2).

La toxicidad humana y ecotoxicidad están relacionadas con los residuos y las emisiones del proceso de IRE. Debido principalmente a la contaminación del aire por emisiones de gases de combustión: NO<sub>x</sub>, PM, SO<sub>x</sub>, HCl, COV totales, Cd, Ni, As, Hg, dioxinas, furanos, CO<sub>2</sub>, CO (Kumar, 2017; Hauschild *et al.*, 2018; Cole-Hunter *et al.*, 2020).

Por su parte las aguas superficiales, aguas subterráneas y del suelo se ven afectadas por los lixiviados generados en el proceso de limpieza de gases, los cuales pueden contener: benceno, tolueno, As, Pb, Ni, Hg, Zn, NH<sub>3</sub> (Cole-Hunter *et al.*, 2020).

En consecuencia, las emisiones previamente mencionadas pueden provocar daños a la salud ya sea por inhalación, ingestión de alimentos o agua contaminada (pescado, carne, leche, verduras) y exposición dérmica al suelo y/o polvo (Kumar, 2017; Hauschild *et al.*, 2018; Cole-Hunter *et al.*, 2020).

Las categorías de impacto normalizado bajo observadas en la tabla 7.2.2.2.1 fueron: radiación ionizante (Anexo 7), formación de partículas finas (Anexo 8), acidificación terrestre (Anexo 9), eutroficación del agua dulce (Anexo 10), eutroficación del agua marina (Anexo 11), uso de suelo (Anexo 12), escasez de recursos minerales (Anexo 13) y escasez de recursos fósiles (Anexo 14).

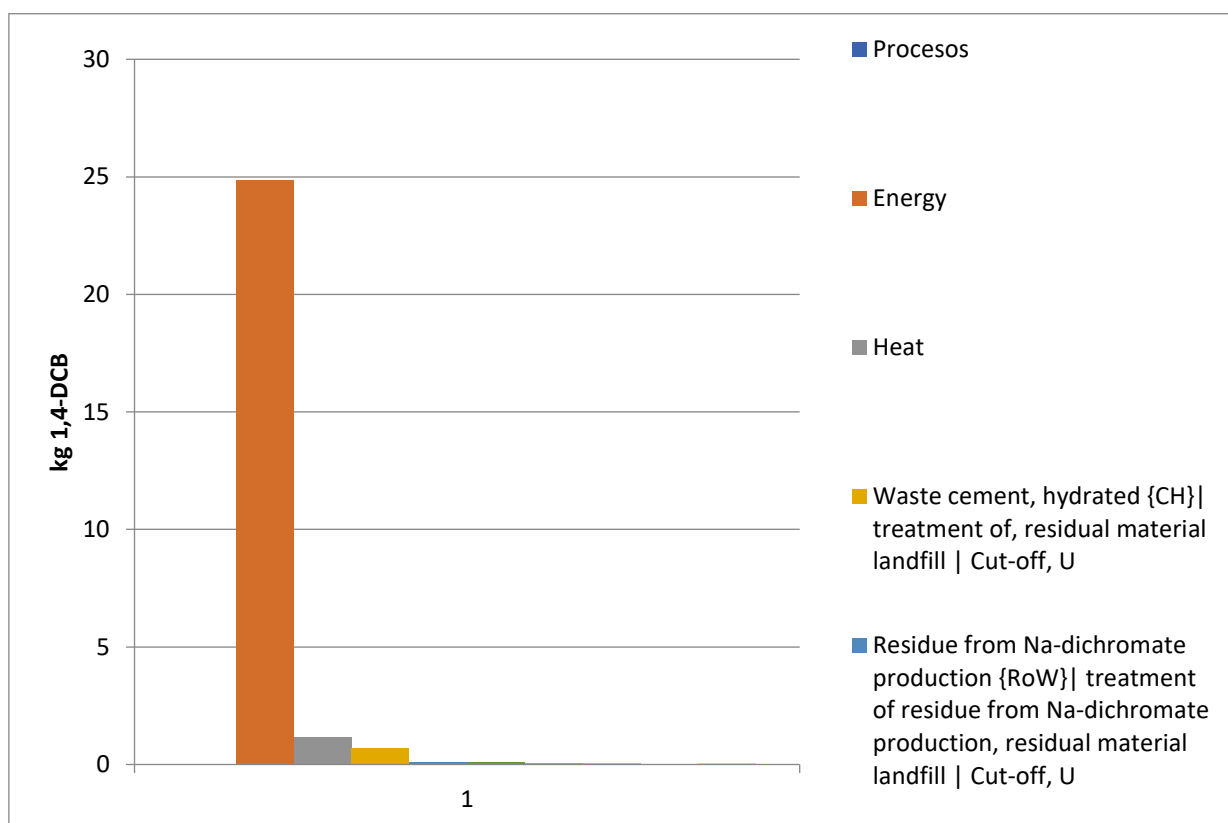
Estas categorías no fueron analizadas en esta sección, debido a que su efecto normalizado es bajo. Sin embargo, para mayor detalle pueden ser consultadas en el respectivo anexo.

### 7.2.2.3 Resultados de contribución a procesos en la tecnología de IRE a categorías de impacto

En esta sección se muestran los resultados de contribución de procesos de IRE a las categorías de impacto ambiental con mayor efecto normalizado

#### 7.2.2.3.1 Toxicidad humana cancerígena

A continuación, se muestran los resultados referentes a toxicidad humana de tipo cancerígena (figura 7.2.2.3.1.1. y tabla 7.2.2.3.1.1.).



**Figura. 7.2.2.3.1.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de IRE, a la categoría toxicidad humana de tipo cancerígena (ISO 14044, 2006)**

La figura 7.2.2.3.1.1. muestra que el proceso de mayor contribución a la toxicidad humana de tipo cancerígena es debido a la generación de energía eléctrica. El resto de los procesos observados no indican una contribución relevante a la toxicidad humana cancerígena.

La principal preocupación en esta categoría son las emisiones de Cr (VI), el cual es considerado el principal impulsor de toxicidad cancerígena (Hauschild *et al.*, 2018). También la combustión incompleta de los residuos conlleva la generación de dioxinas, dibenzopdioxinas policloradas, los dibenzofuranos policlorados y los bifenilos policlorados las cuales son altamente cancerígenas (Kumar, 2017).

**Tabla 7.2.2.3.1.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría toxicidad humana de tipo cancerígena**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Energy	kg 1,4-DCB e	24.859
2	Heat	kg 1,4-DCB e	1.168
3	Waste cement, hydrated {CH}  treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.697
4	Residue from Na-dichromate production {RoW}  treatment of residue from Na-dichromate production, residual material landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.122
5	Anthraquinone {RoW}  production   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.100
6	Spoil from lignite mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.059
7	Anthraquinone {RER}  production   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.049
8	Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.045
9	Procesos remanentes	kg 1,4-DCB e	0.071

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006).

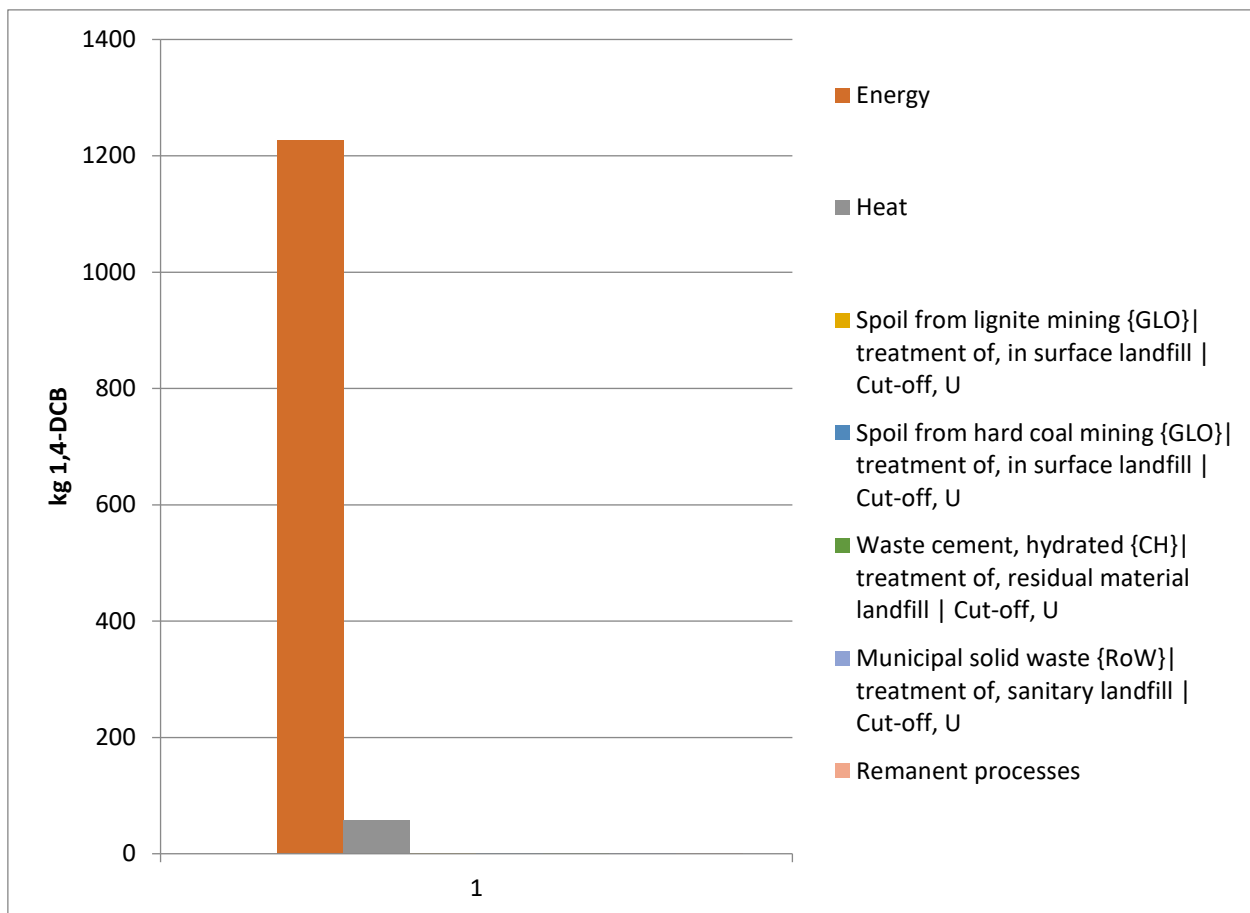
En la tabla 7.2.2.3.1.1. se observa que la generación de energía contribuye con una emisión de 24.86 kg 1,4-DBCe (kg de equivalente de 1,4- diclorobenceno). En menor proporción se observan los procesos de calor y tratamiento de algunos residuos.

También está relacionado el proceso de TGC y los lixiviados provenientes de este proceso, los cuales pueden contener emisiones de: benceno, tolueno, As, Pb, Ni, Hg, Zn, NH<sub>3</sub> (Cole-Hunter *et al.*,2020).

En consecuencia, el contacto con dichas emisiones ya sea por inhalación, ingestión o por exposición pueden provocar daños a la salud (Kumar, 2017; Hauschild *et al.*, 2018; Cole-Hunter *et al.*,2020).

### 7.2.2.3.2 Tóxicas a la salud humana no cancerígena

Se muestra en la figura 7.2.2.3.2.1 y en la tabla 7.2.2.3.2.1. los principales procesos que contribuyen a la generación de emisiones tóxicas a la salud humana no cancerígena.



**Figura 7.2.2.3.2.1. Contribuciones generales de los procesos de IRE, a la categoría toxicidad humana de tipo no cancerígena (ISO 14044, 2006)**

La figura 7.2.2.3.2.1. muestra nuevamente que la contribución de proceso predominante en la IRE corresponde a la generación de energía eléctrica. El resto de los procesos no son relevantes para esta categoría.

**Tabla 7.2.2.3.2.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría toxicidad humana de tipo no cancerígena**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Energy	kg 1,4-DCB e	1226.6134
2	Heat	kg 1,4-DCB e	57.6612
3	Spoil from lignite mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.905
4	Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.701
5	Waste cement, hydrated {CH}  treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.3456
6	Municipal solid waste {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.2922
7	Remanent processes	kg 1,4-DCB e	1.4518

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006).

En la tabla 7.2.2.3.2.1. muestra que el principal proceso que contribuye a emisiones tóxicas a la salud humana no cancerígena son producto de la generación de energía energía con 1226 kg 1,4-DCB e.

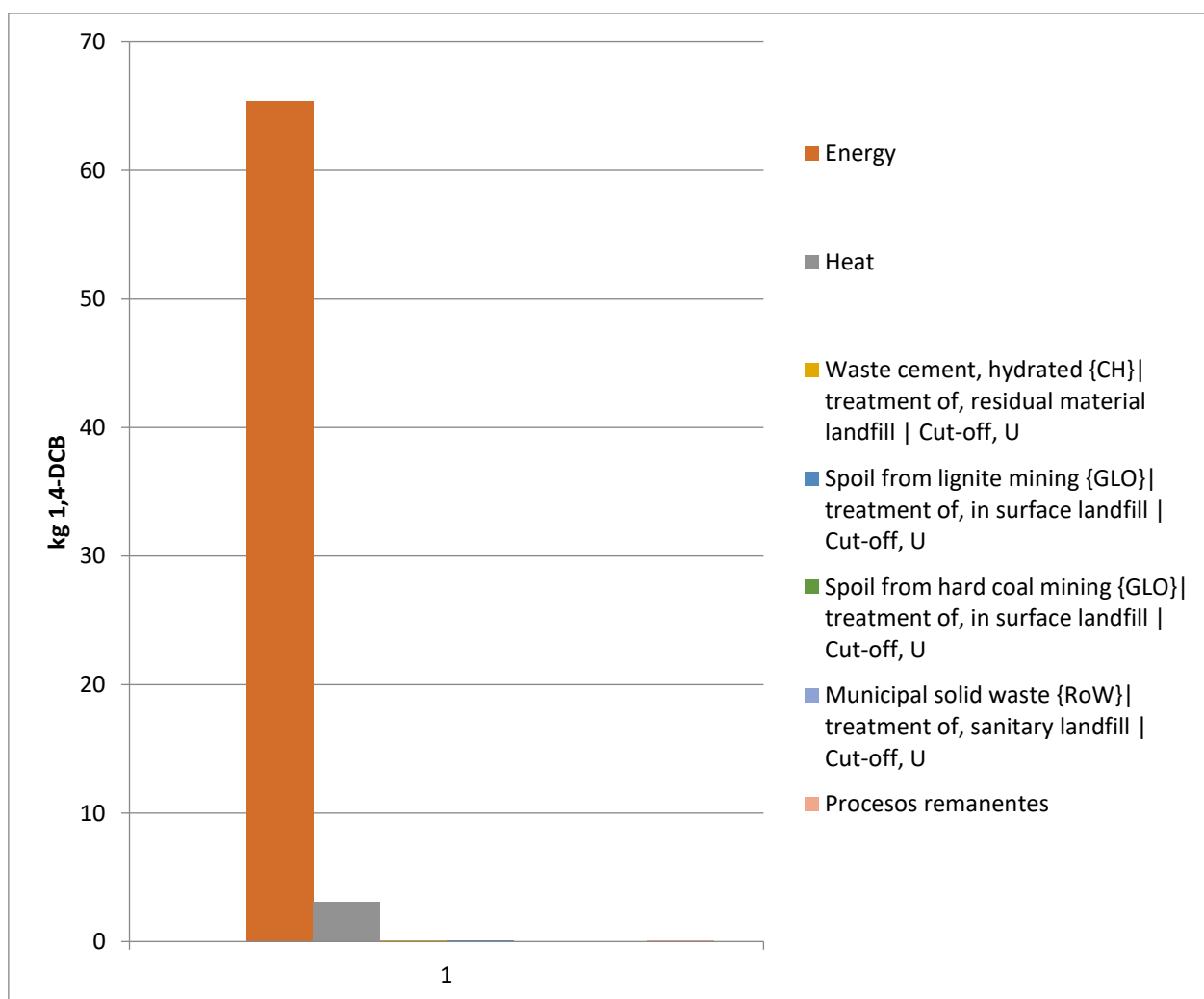
En esta línea se identificaron como emisiones más críticas para esta categoría el As, Cu y Zn (Maresca et al., 2022). En menor medida se encuentra la generación de calor y procesos referentes al tratamiento de residuos del proceso de combustión (relleno sanitario).

En menor proporción se observan procesos de residuos de minería de carbón y residuos de cemento. Dichos procesos son empleados para el relleno sanitario de las cenizas.



### 7.2.2.3.3 Ecotoxicidad marina

A continuación, se muestran los resultados referentes a la categoría de ecotoxicidad marina a la tecnología de IRE (fig. 7.2.2.3.3.1. y tabla 7.2.2.3.3.1.).



**Figura 7.2.2.3.3.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría ecotoxicidad marina (ISO 14044, 2006)**

En la figura 7.2.2.3.3.1. se observa que el proceso predominante a la categoría de ecotoxicidad marina es la generación de energía eléctrica. En contraste con el resto de los procesos, los cuales no se observan con contribuciones importantes.

**Tabla 7.2.2.3.3.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría ecotoxicidad marina**

No.	Etiqueta	Unidades	Total
1	Energy	kg 1,4-DCB e	65.3779
2	Heat	kg 1,4-DCB e	3.0733
3	Waste cement, hydrated {CH}  treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.1024
4	Spoil from lignite mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.0428
5	Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.0321
6	Municipal solid waste {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U	kg 1,4-DCB e	0.0179
7	Procesos remanentes	kg 1,4-DCB e	0.094

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006).

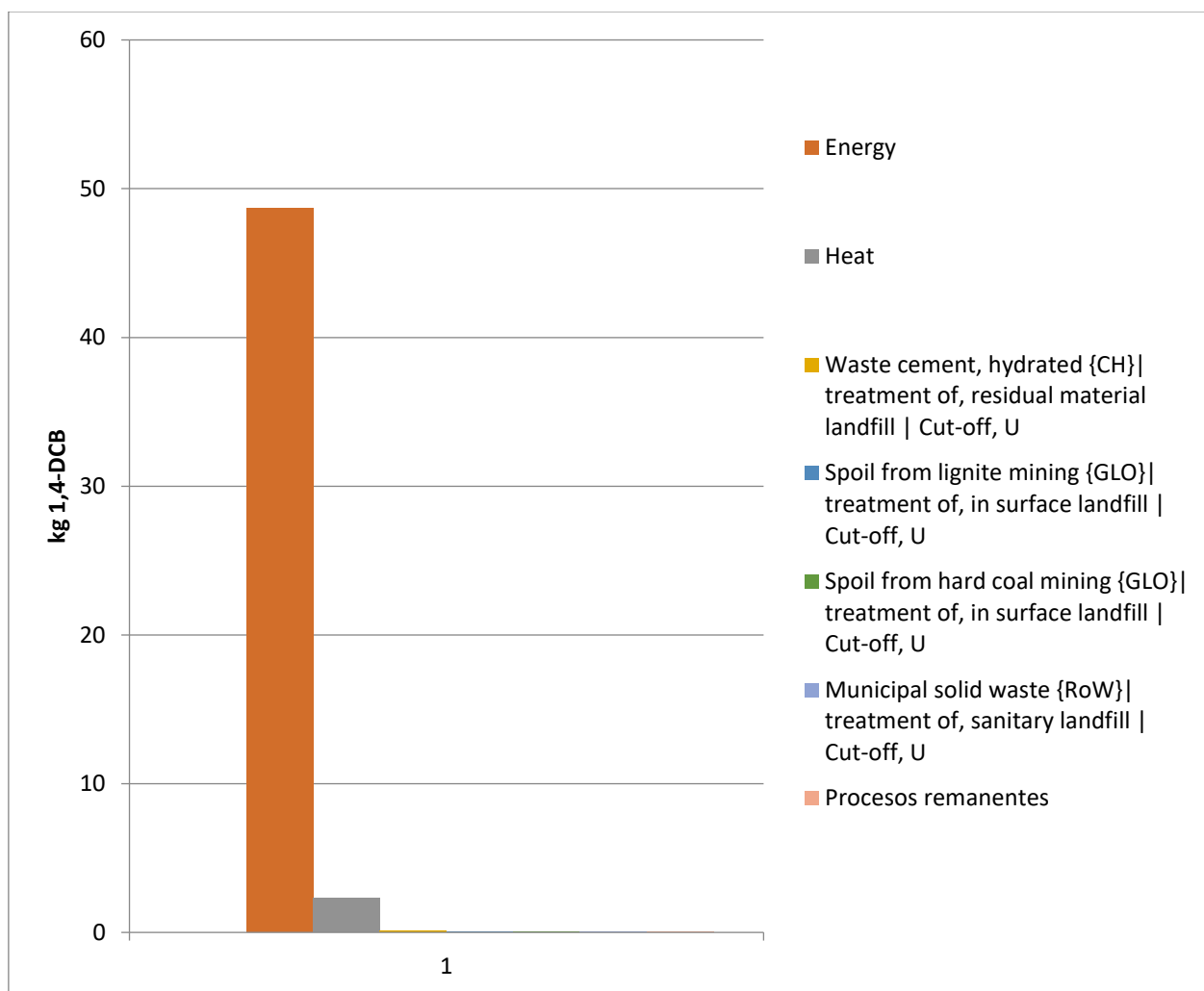
La tabla 7.2.2.3.3.1. muestra que el proceso con mayor contribución a la categoría de ecotoxicidad marina es la generación de energía eléctrica con 65.37 kg 1,4-DCB e.

Lo cual está relacionado principales con emisiones hídricas de metales pesados tales como el Cr, Ni, Zn, y Co (Hauschild *et al.*, 2018).

En menor contribución se encuentran procesos de tratamiento de residuos, como cenizas volantes y las finas, así como reactivos y los productos de reacción formados como consecuencia de los compuestos empleados en equipos de TGC (ciclones, precipitadores, filtros, etc.) (Tchoubanoglous & Kreith, 2002).

#### 7.2.2.3.4 Ecotoxicidad al agua dulce

A continuación, se muestran los resultados de la categoría ecotoxicidad al agua dulce a la tecnología de IRE (Fig. 7.2.2.3.4.1. y la Tabla 7.2.2.3.4.1.).



**Figura 7.2.2.3.4.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría ecotoxicidad al agua dulce (ISO 14044, 2006)**

En la figura 7.2.2.3.4.1. se observa que el proceso de mayor contribución a la categoría de ecotoxicidad al agua dulce es la generación de energía eléctrica.

En menor contribución a esta categoría se encuentran procesos de tratamiento de residuos como cenizas finas.

**Tabla 7.2.2.3.4.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría ecotoxicidad al agua dulce**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Energy	kg 1,4 DCB e	48.7041
2	Heat	kg 1,4 DCB e	2.2895
3	Waste cement, hydrated {CH}  treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	0.0725
4	Spoil from lignite mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	0.0312
5	Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	0.0233
6	Municipal solid waste {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	0.0137
7	Procesos remanentes	kg 1,4 DCB e	0.0588

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006)

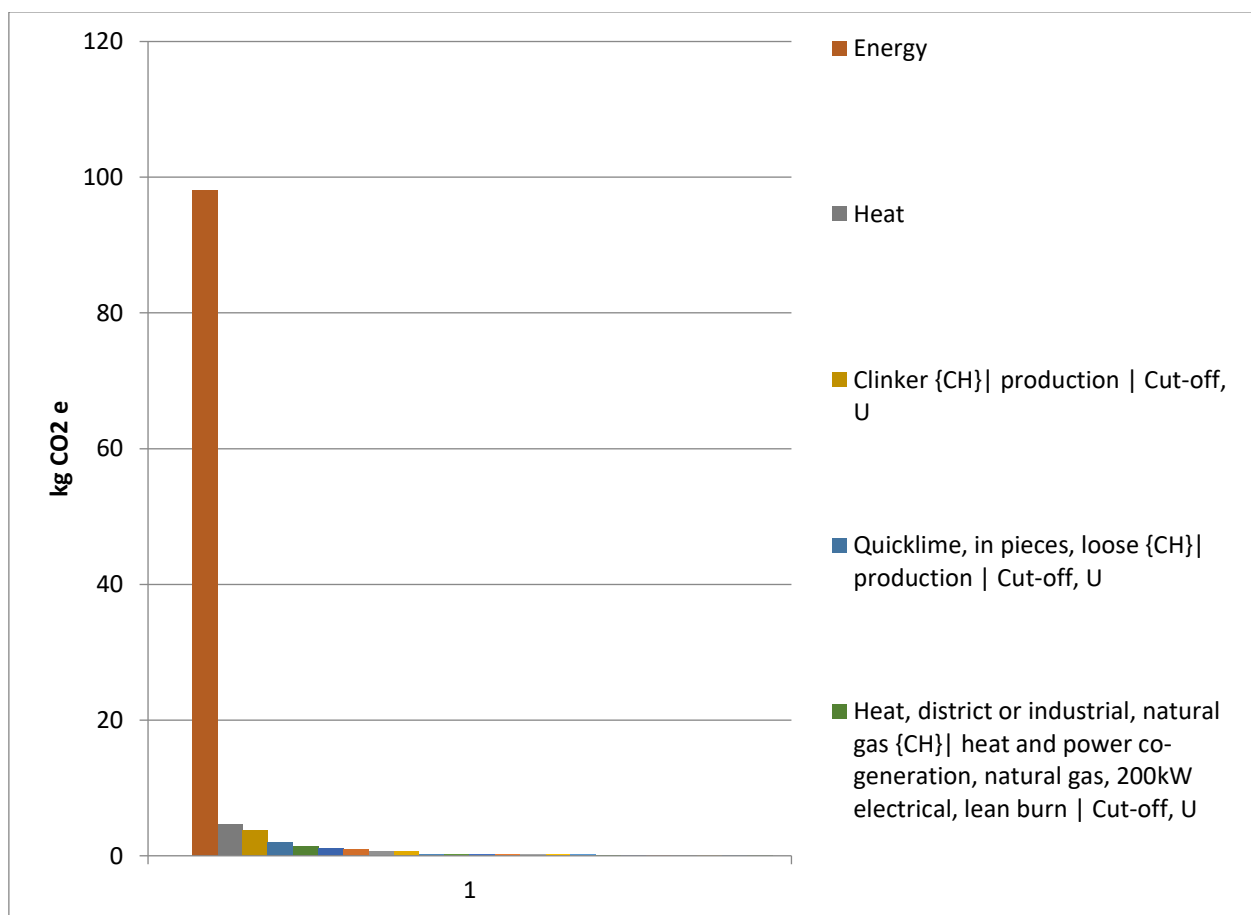
La tabla 7.2.2.3.4.1. indica que los procesos con mayores contribuciones en la categoría de ecotoxicidad al agua dulce es la generación de energía eléctrica con 48.7 kg 1,4 DCB e y en menor proporción el proceso de calor con 2.28 kg 1,4 DCB e.

Las principales emisiones hídricas que contribuyen en esta categoría son Cu, As, Zn (II), Cr, Ni y Br en el agua (Hauschild *et al.*, 2018).

En menor contribución en esta categoría se encuentran procesos de tratamiento de residuos (cenizas volantes y las finas), así como reactivos y los productos de reacción formados como consecuencia de los compuestos empleados en equipos de TGC (Tchoubanoglous & Kreith, 2002).

### 7.2.2.3.5 Calentamiento global

A continuación, se muestran los resultados de la categoría de calentamiento global a la tecnología de IRE (Fig. 7.2.2.3.5.1. y Tabla 7.2.2.3.5.1.).



**Figura 7.2.2.3.5.1. Contribuciones generales de los procesos a la categoría calentamiento global de Incineración con recuperación de energía (ISO 14044, 2006)**

Se observa en la figura 7.2.2.3.5.1. y en la tabla 7.2.2.3.5.1. que el proceso que más contribuye al calentamiento global es el de generación de energía eléctrica, pues ocupa el 98 Kg CO<sub>2</sub> e de emisiones y está relacionado con la combustión de los residuos.

Las principales emisiones emanadas de este proceso son CO<sub>2</sub>, hidrocarburos y CO (Lou *et al.*, 2015). En menor proporción contribuyen al calentamiento global los procesos de calor (calor residual), escorias, calor debido al uso de gas natural como fuente auxiliar y el óxido de calcio (cal) usado en la limpieza de los gases de combustión (producto del calor emitido debido a la reacción de la cal con el agua).

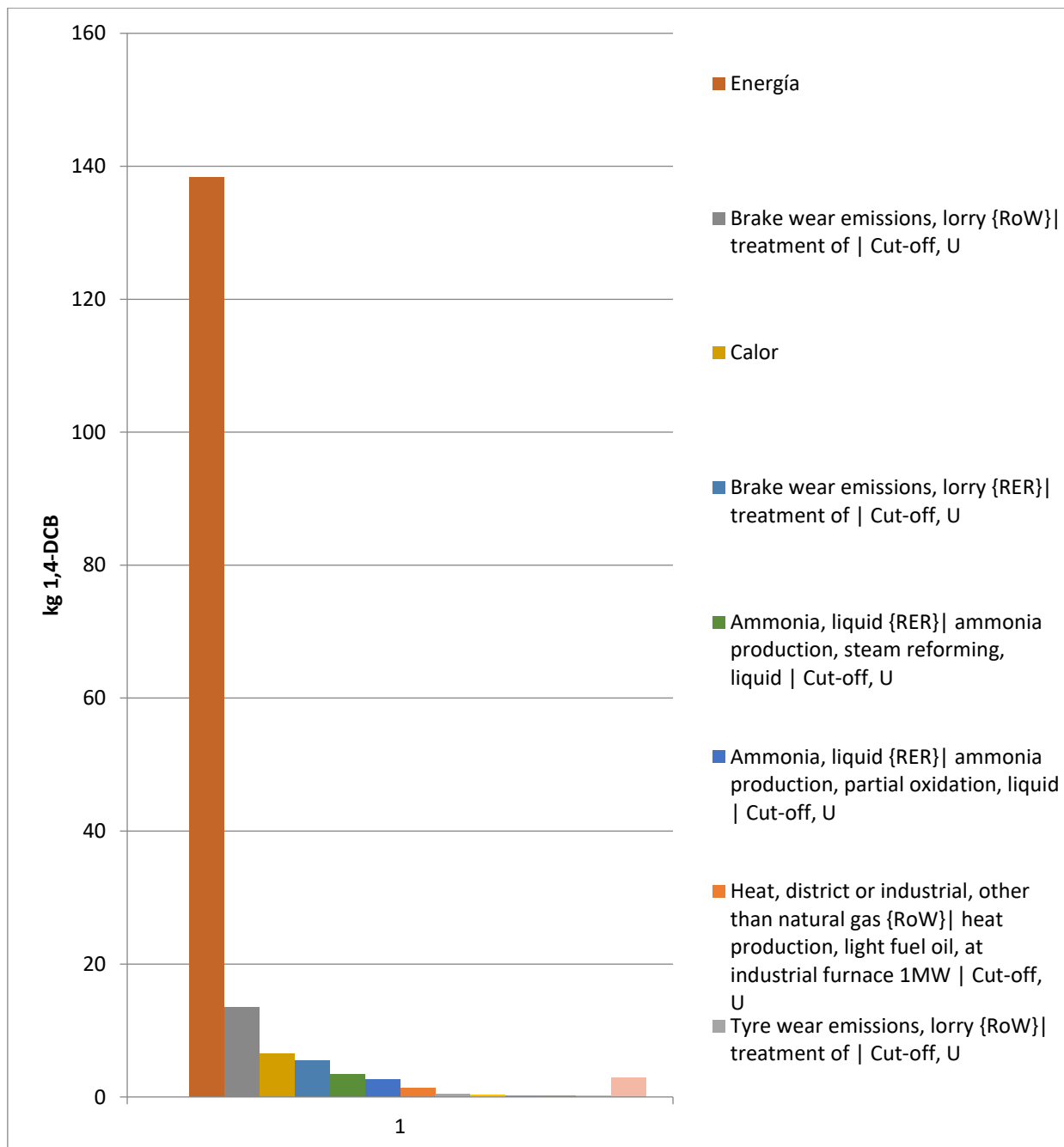
**Tabla 7.2.2.3.5.1. Contribuciones de Incineración con recuperación de energía a la categoría de calentamiento global**

No.	Proceso	Unidades	Total
1	Energy	Kg CO <sub>2</sub> e	98.0404
2	Heat	Kg CO <sub>2</sub> e	4.6087
3	Clinker {CH}  production   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	3.6956
4	Quicklime, in pieces, loose {CH}  production   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	1.983
5	Heat, district or industrial, natural gas {CH}  heat and power co generation, natural gas, 200kW electrical, lean burn   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	1.3391
6	Heat, district or industrial, natural gas {CH}  heat and power co-generation, natural gas, 1MW electrical, lean burn   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	1.0735
7	Ammonia, liquid {RER}  ammonia production, steam reforming, liquid   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.9011
8	Heat, district or industrial, natural gas {CH}  heat and power co-generation, natural gas, 500kW electrical, lean burn   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.7068
9	Clinker {Europe without Switzerland}  production   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.682
10	Ammonia, liquid {RER}  ammonia production, partial oxidation, liquid   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.2559
11	Natural gas, low pressure {CH}  market for   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.2519
12	Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland}  heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.2121
13	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.1882
14	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RER}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.1858
15	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.1712
16	Hydrogen, liquid {RER}  hydrogen cracking, APME   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.1595
17	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.1553
18	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.1518
19	Transport, pipeline, long distance, natural gas {RU}  processing   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.1384
20	Electricity, high voltage {DE}  electricity production, lignite   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.137
21	Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.1363
22	Hard coal {CN}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.132
23	Electricity, medium voltage {RU}  natural gas, burned in gas turbine, for compressor station   Cut-off, U	Kg CO <sub>2</sub> e	0.1283
24	Procesos remanentes	Kg CO <sub>2</sub> e	4.1428

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006)

### 7.2.2.3.6 Ecotoxicidad terrestre

A continuación, se muestran los resultados referentes a la categoría ecotoxicidad terrestre a la tecnología IRE (Fig. 7.2.2.3.6.1. y Tabla 7.2.2.3.6.1.).



**Figura 7.2.2.3.6.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría ecotoxicidad terrestre (ISO 14044, 2006)**

**Tabla 7.2.2.3.6.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría ecotoxicidad terrestre**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Energía	kg 1,4 DCB e	138.3785
2	Brake wear emissions, lorry {RoW}  treatment of   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	13.4554
3	Calor	kg 1,4 DCB e	6.505
4	Brake wear emissions, lorry {RER}  treatment of   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	5.468
5	Ammonia, liquid {RER}  ammonia production, steam reforming, liquid   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	3.4124
6	Ammonia, liquid {RER}  ammonia production, partial oxidation, liquid   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	2.6214
7	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	1.3811
8	Tyre wear emissions, lorry {RoW}  treatment of   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	0.4875
9	Clinker {CH}  production   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	0.3873
10	Zinc monosulfate {RER}  production   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	0.2321
11	Uranium tailing, non-radioactive emission {GLO}  treatment of   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	0.2018
12	Tyre wear emissions, lorry {RER}  treatment of   Cut-off, U	kg 1,4 DCB e	0.1981
13	Procesos remanentes	kg 1,4 DCB e	2.9452

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006)

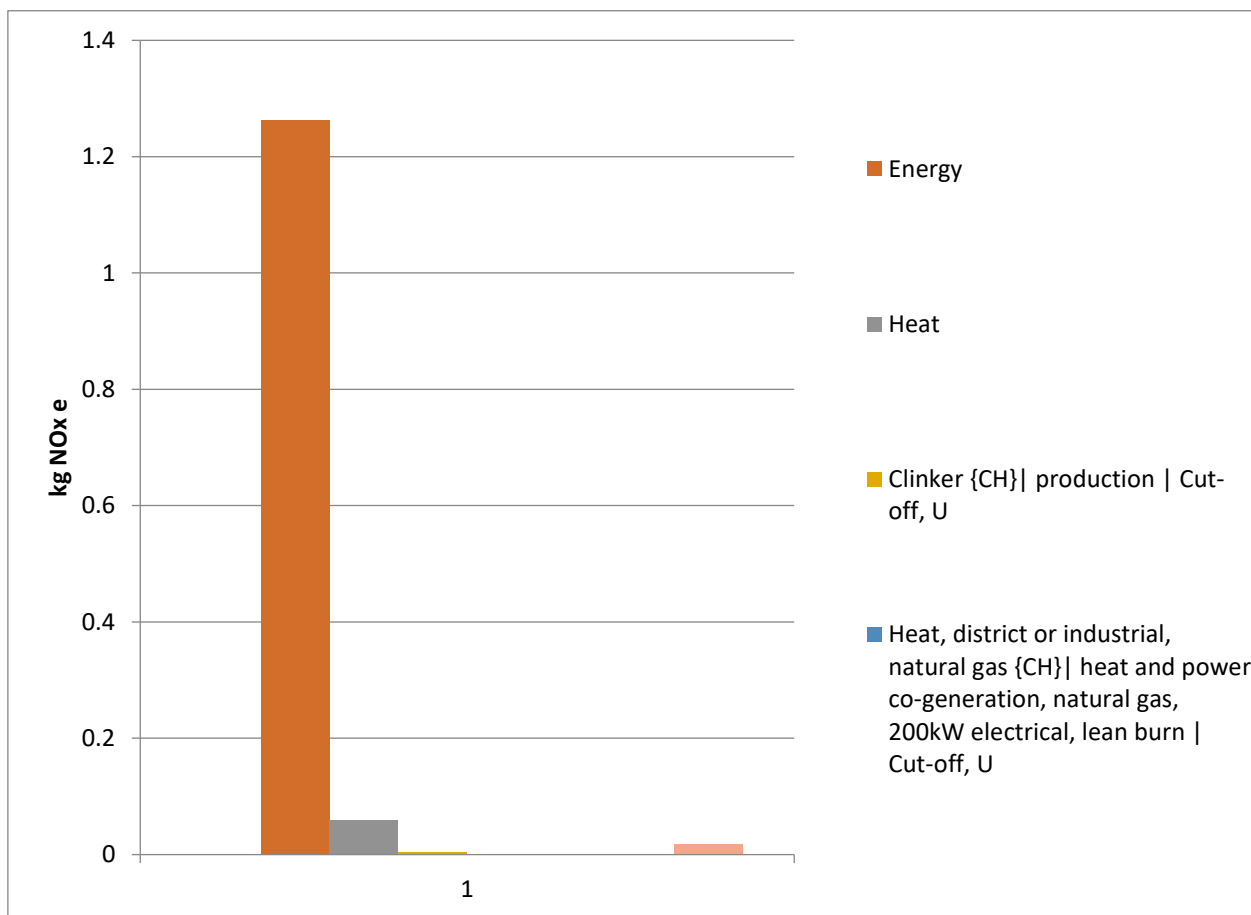
Se muestra en la tabla 7.2.2.3.6.1 y la figura 7.2.2.3.6.1 que los procesos con mayores contribuciones en la categoría de ecotoxicidad terrestre es el proceso de generación de energía con 138.4 kg 1,4 DCB e y en menor proporción el proceso de calor con 2.28 kg 1,4 DCB e.

Debido principalmente a los residuos y productos derivados del proceso de depuración de gases (sales) y a de las cenizas que son enviados a relleno sanitario.



### 7.2.2.3.7 Formación de ozono y salud humana

A continuación, se muestran los resultados de la categoría formación de ozono y salud humana a la tecnología IRE (Fig. 7.2.2.3.7.1. y Tabla 7.2.2.3.7.1.).



**Figura 7.2.2.3.7.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de ozono y salud humana (ISO 14044, 2006).**

**Tabla 7.2.2.3.7.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de ozono y salud humana**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Energy	kg NOx e	1.2634
2	Heat	kg NOx e	0.0594
3	Clinker {CH}  production   Cut-off, U	kg NOx e	0.0043
4	Heat, district or industrial, natural gas {CH}  heat and power co-generation, natural gas, 200kW electrical, lean burn   Cut-off, U	kg NOx e	0.0016
5	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RER}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3   Cut-off, U	kg NOx e	0.0015
6	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3   Cut-off, U	kg NOx e	0.0014
7	Procesos remanentes	kg NOx e	0.0187

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006)

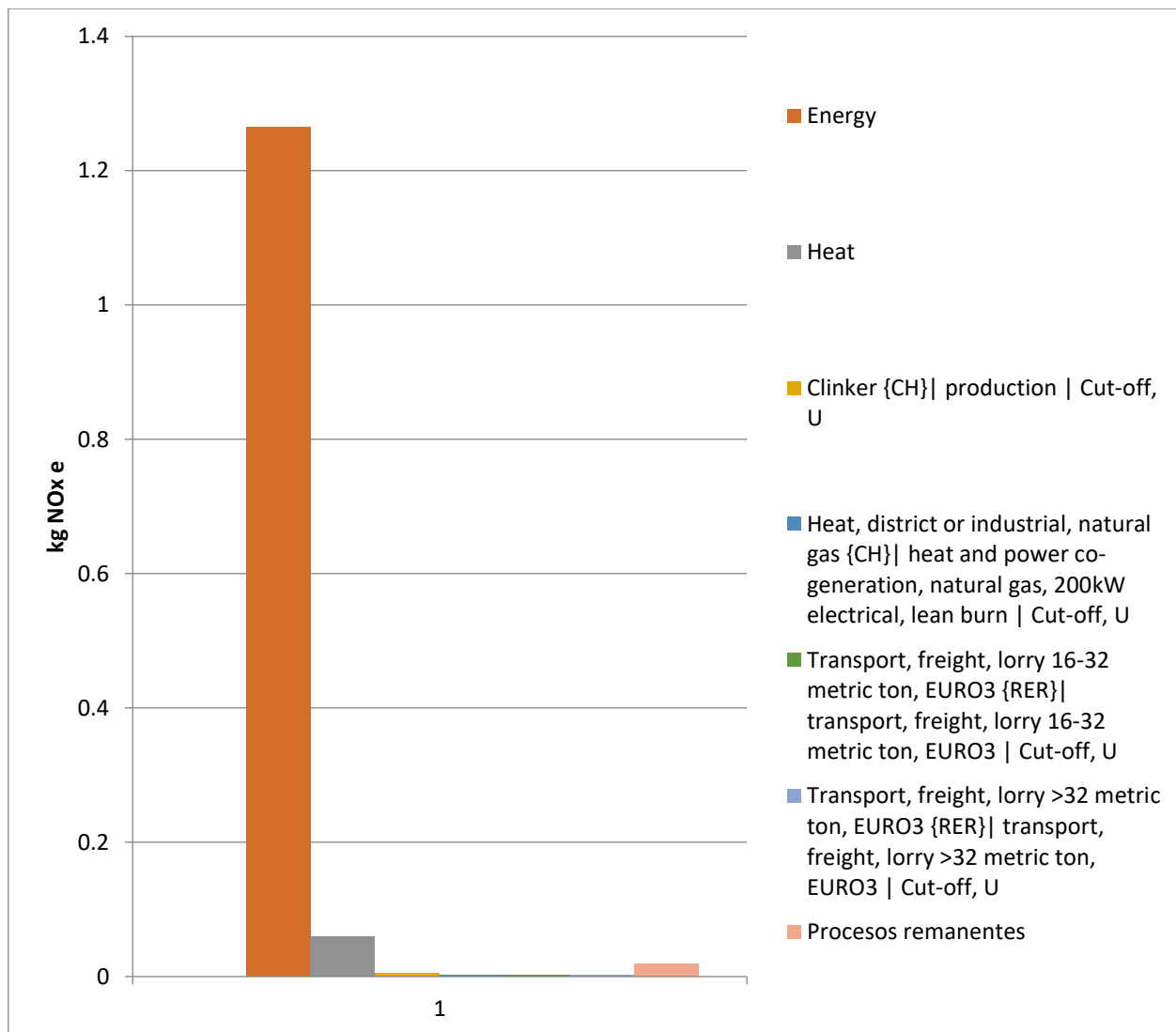
Se observa en la figura 7.2.2.3.7.1. y en la tabla 7.2.2.3.7.1. que las principales contribuciones a la tecnología de IRE es debido a la generación de energía eléctrica.

La generación de energía eléctrica contribuye con 1.26 kg NOx e, seguido por el proceso de producción de calor.

En menor contribución se observan procesos referentes a la producción de escorias, infraestructura y transporte necesario para el relleno sanitario de cenizas.

### 7.2.2.3.8 Formación de ozono en ecosistemas terrestres

A continuación, se muestran los resultados de la categoría formación de ozono en ecosistemas terrestres a la tecnología de IRE (Fig. 7.2.2.3.8.1. y Tabla 7.2.2.3.8.1.).



**Figura 7.2.2.3.8.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría formación de ozono en ecosistemas terrestres (ISO 14044, 2006).**

**Tabla 7.2.2.3.8.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría formación de ozono en ecosistemas terrestres**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Energy	kg NOx e	1.264 8
2	Heat	kg NOx e	0.059 5
3	Clinker {CH}  production   Cut-off, U	kg NOx e	0.004 4
4	Heat, district or industrial, natural gas {CH}  heat and power co-generation, natural gas, 200kW electrical, lean burn   Cut-off, U	kg NOx e	0.001 6
5	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RER}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3   Cut-off, U	kg NOx e	0.001 5
6	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3   Cut-off, U	kg NOx e	0.001 4
7	Procesos remanentes	kg NOx e	0.019 1

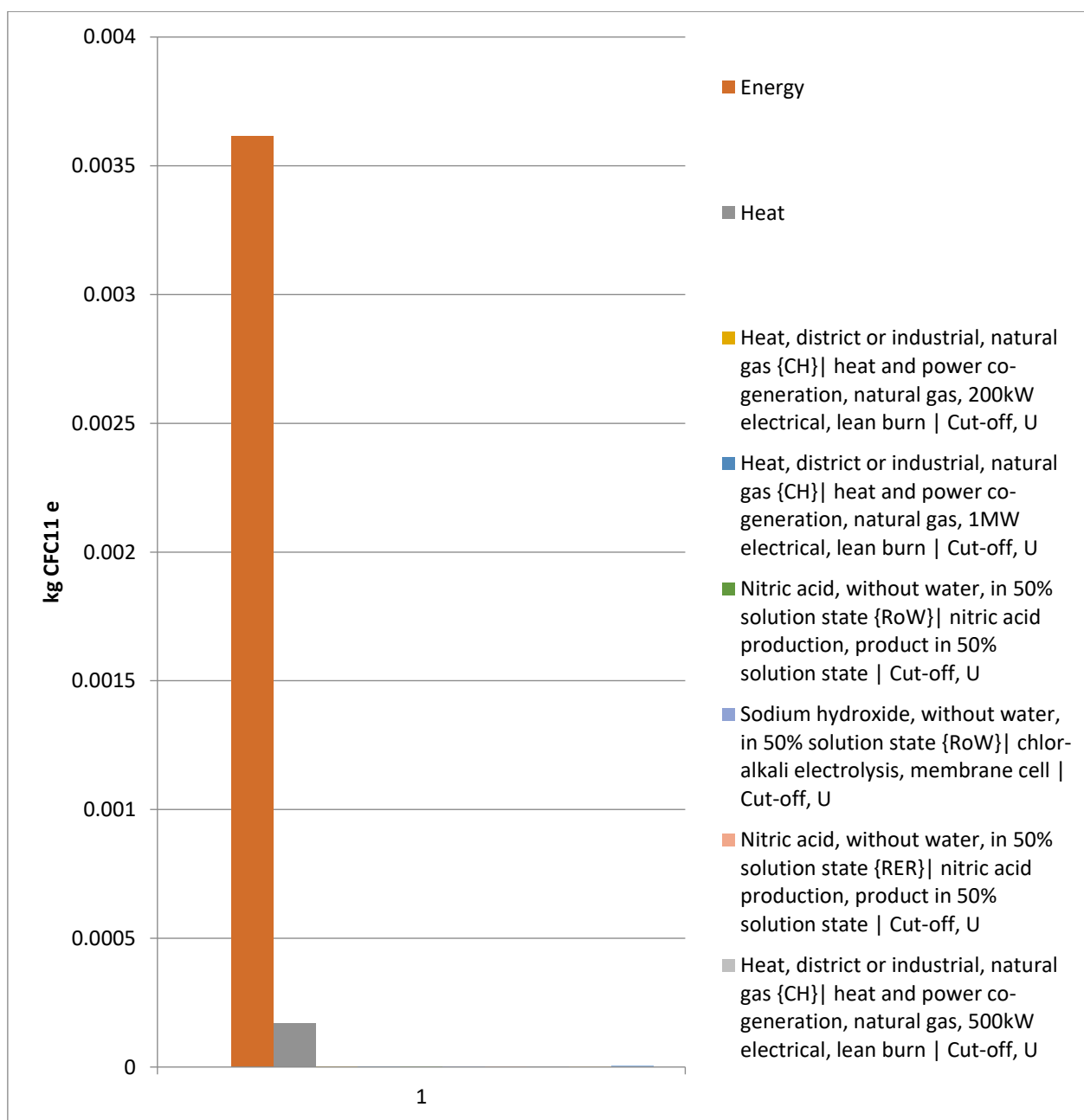
Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006)

Se observa en la figura 7.2.2.3.8.1. y en la tabla 7.2.2.3.8.1. que el proceso con mayor contribución a la categoría de formación de ozono en ecosistemas terrestres es debido a la generación de energía.

La generación de energía contribuye con 1.26 kg NOx e /ton de FORSU incinerada, mientras que las contribuciones del resto de los procesos son mínimos. En este ámbito las emisiones de CO son responsables de la formación de ozono fotoquímico, lo cual puede ser debido a la combustión incompleta de los RSO.

### 7.2.2.3.9 Deterioro de ozono en la estratósfera

A continuación, se muestran los resultados referentes a la categoría de deterioro de ozono en la estratósfera a la tecnología de IRE (fig. 7.2.2.3.9.1. y tabla 7.2.2.3.9.1.).



**Figura 7.2.2.3.9.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría sobre deterioro de ozono en la estratósfera (ISO 14044, 2006).**

**Tabla 7.2.2.3.9.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría sobre deterioro de ozono en la estratósfera**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Energy	kg CFC11 e	0.0036
2	Heat	kg CFC11 e	0.0002
3	Heat, district or industrial, natural gas {CH}  heat and power co-generation, natural gas, 200kW electrical, lean burn   Cut-off, U	kg CFC11 e	1.22E-06
4	Heat, district or industrial, natural gas {CH}  heat and power co-generation, natural gas, 1MW electrical, lean burn   Cut-off, U	kg CFC11 e	9.78E-07
5	Nitric acid, without water, in 50% solution state {RoW}  nitric acid production, product in 50% solution state   Cut-off, U	kg CFC11 e	8.87E-07
6	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RoW}  chlor-alkali electrolysis, membrane cell   Cut-off, U	kg CFC11 e	8.73E-07
7	Nitric acid, without water, in 50% solution state {RER}  nitric acid production, product in 50% solution state   Cut-off, U	kg CFC11 e	6.95E-07
8	Heat, district or industrial, natural gas {CH}  heat and power co-generation, natural gas, 500kW electrical, lean burn   Cut-off, U	kg CFC11 e	6.44E-07
9	Transport, pipeline, long distance, natural gas {RU}  processing   Cut-off, U	kg CFC11 e	3.9E-07
10	Procesos remanentes	kg CFC11 e	3.78E-06

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006)

Se observa en la figura 7.2.2.3.9.1. y en la tabla 7.2.2.3.9.1. que el proceso con mayor contribución a esta categoría es debido a la generación de energía con 0.0036 kg CFC11 e seguido por el proceso de producción de calor con 0.002 kg CFC11 e.

La generación de energía como ya se ha mencionado previamente, está relacionada con el proceso de combustión y la emisión de gases de este proceso.

El deterioro de ozono en la estratósfera se ve afectada principalmente por emisiones tales como NO<sub>x</sub>, Br, clorofluorocarbonos (CFCs) y otros compuestos orgánicos volátiles no metano (Koppmann R., 2007).

### 7.2.3 Interpretación

De acuerdo con lo mostrado en la tabla 7.2.2.2.1. las categorías de impacto ambiental de la tecnología de IRE con mayores efectos normalizados fueron ecotoxicidad marina, ecotoxicidad al agua dulce, toxicidad humana cancerígena y toxicidad humana no cancerígena. El resumen de las emisiones derivadas de los impactos ambientales pueden ser revisados en la tabla 7.2.3.1.

La categoría de ecotoxicidad marina muestra el mayor impacto normalizado 94 persona\*año (tabla 7.2.2.2.1.). En la tabla 7.2.3.1. se observa que la principal

contribución de proceso corresponde a la generación de energía eléctrica, el cual a su vez está relacionado con el proceso de combustión de residuos. En esta categoría el TGC impacta directamente a las categorías de ecotoxicidad (Lou *et al.*, 2015) y contribuye con 65.37 kg 1,4-DCB e (Tabla 7.2.3.1.).

Hauschild *et al.* (2018) reporta que las principales emisiones hídricas (tabla 7.2.1.6.1.) que contribuyen en esta categoría son las de metales pesados tales como el Cr, Ni, Zn, y Co. Consultando el ICV de IRE tabla 7.2.1.6.1 se tiene emisiones al agua de 4.77E-3, 0.0433, 0.212 y 0.0355 kg para Cr, Ni, Zn y Co, respectivamente. En menor proporción se encuentran los residuos de sales producto de los reactivos y productos involucrados en la limpieza de gases de combustión que se realiza en equipo descontaminante de gases tales como ciclones, precipitadores, filtros, etc. (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Ahora bien, dado que los impactos normalizados observados son muy elevados en esta categoría, es recomendable realizar mejoras en el proceso de combustión que ayuden a reducir las emisiones a cuerpo de agua Cr, Co, Ni y Zn.

Es importante mencionar brevemente el funcionamiento de los sistemas de limpieza de gases “húmedo” y “seco”, debido a la importancia en el impacto ambiental de este análisis.

El sistema de LHG consta de dos etapas. Primero por medio de la neutralización (cal lechada) permite eliminar los gases ácidos y SO<sub>2</sub>. Para la precipitación de metales como hidróxidos o sulfuros metálicos son usados agentes de floculación tales como: trimercapto-s-triazina, sulfuros, polielectrolitos. Finalmente, los sedimentos son eliminados por medio de decantación o sedimentación (Neuwahl *et al.*, 2019).

El proceso de limpieza de gases en seco requiere de un agente de absorción (normalmente bicarbonato de sodio) el cual es introducido en el reactor en forma de polvo seco. Los productos de reacción generados son sólidos y deben eliminarse de los gases de combustión como polvo en una etapa posterior, normalmente mediante el uso de un filtro de mangas Neuwahl *et al.*, 2019).

El sistema de tratamiento de gases en seco ha demostrado que puede tener un menor impacto ambiental (Dong *et al.*, 2020).

Tabla 7.2.3.1 Contribuciones por proceso de la tecnología de IRE

Categoría de impacto	Unidades	Total	Proceso de mayor contribución	Total proceso	Contribución de proceso (%)	Entrada/ salida de mayor contribución	%
Cambió climático	Kg CO2 e	119.58	Generación de energía	98.04	81.99	Clinker {CH}  production   Cut-off, U	3.4
Deterioro de la capa de ozono	Kg CFC-11 e	0.0038	Generación de energía	0.004	94.74	Energía eléctrica	100.0
Radiación ionizante	kBq Co-60 e	0.87	Tailing, from uranium milling {GLO}  treatment of   Cut-off, U	0.779	89.58	Tailing, from uranium milling {GLO}  treatment of   Cut-off, U	100.0
Formación de ozono: calidad de ecosistemas	kg NOX e	1.35	Generación de energía	1.26	93.69	Energía eléctrica	99.6
Formación fotoquímica de oxidante: salud humana	kg NOX e	1.35	Generación de energía	1.26	93.59	Energía eléctrica	100.0
Ecotoxicidad agua marina	kg 1,4-DCB e	68.74	Generación de energía	65.38	95.11	Energía eléctrica	100.0
Toxicidad humana: cáncer	kg 1,4-DCB e	27.17	Generación de energía	24.86	91.49	Energía eléctrica	100.0
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB e	175.67	Generación de energía	138.38	78.77	Energía eléctrica	100.0
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB e	51.19	Generación de energía	48.70	95.14	Energía eléctrica	100.0
Escasez de recursos minerales	kg Cu e	0.033	Clay {RoW}  clay pit operation   Cut-off, U	0.009	25.96	Clay {RoW}  clay pit operation   Cut-off, U	100.0
Acidificación terrestre	kg SO2 e	0.591	Generación de energía	0.532	90.03	Energía eléctrica	100.0
Escasez de recursos fósiles	kg de petróleo bruto e	3.84	Natural gas, high pressure {NO}  petroleum and gas production, off-shore   Cut-off, U	0.545	14.19	Natural gas, high pressure {NO}  petroleum and gas production, off-shore   Cut-off, U	100.0
Eutroficación del agua dulce	kg P e	0.2	Generación de energía	0.188	93.87	Energía eléctrica	100.0
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB e	1288	Generación de energía	1226.6	95.24	Energía eléctrica	100.0
Uso de tierra	m2x1yr crop e	0.089	Wood chips, wet, measured as dry mass {SE}  hardwood forestry, birch, sustainable forest management   Cut-off, U	0.011	12.51	Wood chips, wet, measured as dry mass {SE}  hardwood forestry, birch, sustainable forest management   Cut-off, U	99.7
Eutroficación marina	kg N e	0.076	Generación de energía	0.072	94.74	Energía eléctrica	100.0
Partículas finas	kg de partículas 2.5 µm	0.214	Generación de energía	0.191	89.49	Energía eléctrica	100.0

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006)



Por lo cual es recomendable realizar un ACV de la tecnología de IRE con un sistema de tratamiento de gases en seco y compararlo con el ACV de IRE con LHG (actual, descrito en la sección 6.3.3.4) y determinar la tecnología de menor impacto ambiental.

Respecto a la categoría ecotoxicidad al agua dulce se observa que la principal contribución de proceso corresponde a la generación de energía eléctrica con 48.7 kg 1,4 DCB e (tabla 7.2.3.1.). Este proceso nuevamente está relacionado con la combustión de residuos y el principal producto es la generación de energía eléctrica.

Hauschild et al. (2018) reportaron que las principales emisiones hídricas que contribuyen en esta categoría son las de metales pesados tales como el As, Cu, Zn, seguidas en menor proporción por emisiones de Ni y Br. La consulta de ICV de IRE tabla 7.2.1.6.1 arroja emisiones al agua de 2.93E-3, 0.137, 0.212, 0.0433, y 0.0426 kg para As, Cu, Zn, Ni, y Br, respectivamente.

En menor contribución a esta categoría se encuentran procesos de tratamiento de residuos como cenizas finas y pulvulentas (Tchobanoglous & Kreith, 2002). También productos de reacción formados como consecuencia de los compuestos empleados en equipos de TGC, como lixiviados los cuales son formados a partir de la gran cantidad de sales disueltas que contienen los productos de la limpieza de gases ácidos

El sistema de limpieza de gases “en seco” es crucial en el impacto ambiental y según Dong et al. (2020) han demostrado tener un menor impacto ambiental. Por lo cual es recomendable se implementen mejoras en el proceso de TGC que minimicen los residuos (cenizas y lixiviados) y emisiones al agua, y verificar si esas mejoras conducen a un efectivo menor impacto ambiental realizando los ACVs correspondientes.

La categoría de toxicidad humana cancerígena (tabla 7.2.3.1.) muestra una vez más que la principal contribución de proceso corresponde a la generación de energía eléctrica como producto principal. La cuantía absoluta del impacto es 24.86 kg 1,4 DCB e (kg de equivalente de 1,4-diclorobenceno) provenientes de las emisiones de la combustión incompleta de los residuos (tabla 7.2.2.3.1.1.).

La principal preocupación en esta categoría son las emisiones de dioxinas, como las dibenzopdioxinas policloradas, los dibenzofuranos policlorados y los bifenilos policlorados las cuales son altamente cancerígenas (Kumar, 2017). Aunado a esto

también son generadas emisiones de Cr (VI), el cual es considerado el principal impulsor de toxicidad cancerígena (Hauschild *et al.*, 2018).

Las emisiones al agua y al aire de mayor impacto a la categoría toxicidad humana cancerígena encontradas en la IRE fueron las siguientes (tabla 7.2.1.6.1.): dioxinas  $6.18E-10$  kg, Cr  $4.83E-3$  kg y As  $3.05E-3$  kg. Aunadas a estas la emisión de cloruro de hidrógeno al aire  $1.85E-2$  kg también es de preocupación para esta categoría (Cole-Hunter *et al.*, 2020).

La recomendación de mejora es similar a la discutida en el impacto anterior.

Respecto a la toxicidad humana no cancerígena, muestra nuevamente que la principal contribución de proceso corresponde a la generación de energía eléctrica y se observa que el producto de mayor contribución a procesos es la energía con 1226 kg 1,4-DCB e (tabla 7.2.3.1.).

Se identificaron en la tabla 7.2.1.6.1. las emisiones más importantes señaladas por Maresca *et al.* (2022) para esta categoría y provinieron principalmente del TGC. Así, de nuestro ICV se tuvo  $2.93E-3$ , 0.137, 0.212 kg para As, Cu, y Zn, respectivamente. En menor medida hubo contribuciones de la generación de calor y procesos referentes al tratamiento de residuos del proceso de combustión (relleno sanitario).

También emisiones como el Hg  $1.45E-4$  kg y Pb 0.106 kg (tabla 7.2.1.6.1.) son consideradas como tóxicas para el humano (Cole-Hunter *et al.*, 2020).

La categoría de calentamiento global no muestra un impacto normalizado elevado. A pesar de ello se decidió analizarla con cierto detalle debido a la importancia social que ha despertado y los riesgos ambientales, geográficos y sociales que pueden derivar de ese impacto en el futuro cercano y mediato (IPCC 2022).

Se observa en la tabla 7.2.3.1 que el proceso que más contribuye al calentamiento global es la generación de energía eléctrica, las principales emisiones emanadas de este proceso son CO<sub>2</sub> 1190 y CO 0.667 kg (Lou *et al.*, 2015). Aunado a lo anterior en la tabla 7.2.1.6.1, se observan emisiones de GEI como son metano  $5.80E-3$  kg, óxidos de dinitrógeno 1.855 kg y 0.483 kg de monóxido de dinitrógeno.

En menor proporción contribuyen al calentamiento global los procesos de calor emitido a la biósfera (calor residual 2614 MJ) que comprende calor asociado a escorias 33 kg, cenizas finas 3.2 kg, calor debido al uso de gas natural 186 MJ como fuente

auxiliar, una pieza de instalación de incineración de residuos municipales correspondiente a  $4.64E-7$  p (pieza) y el óxido de calcio (cal) usado en la limpieza de los gases de combustión (producto del calor emitido debido a la reacción de la cal con el agua).

En la categoría de impacto calentamiento global también son generadas emisiones al aire de: partículas finas  $0.046$  kg, HCl  $1.85E-2$  kg,  $SO_x$   $1.03E-1$  kg,  $NO_x$   $1.85$  kg,  $NH_3$   $5.86E-3$  (Tabla 7.2.1.6.1.).

Con respecto al consumo de agua la IRE se ve favorecida como se observa en la tabla 7.2.2.1.1. donde el impacto ambiental tiene un impacto negativo  $-0.584$  m<sup>3</sup>.

En este sentido la recuperación de energía permite reducir el gasto de agua, porque según Grieco & Poggio (2009) la relativamente baja de temperatura de los gases de combustión a la entrada del sistema de limpieza de gases ahorra enfriamiento, lo cual se ve reflejado en la eficiencia del proceso de manera positiva.

Es importante mencionar que el proceso de TGC, en general, reduce de manera significativa las categorías de impactos asociados a partículas finas (hasta un 88 %), el impacto de ozono fotoquímico (76-90 %) y la acidificación terrestre (83-90%). Sin embargo, también genera otras 14 categorías de impacto que no hubieran sido originadas si los gases de combustión no tuvieran tratamiento alguno (Dong et al., 2020). En particular, hay que considerar la influencia de las reportadas ventajas de sistemas de tratamiento en seco de gases de combustión sobre los sistemas de tratamiento en húmedo. Por lo tanto, los cambios que se introduzcan para mejorar la sostenibilidad ambiental de IRE deben verificarse con la realización de nuevos ACVs.

Cole-Hunter et al. (2020) expresan que la implementación de IRE debe incluir monitoreo continuo del proceso para demostrar que se maximiza los beneficios y se minimiza los impactos ambientales y riesgos para la salud.

Finalmente, en la tabla 7.2.3.1. se observa que el producto de mayor contribución a la IRE es la generación de energía eléctrica, ya que predomina en primer lugar en la mayoría de los 18 impactos ambientales. A su vez, es contribución a está asociada a la combustión de los residuos y TGC. Por otro lado, en la amplia mayoría de los impactos ambientales la segunda contribución es la producción de calor. Ambos productos definen un incinerador de cogeneración, es decir, un incinerador de residuos que produce tanto

energía eléctrica útil como cargas térmicas de interés industrial o habitacional. La viabilidad o utilidad de las cargas térmica, puede depender de la estacionalidad. En caso de que no se pueda aprovechar las cargas térmicas en primavera-verano, entonces esas cargas térmicas ya no contarían como calor producido sino como calor residual emitido a la biósfera.

Respecto a consumo de energía, el principal recurso utilizado es el gas natural, del cual se requieren 186.3 MJ y es usado principalmente en los sistemas de TGC. La energía eléctrica generada fue de 129.3 Kwh y 5 893 MJ de calor por tonelada de FORSU. Lo cual es bajo de acuerdo con lo reportado por Lou *et al.*, 2015, quien obtuvo 210 kWh / ton de residuos.

Sin embargo, cabe recordar que la generación de energía está condicionada a la composición de los residuos y las condiciones de operación de la planta. También está relacionado con el sistema de control y TGC, así como el tratamiento de lixiviados y la energía consumida en los procesos (Dong *et al.*,2020).

En la tabla 7.2.3.1. se observan las principales emisiones de IRE, de acuerdo con la categoría ambiental con mayor PIAN.

**Tabla 7.2.3.1. Resumen de principales emisiones de IRE**

Emisiones Categoría de impacto	Cr (kg)	Ni (kg)	Zn (kg)	As (kg)	Cu (kg)	Otros (kg)
Ecotoxicidad al agua marina	4.77E-3	0.0433	0.212			Co 0.0355
Ecotoxicidad al agua dulce		0.0433	0.212	2.93E-3	0.137	Br: 0.0426
Toxicidad humana cancerígena	4.83E-3			3.05E-3		Dioxinas: 6.18E-10
Toxicidad humana no cancerígena			0.212	2.93E-3	0.137	Hg: 1.45E-4 Pb:0.106

Referencias: Elaboración propia, (Hauschild et al. 201; Cole-Hunter et al., 2020; Kumar, 2017)

### 7.3 Actividad 3. Análisis de Ciclo de Vida comparativo de dos tecnologías de procesamiento de RSO, biorrefinería HMZSNN e incineración con recuperación de energía.

#### 7.3.1 Análisis de inventario de ciclo de vida

Se realizó el ACV comparativo de dos tecnologías de procesamiento de FORSU en México, IRE (presentado en la actividad 2) y BRF H-M-Z-S-NN.

En esta sección se muestra el diagrama de la BRF H-M-Z-S-NN (Figura 7.3.1.1) previamente descrito en la tabla 6.4.3.6.1.

Más adelante se muestra el análisis de inventario y el balance de energía eléctrica y calor de la BRF H-M-Z-S-NN en las tablas 7.3.1.1. y 7.3.1.2. respectivamente.

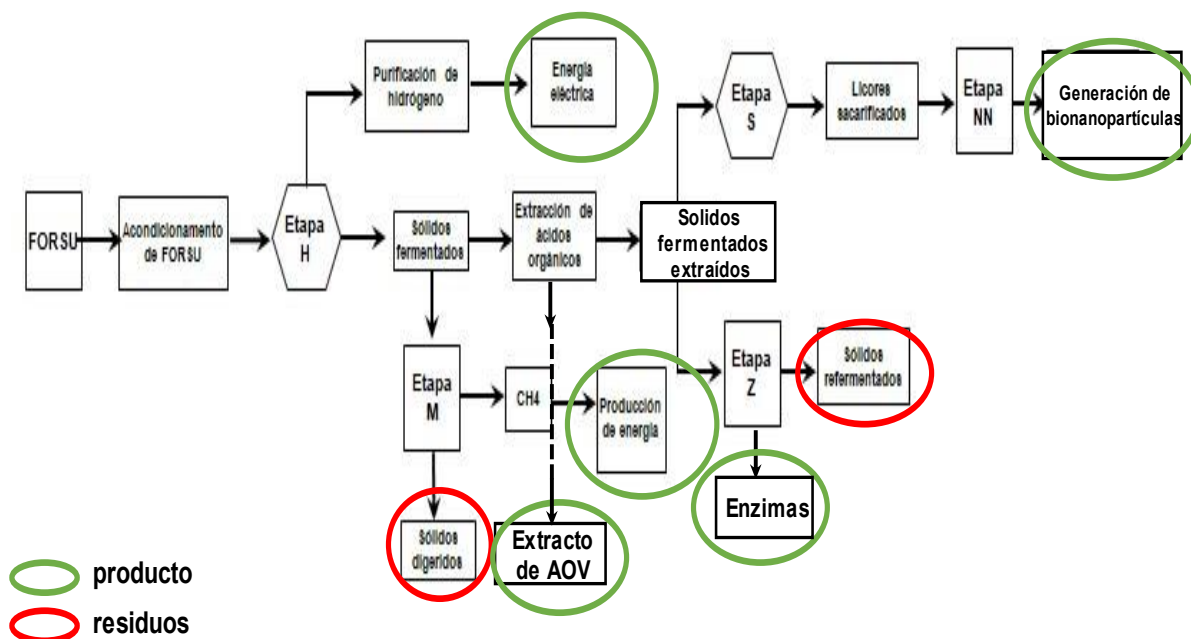


Figura 7.3.1.1. Diagrama biorrefinería H-M-Z-S-NN (Poggi-Varaldo, 2019)

Tabla 7.3.1.1. ICV de biorrefinería H-M-Z-S-NN (1/6) (modificado de Poggi-Varaldo, 2019)

<b>FORSU</b>					
	1000	kg			
Entrada	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Desechos de papel	400	kg	-	-	De acuerdo con Escamilla-Alvarado et al. (2017)
Desechos orgánicos	600	kg	-	-	
<b>ETAPA</b>					
<b>Acondicionamiento de FORSU</b>					
	3250	kg			
Entrada	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
FORSU	1000	kg		Creado	
Agua residual	2123.47	kg	Tap water {RoW}  tap water production, conventional treatment   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Esta se deberá colocar en salidas conocidas a la tecnosfera. Productos evitados, ya que al usar agua residual se evita el uso de tap water.
P2O5	55.5	kg	Phosphate ore	-	Contenido en P2O5, posiblemente la cantidadde mineral/sal sea el triple, dependiendo de laespecie química fosfatada y de las impurezas.
NaHCO3	71.03	kg	Sodium bicarbonate {RoW}  soda production, solvay process   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Electricidad	4.44	kWh	Electricity, high voltage {MX}  production mix   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Esta electricidad es la que se requiere para hacer el mezclado
Planta de mezclado	0.65	kg	Industrial machine, heavy, unspecified {GLO}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Esta se ajustó a la marcada para el proceso Plaster Mixing {RoW}processing/Cut-off,U
<b>ETAPA H</b>					
<b>Producción de sólidos (FW)</b>	3161.14	kg	Fermented waste. Esta corriente tendrá un split y 40% entra a etapa M, mientras que 60% entra a extracción de AOV y SOLV.		
<b>Producción de biogás H</b>	88.86	kg	Biogás con H2. Esta corriente entrará tal cual a etapa de purificación BG-H. La asignación debería ser 30%, pero tal vez la asignación por precio suba el valor de asignación pues el H2 es más costoso que una corriente de semisólidos fermentados.		
Entrada	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Electricidad	4.42	kWh	Electricity, high voltage {MX}  production mix   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Es energía debida al mezclado y bombeo. Tomado de acondicionamiento pero debe serrevisado.
Calor	420.5	MJ	Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Supone 60% de recuperación del calor sensible y se usa para precalentar la alimentación al reactor H.
Planta de digestión anaerobia	2.71E-06	p	Anaerobic digestion plant, for biowaste {GLO}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Tiempo de operación de maquina	0.5722	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Salida	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Carbon dioxide, biogenic	0.59	kg	Carbon dioxide, biogenic	-	
Dinitrogen monoxide	0.0544	kg	Dinitrogen monoxide	-	
Hydrogen sulfide	0.1456	kg	Hydrogen sulfide	-	
Hydrogen	1.08E-04	kg	Hydrogen	-	
Ammonium, ion	1.51E-04	kg	Ammonium, ion	-	
Nitrate	4.83E-03	kg	Nitrate	-	
Nitrite	1.51E-04	kg	Nitrite	-	
Nitrogen, organic bound	1.09E-07	kg	Nitrogen, organic bound	-	
Phosphorus	1.14E-04	kg	Phosphorus	-	
Agua residuales	2.00E-02	m <sup>3</sup>	Wastewater, average {RoW}  market for wastewater, average   Cut-off, U	Ecoinvent 3	

**Tabla 7.3.1.1. ICV de biorrefinería H-M-Z-S-NN (2/6) (modificado de Poggi-Varaldo, 2019)**

<b>Purificación biogás H (Hidrógeno 99%) 1.71 kg</b>					
Se tomaron algunos datos de una planta para purificar metano al 96% Methane, 96% by volume (RoW) biogas purification to methane 96 vol-%   Cut-U*					
Entrada	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Planta para purificar	1.85E-08	p	Chemical factory, organics (GLO) market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Se cálculo con base en la cantidad de biogás que entra y de acuerdo con el modelo de purificación de metano.
Electricidad	22.93	kWh	Electricity, high voltage (MX) production mix   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Corriente alterna, alto voltaje, condiciones de México. Reuerido para la purificación con el método de adsorción por cambios alternos de presión.
Salida	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Dióxido de carbono	78.36	kg	Dioxide carbon	-	Puede ser CO2 biogenico por que viene de biomasa.
Acido sulfídrico	0.95	kg	Hydrogen sulfide	-	
<b>Producción de electricidad (PEM)</b>					
40.25 kWh Electricity, low voltaje					
Entrada	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Celda combustible	2.33	p	Fuel cell, polymer electrolyte membrane, 2kW electrical, future (RoW) production   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Se cálculo con base en una PEM de ecoinvent ajustada a nuestro proceso
Mantenimeinto de la membrana	3.26E-03	p	Maintenance, polymer electrolyte membrane fuel cell, 2kW electrical (RoW) maintenance, polymer electrolyte membrane fuel 2cell 2kW electrical   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Idem
Almacenamiento de la planta	1.64E-04	p	Storage, 650 l mini CHP plant (RoW) production   Cut-off, U		
Salida	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Monóxido de carbono	4.79E-04	kg	Carbon monoxide, biogenic	-	
Hidrógeno	1.12E-03	kg	Hydrogen	-	
Oxidos de nitrógeno	3.65E-04	kg	Nitrogen oxides	-	
NMVOG	8.41E-05	kg	NMVOG, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	-	
Partículas	5.59E-08	kg	Particulates, < 2.5 um	-	
<b>ETAPA M</b>					
<b>Producción de biogás M 133.74 kg</b>					
Esta corriente entrara tal cual a etapa purificación BG-M y producción de energía eléctrica. La asignación por masa deberá ser 3%.					
Entrada	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Electricidad	8.84	kWh	Electricity, high voltage (MX) production mix   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Es energia debida al mezclado y bombeo .Tomado de acondicionamiento
Calor	70.42	MJ	Heat, district or industrial, natural gas (RoW) heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Supone 60% de recuperación del calor sensible y se usa para precalentar laalimentación al reactor H. Además, incluye calor perdido al ambiente en reactor e instalaciones auxiliares.
Planta de digestión anaerobia	9.50E-07	p	Anaerobic digestion plant, for biowaste (GLO) market for   Cut-off, U	Ecoinvent	
Tiempo de operación de maquina	0.2	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor (GLO) machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Salida	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Sólidos digeridos (DW)	200	kg	Municipal solid waste (RoW) treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Esta corriente puede enviarse a planta de composta externa y compartir impactos
Agua residual (licor)	932.7	kg	Waste water treatment, domestic waste water according to the Directive 91/271/EEC concerning urban waste wat		Esta corriente puede enviarse a acondicionamiento
Dinitrogen monoxide	0.0191	kg	Dinitrogen monoxide	-	
Hydrogen sulfide	0.051	kg	Hydrogen sulfide	-	
Metano biogenico	5.75E-01	kg	Methane, biogenic	-	
Ammonium, ion	5.28E-05	kg	Ammonium, ion	-	
Nitrate	1.69E-03	kg	Nitrate	-	
Nitrite	5.28E-5	kg	Nitrite	-	
Nitrogen, organic	6.20E-05	kg	Nitrogen, organic bound	-	
Phosphorus	4.01E-05	kg	Phosphorus	-	
Agua residual	7.00E-03	m <sup>3</sup>	Wastewater, average (RoW) market for wastewater, average   Cut-off, U	Ecoinvent 3	

**Tabla 7.3.1.1. ICV de biorrefinería H-M-Z-S-NN (3/6) (modificado de Poggi-Varaldo, 2019)**

Purificación biogás M (Metano 96%) 49.86 kg					
Se tomaron algunos datos de una planta para purificar metano al 96%. Methane, 96% by volume (RoW)   biogas purification to methane 96 vol-%   Cut-off, U.					
Entrada	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Planta para purificar	3.22E-10	p	Chemical factory, organics (GLO)   market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Se calculó de acuerdo con la cantidad que entra a purificación tomando como modelo el proxi Ecoinvent
Electricidad	36.58	kWh	Electricity, high voltage (MX)   production mix   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Corriente alterna, alto voltaje, condiciones de México.
Salida	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Dióxido de carbono	69.51	kg	Dioxide carbon	-	Puede ser CO2 biogenico por que viene de biomasa.
Ácido sulfídrico	0.74	kg	Hydrogen sulfide	-	
Producción de electricidad CCCPP			407.31 kWh		
Producción de calor CCCPP			681.51 MJ		
Entrada	Cantidad	Unidad		Base de datos	
Agua de enfriamiento	24.69	m <sup>3</sup>	Water, cooling, unspecified natural origin, RoW	-	
Planta de ciclo combinado	7.74E-04	p	Gas power plant, combined cycle, 400MW electrical (GLO)   market for   Cut-off, U	Ecoinvent	
Agua blanda	23.23	kg	Water, completely softened, from decarbonised water, at user (GLO)   market for   Cut-off, U	Ecoinvent	
Agua descarbonizada	773.76	kg	Water, decarbonised, at user (GLO)   market for   Cut-off, U	Ecoinvent	
Salida	Cantidad	Unidad		Base de datos	
Acenaphthene	3.07E-09	kg	Acenaphthene	-	
Acetaldehyde	3.10E-06	kg	Acetaldehyde	-	
Acetic acid	4.69E-04	kg	Acetic acid	-	
Arsenic	1.60E-07	kg	Arsenic	-	
Benzene	3.49E-06	kg	Benzene	-	
Benzo(a)pyrene	1.92E-10	kg	Benzo(a)pyrene	-	
Beryllium	9.56E-09	kg	Beryllium	-	
Butane	3.58E-03	kg	Butane	-	
Cadmium	8.74E-07	kg	Cadmium	-	
Carbon dioxide, biogenic	206.77	kg	Carbon dioxide, biogenic	-	
Carbon monoxide, biogenic	8.52E-03	kg	Carbon monoxide, biogenic	-	
Chromium	1.11E-06	kg	Chromium	-	
Chromium	6.66E-08	kg	Chromium	-	
Dinitrogen monoxide	3.79E-03	kg	Dinitrogen monoxide	-	
Ethane	9.66E-03	kg	Ethane	-	
Formaldehyde	1.25E-04	kg	Formaldehyde	-	
Hexane	3.07E-03	kg	Hexane	-	
Lead	3.98E-07	kg	Lead	-	
Manganese	3.03E-07	kg	Manganese	-	
Mercury	2.66E-08	kg	Mercury	-	
Methane, biogenic	3.76E-03	kg	Methane, biogenic	-	
Nickel	1.67E-06	kg	Nickel	-	
Nitrogen oxides	0.09874	kg	Nitrogen oxides	-	
Polycyclic aromatic hydrocarbons	3.10E-05	kg	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	-	
Particulates, < 2.5 um	1.90E-03	kg	Particulates, < 2.5 um	-	
Pentane	4.46E-03	kg	Pentane	-	
Propane	2.73E-03	kg	Propane	-	
Propionic acid	5.65E-06	kg	Propionic acid	-	
Selenium	1.90E-08	kg	Selenium	-	
Sulfur dioxide	2.21E-03	kg	Sulfur dioxide	-	
Toluene	5.82E-06	kg	Toluene	-	
Water/m3	0.407	m <sup>3</sup>	Water/m3	-	
Water, RoW	25.01	m <sup>3</sup>	Water, RoW	-	
Residuos (torre de enfriamiento)	3.90E-03	kg	Residue from cooling tower (RoW)   market for residue from cooling tower   Cut-off, U	Ecoinvent 3	



Tabla 7.3.1.1. ICV de biorrefinería H-M-Z-S-NN (4/6) (modificado de Poggi-Varaldo, 2019)

<b>ETAPA Extracción de AOV y SOL</b>					
<b>AOV y SOLV Sólidos fermentados extraídos (eFW)</b>					
38.04 kg	Se asigna el 90 % por el valor económico				
1858.82 kg	Extracted Fermented Waste se distribuirán en la etapa Z (2/3) y la etapa S (1/3) de la BRF (10%)				
Entrada	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Solvente para la extracción	1.164	kg	4-methyl-2-pentanone {RoW}  production   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Solvente para la extracción
Electricidad	0.56	kWh	Electricity, high voltage {MX}  production mix   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Calor	97.56	MJ	Heat, central or small-scale, natural gas {RoW}  heat production, natural gas, at boiler modulating <100kW   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Salida	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Solvente que se evapora	1.164	kg	4-Methyl-2-pentanone	-	IK debe ser una cetona con 6 carbonos. Parece una emisión muy grande, se basó en suposición de pérdida de solvente 1% en cada reuso, Recabar información y ver si se puede bajar el porcentaje de pérdida de solvente.
<b>ETAPA Z</b>					
<b>Concentrado enzimático</b>	1087.56	kg	Asignación económica aprox. concentrados tiene gran valor agregado (90%)		Proxi para Peptona
<b>Sólidos refermentados (rFW)</b>	816.96	kg	Sólidos refermentados. Entrarán en la etapa S sacarificación. (10%)		Autoclave para esterilización
Entrada	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Urea	3.144	kg	Urea, as N {RoW}  production   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Ultrafiltración
Sulfato de amonio NH4SO4	14.671	kg	Ammonium sulfate, as N {RoW}  ammonium sulfate production   Cut-off, U	Ecoinvent 3	No hay calor sensible por que las corrientes de entrada son tibias y el reactor opera a 30 °C, es calor de pérdidas al aire durante el periodo de la fermentación en lote.
Fosfato de sodio NaPO4	20.958	kg	Sodium phosphate {RoW}  production   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Pérdidas al ambiente en esterilización.
Cloruro de calcio CaCl2	3.144	kg	Calcium chloride {RoW}  soda production, solvay process   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Calor sensible en la esterilización para calentar el medio de cultivo se supone 80% de recuperación de calor con el efluente caliente del esterilizador y esterilización continua con equipo eficiente que permite bajar un 20% adicional de calor reuerido.
Sulfato de magnesio MgSO4	3.144	kg	Magnesium sulfate {RoW}  production   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Peptona	10.479	kg	Protein feed, 100% crude {GLO}  skimmed milk, from cow milk to generic market for protein feed   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Tween 80	10.479	kg	Non-ionic surfactant {GLO}  non-ionic surfactant production, ethylene oxide derivate   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Se podrá descontar esta corriente si se recircula en la BRF. ¿50% de filtrados a recirculación de propio proceso Z? Otro destino de esta corriente es a PTAR, perodenderá de que la PTAR tenga menos impactos de descarga directa a cuerpos receptores acuáticos.
Agua de grifo	10412.68	kg	Tap water {RoW}  tap water production, conventional treatment   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Sulfato de hierro	0.01	kg	Iron sulfate {RoW}  production   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Sulfato de manganeso	0.001	kg	Manganese sulfate {GLO}  production   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Monosulfato de zinc	0.001	kg	Zinc monosulfate {RoW}  production   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Electricidad	0.609	kWh	Electricity, high voltage {MX}  production mix   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Electricidad	47.81	kWh	Electricity, high voltage {MX}  production mix   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Electricidad	31.97	kWh	Electricity, high voltage {MX}  production mix   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Calor	59.15	MJ	Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Calor	2.8	MJ	Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Calor	646.02	MJ	Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Salida	Cantidad	Unidad		Base de datos	
Dióxido de carbono	19.08	kg	Carbon dioxide	-	
Agua residual (licor)	9794.4	kg	Waste water	-	

Tabla 7.3.1.1. ICV de biorrefinería H-M-Z-S-NN (5/6) (modificado de Poggi-Varaldo, 2019)

ETAPA S (Sacarificación ácida)					
Hidrolizados (HL)	515.31	kg	Son los hidrolizados que entraran al proceso de producción de ácido succínico.		
Entrada	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Hidróxido de sodio (NaOH)	20.7	kg	Sodium hydroxide (50% NaOH), production mix/RER Mass	Agri-footprint	
Ácido clorhídrico (HCl)	55	kg	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state (RoW)  hydrochloric acid production, from the reaction of hy	Ecoinvent 3	
Electricidad	36.69	kWh	Electricity, high voltage (MX)  production mix   Cut-off, U		
Calor	44.63	MJ	Heat, district or industrial, natural gas (RoW)  heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW   Cut-off, U		
Salida	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Sólidos sin valor (HW)	180	kg	Municipal solid waste (RoW)  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Por ahora van a relleno sanitario.
ETAPA NN Categoría _NN-Bioparticle production					
NN-Biopartículas	39.74	kg	Las biopartículas producidas aquí se alimentarán al proceso de producción de nanobiopartículas	NA	
NN-Biogás M1	9.745	kg	Este biogás entrar a la cual a purificación biogás NN-Purificación Biogás M		
Entrada	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Carbón activado	3.78E+01	kg	Activated carbon, granular (RoW)  activated carbon production, granular from hard coal   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Planta de digestión anaerobia para residuos de origen biológico	7.242	p	Anaerobic digestion plant, for biowaste (GLO)  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	REVISAR, parece un número excesivo de piezas; 4.34E-9 p ????
Tiempo de operación de máquina pesada	0.01581056	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor (GLO)  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Electricidad	0.75	kw h	Electricity, high voltage (MX)  production mix   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Sustituida por energía eléctrica autóctona. Electricidad requerida para bombeo de alimentación y recirculación en el reactor anaerobio de lecho fluidizado
Calor	1.84	MJ	Heat, central or small-scale, natural gas (RoW)  heat production, natural gas, at boiler modulating <100kW   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Calefacción del reactor y auxiliares para compensar pérdidas de calor al ambiente
Salida producto evitado	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
Agua potable para alimentación del reactor es reemplazada por agua residual municipal	707.43	kg	Tap water (RoW)  tap water production, conventional treatment   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Se reemplazará esta corriente por recirculaciones de flujos internos de la BRF como son el fuente Z, efluente de este mismo proceso, efluente anaerobio de NN-nanobiopartículas production
Salida	Cantidad	Unidad		Base de datos	Observaciones
CO2 biogénico	0.02	kg	Carbon dioxide, biogenic	-	Fugas de biogás M
Dinitrogen monoxide N2O	1.48E-03	kg	Dinitrogen monoxide	-	Fugas de biogás M
Sulfuro de hidrógeno ó ácido sulfhídrico	0.004	kg	Hydrogen sulfide	-	Fugas de biogás M
Metano, biogénico	4.54E-02	kg	Methane, biogenic	-	Fugas de biogás M
Ión amonio emisión hídrica	4.17E-06	kg	Ammonium, ion	-	Emisión a cuerpos de agua
Nitrato emisión hídrica	1.33E-04	kg	Nitrate	-	Emisión a cuerpos de agua
Nitrito emisión hídrica	4.17E-06	kg	Nitrite	-	Emisión a cuerpos de agua
Nitrogeno orgánico emisión hídrica	4.89E-06	kg	Nitrogen, organic bound	-	Emisión a cuerpos de agua
Fósforo emisión hídrica	3.16E-06	kg	Phosphorus	-	Emisión a cuerpos de agua
Aguas residuales a tratamiento	3.04E-01	m <sup>3</sup>	Wastewater, from residence (RoW)  treatment of, capacity 1.1E10/year   Cut-off, U		
Aguas residuales a tratamiento	6.00E-04	m <sup>3</sup>	Wastewater, average (RoW)  market for wastewater, average   Cut-off, U	Ecoinvent 3	

Tabla 7.3.1.1. ICV H-M-Z-S-NN (6/6) (modificado de Poggi-Varaldo, 2019)

Categoría NN-Nanobioparticle production					
NN-Biogás M2	2.11	kg	Este biogás entranza la cual a purificación biogás NN-Purificación Biogás M		
NN-Nanobioparticles	40.36	kg	Las nanobiopartículas son producto para venta al mercado de las empresas de biorrestauración de acuíferos y de tratamiento de efluentes tóxicos		
Entrada	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Cloruro férrico comercial	2.41E+01	kg	Iron (III) chloride, without water, in 40% solution state (RoW)  iron (III) chloride production, product in 40% solution state   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Planta de digestión anaerobia para residuos de origen biológico	1.49E-08	p	Anaerobic digestion plant, for biowaste (GLO)  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Tiempo de operación de máquina pesada	0.003	h	Machine operation, diesel, >= 74.5/ kW, low load factor (GLO)  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	
Electricidad	3.65	kw h	Electricity, high voltage (MX)  production mix   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Corriente alterna, alto voltaje, condiciones de México. Sustituida por E autóctona de la BRF
Calor	0.21	MJ	Heat, central or small-scale, natural gas (RoW)  heat production, natural gas, at boiler modulating <100kW   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Energía de origen fósil. Fue sustituido por calor autóctono de la BRF
Salida	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
CO2 biogénico	5.87E-03	kg	Carbon dioxide, biogenic	-	Fugas de biogás M
Oxido de dinitrogeno	2.95E-04	kg	Dinitrogen monoxide	-	Fugas de biogás M
Suplido de hidrogeno o acido sulfhidrico	0.00079878	kg	Hydrogen sulfide	-	Fugas de biogás M
Metano, biogénico	9.02E-03	kg	Methane, biogenic	-	Fugas de biogás M
Ion amonio emision hidrica	6.28E-07	kg	Ammonium, ion	-	Emision a cuerpos de agua
Nitrato emision hidrica	2.65E-05	kg	Nitrate	-	Emision a cuerpos de agua
Nitrito emision hidrica	8.28E-07	kg	Nitrite	-	Emision a cuerpos de agua
Nitrogeno organico emision hidrica	9.73E-07	kg	Nitrogen, organic bound	-	Emision a cuerpos de agua
Fosforo emision hidrica	6.28E-07	kg	Phosphorus	-	Emision a cuerpos de agua
Aguas residuales a tratamiento	0.23573	m <sup>3</sup>	Wastewater, from residence (RoW)  treatment of, capacity 1.1E10/year   Cut-off, U	Ecoinvent 3	salida a tratamiento; descarga nula porque el efluente anaerobio de este proceso se recircula parte en este mismo proceso y otra parte en el proceso NN-biopartículas, por lo que es descarga nula
Aguas residuales a tratamiento	1.32E-04	m <sup>3</sup>	Wastewater, average (RoW)  market for wastewater, average   Cut-off, U	Ecoinvent 3	salida a tratamiento
Categoría NN-Purificación de biogás M					
NN-methane at purity 96%	5.24	kg	biogás con contenido de 96% metano, se alimentará a co-generación de energía NN		
Entrada	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Contribución de planta química promedio global, recomendado	3.38E-11	p	Chemical factory, organics (GLO)  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Se calculo con base en una fábrica de compuestos químicos promediada a nivel global, ajustada para el número de piezas de nuestro caso.
Proceso purificación de metano a partir de biogás	6.91E+00	m <sup>3</sup>	Methane, 96% by volume modif2 HP para CH4(RoW)  biogas purification to methane 96 vol-%   Cut-off, U	Ecoinvent 3	Proceso proxí Ecoinvent
Electricidad para accionar compresores etc del proceso	2.41E+00	kWh	Electricity, high voltage (MX)  production mix   Cut-off, U		
Salida	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
CO2 biogénico	5.75E+00	kg	Carbon dioxide, biogenic	-	Emisiones a la atmósfera
H2S	8.00E-02	kg	Hydrogen sulfide	-	Emisiones a la atmósfera
H2O vapor	7.90E-01	kg	Water	-	Emisiones a la atmósfera
Categoría NN-Energy from methane					
Electricity high and medium voltage	42.8	kWh	Electricidad de voltaje alto y mediano obtenida por cogeneración en planta de ciclo combinado, usando metano biogénico		
Heat	70.04		Calor obtenido por cogeneración en planta de ciclo combinado, usando metano biogénico		
Entrada	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Agua potable de tubería para reposición de agua de caldera y enfriamiento	1.05	kg	Tap water (RoW)  tap water production, conventional treatment   Cut-off, U	Ecoinvent 3.0	
Proceso proxí para E, S, Emisiones por producción de electricidad en CCCPP	42.8	kw h	Electricity, high voltage CCCPP modif1 HP (RoW)  heat and power co-generation, natural gas, combined cycle p	Ecoinvent 3.0	
Proceso proxí para E, S, Emisiones por producción de calor en CCCPP	7.00E+01	MJ	Heat, district or industrial, natural gas modif1 HP (RoW)  heat and power co-generation, natural gas, combined c	Ecoinvent 3.0	
Salida	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos	Observaciones
Las salidas están anidadas en los procesos proxí					

Referencias: Modificado de Poggi-Varaldo (2019)

A continuación, se observa en la tabla 7.3.1.2. las 6 etapas de la BRF H-M-S-Z-NN y las entradas y salidas correspondientes a calor y electricidad. La BRF es autosuficiente en energía total con aproximadamente 600 MJ (167 kWh) de energía eléctrica de alto voltaje (obtenida en la cogeneración de metano biológico) y bajo voltaje (electricidad obtenida en las celdas de combustible operadas con biohidrógeno).

**Tabla 7.3.1.2. Balance de energías eléctrica y calor en la BRF H-M-S-Z-NN**

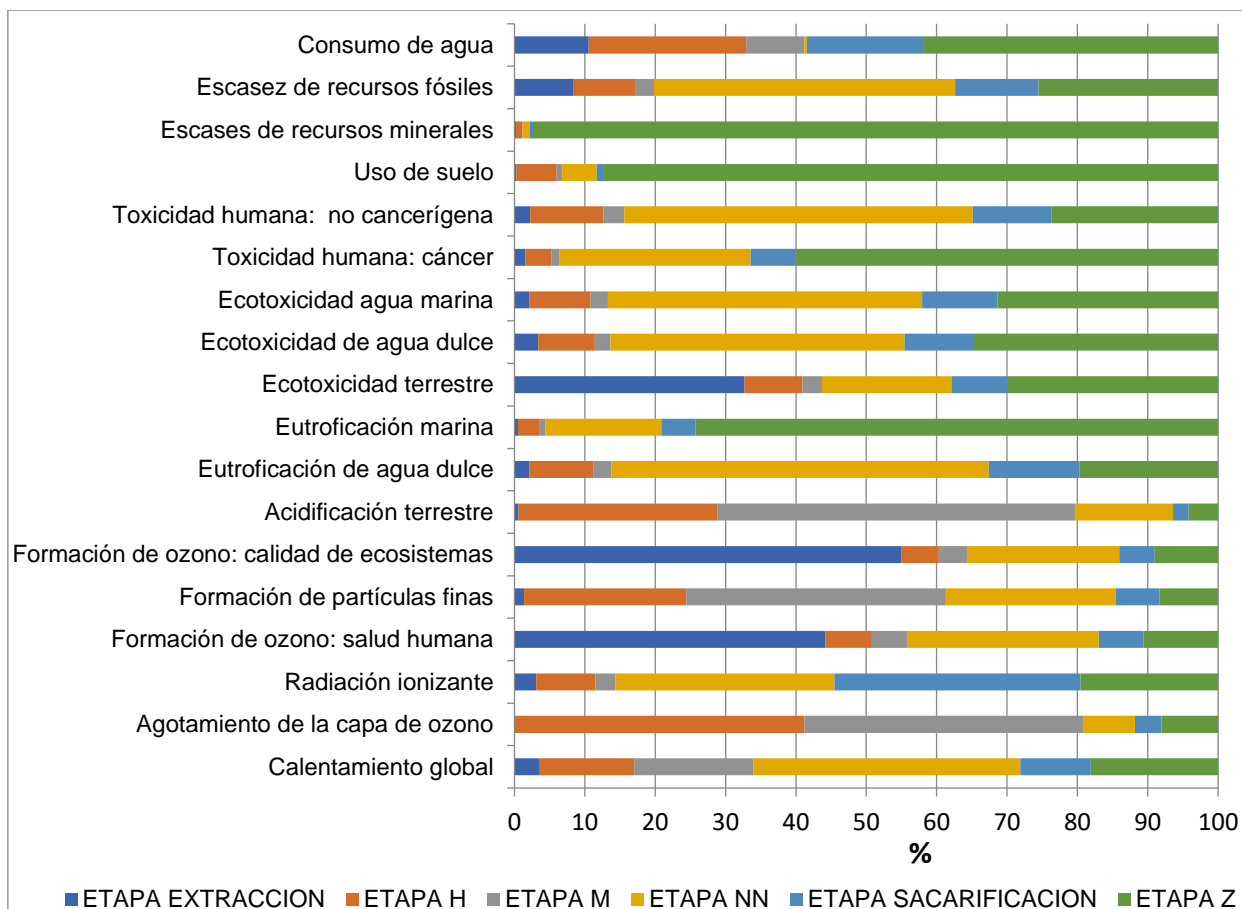
Etapa	Entrada		Salida	
	Calor (MJ)	Electricidad (kWh)	Calor (MJ)	Electricidad (kWh)
Acondicionamiento		8.88		
H	392.60	3.47	0.00	0.00
M	70.42	2.35	0.00	0.00
Biogás H: Purificación, celdas de combustible	0.00	22.93	0.00	40.25
Biogás M: Purificación		36.58	799.82	407.31
E	97.58	0.57		
Z	707.96	79.78		
S (ácida)	36.69	44.63		
NN-Purificación	0.00	3.84	70.04	42.80
Subtotales	1305.25	203.03	869.86	490.36
		Calor (MJ)	Electricidad	
			(kWh)	(MJ)
Total		435.39	287.33	1034.39
Total de energía (Electricidad-Calor)		599.00 MJ	166.39 kWh	

Referencia: Modificada de Poggi-Varaldo (2019)

### 7.3.2 Resultados de Análisis de Impacto de vida

#### 7.3.2.1. Resultados de las categorías de impacto, efectos porcentuales de la BRF H-M-Z-S-NN

A continuación, en la figura 7.3.2.1.1. se muestran las tendencias porcentuales de las categorías de impacto analizadas a la BRF H-M-Z-S-NN y en la tabla 7.3.2.1.1. se exhiben los asuntos significativos de la BRF.



**Figura 7.3.2.1.1. Tendencias de efectos porcentuales de las etapas de la BRF H-M- Z-S-NN a categorías de impactos ambientales (Poggi-Valardo, 2019)**

En la figura 7.3.2.1.1. se observa que la etapa Z predomina en las categorías de uso de suelo, eutroficación marina, toxicidad humana cancerígena y escasez de recursos minerales. Por su parte la etapa NN domina en las categorías de toxicidad humana no cancerígena, calentamiento global, eutroficación del agua dulce y ecotoxicidad al agua dulce y al agua marina. A continuación, se abordarán con mayor detalle los asuntos significativos de la BRF y la contribución a procesos.

Por su parte en la tabla 7.3.2.1.1. se muestran los asuntos significativos de la BRF por etapas. Se muestra el factor de normalización, la caracterización y el impacto total para cada categoría de impacto. En color amarillo se observa la etapa de mayor contribución a cada categoría de impacto.

Tabla. 7.3.2.1.1. Identificación de asuntos significativos en la BRF HMZSNN

Categoría de impacto	Unidades	Factor de normalización <sup>a</sup>	Extracción	Etapa H <sup>b</sup>	Etapa M	Etapa NN	Etapa S	Etapa Z	Impacto Total
Calentamiento global	%		3.585	13.436	16.947	37.918	10.040	18.073	100.00
	kg CO2 e		33.794	126.639	159.725	357.386	94.631	170.343	942.52
	persona/año	1.46E-04	0.005	0.018	0.023	0.052	0.014	0.025	0.1376
Agotamiento de la capa de ozono	%		0.192	40.993	39.727	7.258	3.790	8.040	100.00
	kg CFC11 e		4.48E-06	9.54E-04	9.24E-04	1.69E-04	8.82E-05	1.87E-04	2.33E-03
	persona/año	2.68E+01	1.20E-04	2.56E-02	2.48E-02	4.53E-03	2.36E-03	5.01E-03	6.24E-02
Radiación ionizante	%		3.117	8.394	2.830	31.156	34.974	19.530	100.00
	kBq Co-60 e		0.651	1.753	0.591	6.506	7.303	4.078	20.88
	persona/año	7.24E-03	0.005	0.013	0.004	0.047	0.053	0.030	0.15
Formación de ozono: salud humana	%		44.198	6.623	4.993	27.233	6.344	10.610	100.00
	kg NOx e		1.213	0.182	0.137	0.748	0.174	0.291	2.74
	persona/año	7.50E-02	0.091	0.014	0.010	0.056	0.013	0.022	0.206
Formación de partículas finas	%		1.360	23.057	36.896	24.143	6.218	8.327	100.00
	kg PM2.5 e		0.045	0.765	1.224	0.801	0.206	0.276	3.32
	persona/año	2.68E-01	0.012	0.205	0.328	0.215	0.055	0.074	0.89
Formación de ozono: calidad de ecosistemas	%		55.009	5.305	3.972	21.648	5.057	9.010	100.00
	kg NOx e		1.914	0.185	0.138	0.753	0.176	0.313	3.48
	persona/año	7.82E-02	0.150	0.014	0.011	0.059	0.014	0.025	0.272
Acidificación terrestre	%		0.568	28.318	50.813	13.889	2.219	4.194	100.00
	kg SO2 e		0.108	5.395	9.681	2.646	0.423	0.799	19.05
	persona/año	2.64E-02	0.003	0.142	0.256	0.070	0.011	0.021	0.503
Eutroficación de agua dulce	%		2.107	9.097	2.583	53.598	12.948	19.667	100.00
	kg P e		0.006	0.025	0.007	0.147	0.036	0.054	0.27
	persona/año	7.93E+00	0.046	0.198	0.056	1.166	0.282	0.428	2.175
Eutroficación marina	%		0.485	3.022	0.927	16.420	4.895	74.249	100.00
	kg N e		3.28E-04	2.04E-03	6.26E-04	0.011	0.003	0.050	0.07
	persona/año	1.12E-01	3.67E-05	2.28E-04	7.01E-05	1.24E-03	3.70E-04	5.61E-03	7.56E-03
Ecotoxicidad terrestre	%		32.714	8.231	2.776	18.469	7.939	29.871	100.00
	kg 1,4-DCBe		272.233	68.499	23.099	153.691	66.066	248.570	832.16
	persona/año	1.38E-03	0.376	0.095	0.032	0.212	0.091	0.344	1.15
Ecotoxicidad de agua dulce	%		3.376	8.062	2.229	41.774	9.869	34.690	100.00
	kg 1,4-DCBe		0.363	0.866	0.240	4.488	1.060	3.727	10.74
	persona/año	2.35E-01	0.085	0.204	0.056	1.055	0.249	0.876	2.52
Ecotoxicidad agua marina	%		2.109	8.734	2.435	44.681	10.653	31.388	100.00
	kg 1,4-DCBe		0.296	1.226	0.342	6.273	1.496	4.407	14.04
	persona/año	7.56E-01	0.224	0.927	0.258	4.742	1.131	3.331	10.61

**Tabla. 7.3.2.1.1. Identificación de asuntos significativos en la BRF HMZSNN (cont.)**

Categoría de impacto	Unidades	Factor de normalización <sup>a</sup>	Extracción	Etapas H <sup>b</sup>	Etapas M	Etapas NN	Etapas S	Etapas Z	Impacto Total
Toxicidad humana: cáncer	%		1.544	3.744	1.146	27.116	6.500	59.951	100.00
	kg 1,4-DCBe		0.596	1.445	0.442	10.466	2.509	23.139	38.60
	persona/año	5.60E-01	0.334	0.809	0.248	5.862	1.405	12.961	21.62
Toxicidad humana: no cancerígena	%		2.223	10.436	2.957	49.500	11.225	23.658	100.00
	kg 1,4-DCBe		6.029	28.297	8.018	134.215	30.435	64.148	271.14
	persona/año	1.95E-02	0.118	0.552	0.156	2.618	0.594	1.251	5.29
Uso de suelo	%		0.265	5.761	0.742	4.911	1.068	87.253	100.00
	m <sup>2</sup> a crop e		0.113	2.454	0.316	2.092	0.455	37.166	42.60
	persona/año	1.74E-04	1.96E-05	4.28E-04	5.51E-05	3.65E-04	7.94E-05	6.48E-03	0.01
Escases de recursos minerales	%		0.217	0.926	0.050	0.960	0.628	97.218	100.00
	kg Cu e		3.87E-03	1.65E-02	8.98E-04	0.017	0.011	1.734	1.78
	persona/año	8.47E-06	3.27E-08	1.40E-07	7.61E-09	1.45E-07	9.49E-08	1.47E-05	1.51E-05
Escasez de recursos fósiles	%		8.329	8.923	2.594	42.779	11.847	25.529	100.00
	kg oil e		16.908	18.114	5.265	86.845	24.050	51.825	203.01
	persona/año	7.33E-04	0.012	0.013	0.004	0.064	0.018	0.038	0.15
Consumo de agua	%		10.551	22.389	8.246	0.400	16.638	41.776	100.00
	m <sup>3</sup>		0.967	2.051	0.756	0.037	1.524	3.828	9.16
	persona/año	4.56E-03	0.004	0.009	0.003	0.000	0.007	0.017	0.042

Referencias: Elaborado con información de Budavahari et al., 2011; Sala et al., 2017; Poggi-Varaldo, 2019. Notas: <sup>a</sup> Las unidades del factor de caracterización son (persona/año) en el numerador y las unidades del impacto en el denominador (Npi). <sup>b</sup> La etapa de acondicionamiento de incluye en la etapa H. Npi (calculados con factores del 2016)

En la tabla 7.3.2.1.1. se observan los aspectos significativos que influyen en los impactos ambientales de la BRF. Se observa que las etapas Z y NN aportan mayor contribución principalmente en las categorías de, ecotoxicidad terrestre, al agua dulce y al agua marina, seguidas por las categorías de toxicidad humana cancerígena y no cancerígena; escasez de recursos minerales y fósiles.

De forma interesante se observa que la etapa NN tiene la mayor contribución a la categoría de calentamiento global y a la categoría de consumo de agua. Estas categorías serán discutidas más adelante en la interpretación del ACV.

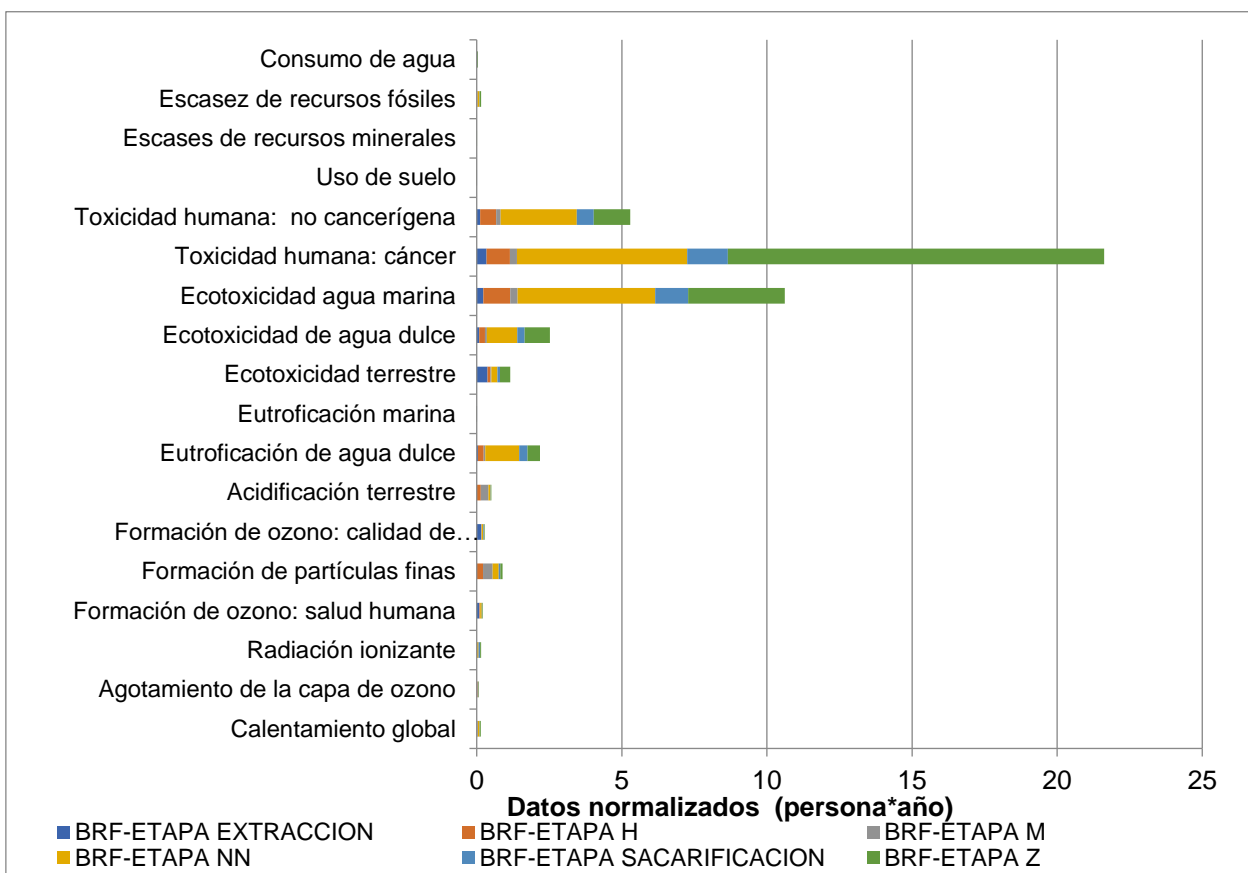
Respecto a los PIAN, se observa que las etapas que más contribuyen a las categorías de toxicidad humana cancerígena y a la ecotoxicidad al agua marina son las etapas NN y Z, en el rubro de impactos normalizados también contribuyen a la eutrofización al agua dulce y toxicidad humana no cancerígena.

### 7.3.2.2. Resultados de las categorías de impacto normalizados de la BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados fundamentales referente a los efectos normalizados se presentan en la figura 7.3.2.2.1. y en la tabla 7.3.2.1.1. de identificación de asuntos significativos en la BRF HMZSNN presentada anteriormente.

Cabe aclarar que los impactos ambientales normalizados tienen unidades de la forma [persona\*año/(unidades del impacto correspondiente)].

En la figura 7.3.2.2.1. se observa que predomina la categoría de toxicidad humana cancerígena correspondiente a la etapa Z. La categoría de ecotoxicidad al agua dulce también correspondiente a la etapa Z muestra el segundo impacto normalizado más alto. Seguidas la toxicidad humana no cancerígena y ecotoxicidad al agua dulce



**Figura. 7.3.2.2.1. Tendencias de efectos normalizados a las etapas de BRF H-M-Z-S-NN sobre categorías de impactos ambientales (Poggi-Varaldo, 2019)**

Correspondería enfocarse al análisis detallado de las contribuciones para cada impacto, es decir 18 análisis. Sin embargo, debido por criterios de relevancia, se decidió analizar detalladamente las contribuciones en los impactos más importantes.



Las categorías de impacto con efecto normalizado bajo, pueden consultarse en el respectivo anexo: ecotoxicidad terrestre (Anexo 20), acidificación terrestre (Anexo 21), formación de ozono a ecosistemas terrestres (Anexo 24), deterioro de ozono en estratósfera (Anexo 25), Formación de ozono y salud humana (Anexo 26), escasez de recursos fósiles (Anexo 27), partículas finas 2.5 micro m o menos (Anexo 28), radiación ionizante (Anexo 29), eutroficación marina (Anexo 30), escasez de recursos naturales (Anexo 32), uso de suelo (Anexo 33).

### 7.3.3 Interpretación de BRF-H-M-S-Z-NN

Se analizaron en detalle las contribuciones de los impactos altos de toxicidad y ecotoxicidad, y calentamiento global (a pesar de que su impacto normalizado es relativamente bajo).

Respecto a la categoría de calentamiento global (Anexo 23) la etapa NN es la que tiene contribución predominante y muestra que la mayor contribución corresponde al uso de carbón activado (Tabla 7.3.3.1.). Como se recordará, en la etapa NN se utiliza una buena cantidad de carbón activado para la conformación de las bionanopartículas (Figura 7.3.1.1.)

Para completar el análisis es importante rastrear el proceso relacionado al material carbón activado en las bases de datos disponibles del software (proxi). En este caso corresponde a la base de datos Ecoinvent donde el propio software selecciona el proxi titulado "Activated carbon, granular {RoW}| activated carbon production, granular from hard coal | Cut-off, U, (21 %) (Anexo 34.1). El carbón activado que considera el software es de origen fósil. La unidad funcional de referencia en el proxi es 1 kg de carbón activado producido, mientras que el uso de carbón activado en la etapa NN es 38 kg.

Se analizaron dentro del proxi los rubros de consumo energéticos. Para ello, se sumaron las entradas de energías eléctricas lo que arroja 1.84 kWh de energía eléctrica/kg C activado. Análogamente para las cargas térmicas se obtuvo 13.30 MJ de energía térmica/kg C activado, y una fracción de pieza referente a un horno industrial de carbón ( $3.21E-08$  pieza/kg C activado) (Anexo 34.1). Esto indica que la producción de carbón activado es energéticamente intensiva. A su vez, ese uso de energía liberará grandes cantidades de GEI, particularmente CO<sub>2</sub>.

Como el ACV es iterativo, se concluye que vale la pena ponderar cuidadosamente la sustitución de carbón activado de origen fósil por carbón activado de origen vegetal, o encontrar un proceso de producción de carbón activado de origen fósil menos impactante que el recopilado en el proxi.

**Tabla. 7.3.3.1 Contribución de etapas y procesos de BRF HMZSNN a categorías de impactos ambientales**

Categoría de impacto	Etapa de mayor contribución		Proceso o material de mayor contribución
Calentamiento global	Etapa NN 37.90 % 357.386 kg CO2 e		Entrada: Carbon activado; Proxy Ecoinvent: Activated carbon, granular {RoW}  activated carbon production, granular from hard coal   Cut-off, U, (21 %)
Agotamiento de la capa de ozono	Etapa H 40.99 % 9.54E-04 kg CFC11 e	Etapa M 39.73 % 9.24E-04 kg CFC11 e	1 (H) Salida: Proceso digestion anaerobia; proxi Ecoinvent: Biogas {RoW}  anaerobic digestion of manure   Cut-off, U (45.8%) Sólidos fermentados (20.27 %) 2 (M). Salida: Biogas {RoW}  anaerobic digestion of manure   Cut-off, U (61.95 %)
Radiación ionizante	Etapa NN 31.16 % 6.506 kBq Co-60	Etapa S 34.97 % 7.303 kBq Co-60	Salida, tratamiento de residual de minería producto de extracción de carbon activado. Proxy Ecoinvent: Tailing, from uranium milling {GLO}  treatment of   Cut-off, U (83.2 %) Salida: Consumo de energía; Proxy Ecoinvent: Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, 1kV - 60kV EU-27 S System - Copied from ELCD (5.7 %)
Formación de ozono: salud humana	Extracción 44.20 % 1.213 kg NOx e		Entrada: Proceso extracción acidos orgánicos y solventes (28.1 %)
Formación de partículas finas	Etapa M 36.90 % 1.224 kg PM2.5 e		Proxy Ecoinvent: Biogas {RoW}  anaerobic digestion of manure   Cut-off, U (56.6 %)
Formación de ozono: calidad de ecosistemas	Extracción 55.01 % 1.914 kg NOx e		Salida: Proceso extracción ácidos orgánicos y solventes (35.7 %)
Acidificación terrestre	Etapa M 50.81 % 9.681 kg SO2 e		Salida: Biogas {RoW}  anaerobic digestion of manure   Cut-off, U (80.4 %)
Eutroficación de agua dulce	Etapa NN 53.60 % 0.147 kg P e		Salida, residuo: Referente al tratamiento de escombros de carbón. Proxy Ecoinvent: Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U (63.6 %)
Eutroficación marina	Etapa Z 74.25 % 0.050 kg N e		Salida: Tratamiento de residuales de carbón. Proxy Ecoinvent: Coconut, dehusked {PH}  coconut production, dehusked   Cut-off, U (17.3 %)
Ecotoxicidad terrestre	Extracción 32.71 % 272.233 kg 1,4-DCB	Etapa Z 29.87 % 248.570 kg 1,4-DCB	Salidas: Proceso de extracción de ácidos orgánicos y solventes "Ácidos orgánicos y solventes" (20.2 %) Salidas: tratamiento de residuales de carbón y cenizas. Activated carbon, granular {RoW}  activated carbon production, granular from hard coal   Cut-off, U (10.6%)
Ecotoxicidad de agua dulce	Etapa NN 41.77 % 4.488 kg 1,4-DCBe	Etapa Z 34.69 % 3.727 kg 1,4-DCBe	Salida, residuo: tratamiento de residuales de minería, de carbón y cenizas. Proxy Ecoinvent: Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U (41.8 %) Salida residuo: tratamiento de residuales de carbón y cenizas Proxy Ecoinvent: Spoil from lignite mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U (12.3 %)

**Tabla. 7.3.3.1. Contribución de etapas y procesos de BRF HMZSNN a categorías de impactos ambientales (cont.)**

Categoría de impacto	Etapa de mayor contribución		Flujo de entrada o salida de mayor contribución
Ecotoxicidad agua marina	Etapa NN 44.681	Etapa Z 31.388	Salida: tratamiento de residuales de carbón y cenizas proxi Ecoinvent: Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U (44.1%)
	6.273 kg 1,4-DCB	4.407 kg 1,4-DCB	Salida residuo: tratamiento de residuales de carbón y cenizas Proxy Ecoinvent: Spoil from lignite mining {GLO}  treatment of, in surface
Toxicidad humana: cáncer		Etapa Z 59.95 %	Salida, residuo: Proxy Ecoinvent relacionado con el tratamiento de residuo de H3PO4 (53.7%)
		23.139 kg 1,4-DCB	H3PO4 purification residue {RoW}  treatment of H3PO4 purification residue, residual material landfill   Cut-off, U
Toxicidad humana: no cancerígena	Etapa NN 49.500		Salida, residuo: Proxy Ecoinvent relacionado con la producción de carbón activado. Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U (49.8 %)
	134.215 kg 1,4-DCB		
Uso de suelo		Etapa Z 87.25 %	Salida: Proxy Ecoinvent relacionado con la producción de carbón activado. Coconut, dehusked {PH}  coconut production, dehusked   Cut-off, U (18.5 %)
		37.166 m <sup>2</sup> a crop e	
Escases de recursos minerales		Etapa Z 97.22 %	Salida: Proxy Phosphate rock, as P2O5, beneficiated, wet {RoW}  phosphate rock beneficiation, wet   Cut-off, U (74.0 %)
		1.734 kg Cu e	
Escasez de recursos fósiles	Etapa NN 42.78 %		Salida: Proxy Ecoinvent relacionado con la producción de carbón activado. Hard coal {CN}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U (20.7 %)
	86.845 kg oil e		
Consumo de agua		Etapa Z 41.78 %	Salida: Proxy Ecoinvent relacionado con la producción de carbón activado. Irrigation {PH}  processing   Cut-off, U (37.7 %)
		3.828 m <sup>3</sup>	

NOTAS: <sup>a</sup> La etapa de acondicionamiento de incluye en la etapa.

Referencias: Elaboración propia con datos de Poggi-Varaldo (2019)

Alternativamente, como en la etapa NN el carbón activado cumple la función de soporte para la formación de bionanopartículas en el seno de los reactores anaerobios de lecho fluidizado, otra opción es reemplazar el carbón activado por otro material soporte de menor impacto. Cualquiera de estas opciones debe convertirse en correspondientes ACV y comparar los resultados entre sí, con el objetivo de bajar la contribución de calentamiento global de la BRF.

El deterioro de ozono en la estratósfera se refiere a la destrucción de la capa estratosférica de ozono por una red de reacciones de radicales libres causadas por compuestos químicos tales como NO<sub>x</sub>, Br, clorofluorocarbonos (CFCs) usados en la industria frigorífica y refrigeración (actualmente prohibido su uso), y otros compuestos orgánicos volátiles no metano (Koppmann, 2007). El efecto se mide en kg CFC-11 e.

Uno de los efectos benignos de la capa de ozono es absorber la radiación UV-B de la luz solar, por lo que la luz solar que llega a la superficie terrestre es más baja en ese componente luminoso. Con el deterioro de la capa de O<sub>3</sub>, entonces la cantidad de UV-B que llega a la superficie es mayor que la cantidad normal y puede tener efectos negativos sobre la salud como afecciones al sistema inmunológico, problemas respiratorios entre otros (Koppmann, 2007).

Las etapas de la BRF que contribuyen sustancialmente al impacto potencial ambiental deterioro de la capa de O<sub>3</sub> son H y M con 40.99 % y 39.23 % respectivamente (Tabla 7.3.3.1.).

Dentro de la etapa H, los subprocesos y materiales que la técnica de ACV indica como causantes de la contribución son dos productos de H, a saber. Los sólidos fermentados (4.72 E-04 kg CFC-11 e), representada por “Fermented wastes” y por “Biogas H” (3.37E-04 kg CFC-11 e).

En la etapa M, el ACV señala que su contribución está asociada al subproceso “Biogas RoW| anaerobic digestion of manure | Cut-off, U” (contribución de 61.96% correspondiente 6.63E-04 kg CFC-11 e).

Tanto las corrientes de biogás en H y en M contienen NO<sub>x</sub>, y los sólidos fermentados también pueden contener NO<sub>x</sub> (particularmente N<sub>2</sub>O) como gases ocluidos y aniones como nitrato y nitrito en la masa húmeda. Estos dos últimos, a su vez, son precursores de más N<sub>2</sub>O. Estas corrientes también están asociadas a compuestos orgánicos volátiles no metano de tipo ácido fórmico, acético, propiónico, etanol, acetona, butanol, entre otros que como se señaló más arriba pueden participar en reacciones de radicales libres que consumen ozono.

Prosiguiendo con la generación de NO<sub>x</sub> en las etapas H y M, se puede ver en la tabla 7.3.1.1. que las principales emisiones para la etapa M son: monóxido de dinitrógeno al aire 0.001915 kg, 1.69E-3 kg de nitratos y 5.28E-5 kg de nitritos. Por su parte la etapa H presenta 0.0544 kg monóxido de dinitrógeno al aire, 4.83E-3 kg de nitratos y 1.51E-4 kg de nitritos. (tabla 7.3.1.1. del ICV en la parte de Etapa M Salidas y Etapa H Salidas, por ejemplo). Estas emisiones al reaccionar con compuestos orgánicos volátiles contribuyen a la formación de smog fotoquímico y por lo tanto al deterioro de la capa de ozono (Koppmann, 2007). Esto sugiere que los materiales subprocesos señalados por

la técnica de ACV como contribuyentes al impacto potencial ambiental deterioro de la capa de O<sub>3</sub> son congruentes con el posible efecto.

Respecto a las posibles mejoras, se podría pensar en contener emisiones gaseosas fugitivas de los biorreactores en etapa H y M, así como la tubería y compresores asociados, y enviar esas emisiones a tratamiento de NO<sub>x</sub>. Tanto la contención de emisiones como su conducción a tratamiento y el tratamiento de NO<sub>x</sub> per sé introducirán impactos potenciales ambientales nuevos. Por otro lado, los impactos sobre la capa de O<sub>3</sub> podrán haber disminuido al disminuir los NO<sub>x</sub>.

Se deberá realizar nuevos ACVs para dilucidar si el efecto neto de las medidas de mejora son efectivas desde el punto de vista ambiental del impacto considerado y los otros impactos ambientales.

Probablemente la categoría de mayor preocupación sea la de toxicidad humana (Tablas 7.3.2.1.1 y 7.3.3.1.). Respecto a la toxicidad humana cancerígena se observa que la mayor contribución corresponde a la etapa Z con un 60 % y 23.139 kg 1,4-DBC e. La técnica identifica que dicha contribución se refiere al tratamiento de residuos “H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> purification residue {RoW}| treatment of H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> purification residue, residual material landfill | Cut-off, U”.

En este caso un proceso no explícito en la etapa Z, esta vinculado al uso de fosfatos en la formulación del medio de cultivo en esta etapa, ya que son usados 20 kg de fosfato de sodio (Sodium phosphate {RoW}| production | Cut-off, U) (Tabla 7.3.1.1. Inventario de ciclo de vida, subsección Etapa Z).

El concentrado de enzimas producido en la etapa Z conlleva el tratamiento de residuos de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, el cual requiere de 20 kg de fosfato de sodio (Sodium phosphate {RoW}| production | Cut-off, U). Como subproceso de este proxi se encontró que en la producción de fosfato de sodio se requiere de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> grado industrial 85 %. Es decir, 0.174 kg de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> grado industrial (56 %) / kg de fosfato de sodio (Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO}| market for | Cut-off, U). Y en consecuencia por cada kg de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> grado industrial es necesario el tratamiento de 0.352 kg residuos de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

Es importante resaltar que las emisiones al agua encontradas en el proxi “H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> purification residue {RoW}| treatment of H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> purification residue, residual material

landfill | Cut-off, U” referente a la generación de la purificación de 1 kg de  $H_3PO_4$  de mayor preocupación son (Anexo 34.3): Al  $8.31 \times 10^{-6}$  kg, As  $4.89 \times 10^{-5}$  kg, Cd  $4.82 \times 10^{-7}$  kg, Cr VI  $3.84 \times 10^{-4}$  kg y Zn  $1.63 \times 10^{-5}$  kg. En particular el Cr (VI)  $3.84 \times 10^{-4}$  kg podría estar ligado al impacto potencial analizado (Kumar, 2017; Hauschild *et al.*, 2018) así como Hg  $2.24 \times 10^{-8}$  kg (Lou *et al.*, 2015).

Si podemos determinar que el  $Na_3PO_4$  agregado al medio de Z está en exceso como nutriente P, entonces el  $Na_3PO_4$  está cumpliendo con un rol de control de pH. Por lo tanto, una cierta fracción del  $Na_3PO_4$  total podría sustituirse por otro sistema buffer simple como el  $HCO_3^- - CO_3^{=}$  exento de P.

En consecuencia, cada kg de  $Na_3PO_4$  “ahorrado” muy probablemente bajará proporcionalmente el impacto ambiental debido a los residuos del tratamiento de  $H_3PO_4$ . Y posteriormente realizar el ACV correspondiente para determinar si disminuyó el impacto ambiental.

Respecto a la categoría de toxicidad humana no cancerígena, la etapa de mayor contribución es la NN con un 49.5 % y 134.21 kg 1,4-DBC e (tabla 7.3.3.1.). El ACV indica que NN a su vez reporta la contribución de procesos relacionados con procesos de fabricación de carbón activado y el tratamiento de los residuos de minería del carbón y hace referencia al proxi “Spoil from hard coal mining {GLO} treatment of, in surface landfill | Cut-off” (Anexo 34.6). Como se mencionó anteriormente el carbón activado es parte importante de la BRF pues es usado para conformar biopartículas en la etapa NN.

En esta categoría es necesario prestar atención a las emisiones de As (V) y Zn (II), ya que tienen un impacto importante a la toxicidad humana no cancerígena. Fueron encontradas emisiones al agua por kg de residuo de minería tratado de  $6.25 \times 10^{-7}$  y  $1.90 \times 10^{-5}$  kg de As y Zn, respectivamente (Anexo 34.6).

También se encontraron emisiones de Hg  $3.74 \times 10^{-11}$  kg, el cual es tóxico para los humanos (Anexo 34.6) (Cole-Hunter *et al.* 2020).

Es evidente que el uso de carbón activado nuevamente se convierte en una carga negativa para el impacto ambiental de la BRF en particular de la etapa NN. Por lo cual es recomendable buscar una alternativa al carbón activado de origen fósil por carbón activado de origen vegetal, u otro material menos impactante.

Respecto a la categoría de ecotoxicidad al agua dulce la mayor contribución se encuentra en la etapa NN con un 41 % y la etapa Z con 34.69 %, la suma de ambas etapas da un total de 8.215 kg 1,4-DCB (tabla 7.3.3.1.). Se encuentran relacionados con varios procesos de minería de carbón; los proxis relacionados son “Spoil from hard coal mining {GLO}| treatment of, in surface landfill | Cut-off, U (41.8 %), Spoil from lignite mining {GLO}| treatment of, in surface landfill | Cut-off, U (12.3 %)” (Anexo 34.7).

Posiblemente a su vez está asociado a la fabricación de carbón activado debido al uso de este material en la etapa NN. Al igual que en la categoría de toxicidad humana es necesario poner especial atención en las emisiones de As (V) y el Zn (II) Cr (VI), Hg y Pb emitidos al agua dulce ya que podrían ser algunos de los contribuyentes a este tipo de impacto (Kumar, 2017; Hauschild *et al.*, 2018; Lou *et al.*, 2015). Resaltan en ambas etapas las emisiones al agua por kg de residuo tratado de: 1.90E-E kg de As, 1.34E-6 Cr (VI), 4.86E-8 kg de Hg, 6.28E-8 kg de Pb y 1.90E-5 kg de Zn (Anexo 34.7).

El uso de carbón activado nuevamente juega un papel importante en el impacto ambiental de la BRF. Por lo cual la recomendación es similar a lo discutido anteriormente.

En la categoría de ecotoxicidad al agua marina la etapa NN posee la mayor contribución de impacto con el 44 %, por su parte la etapa Z tiene una contribución del 31 %, la suma de ambas etapas da un total de 76.08 kg 1,4-DCB e (tabla 7.3.3.1.).

Se observa que nuevamente los procesos relacionados con la minería de carbón y el tratamiento de sus residuos es la razón de este impacto. El proxi de mayor contribución es “Spoil from hard coal mining {GLO}| treatment of, in surface landfill | Cut-off, U” con un 44.1 % de contribución a la etapa NN y 12.8 % a la etapa Z. (Anexo 34.8).

Nuevamente es necesario poner especial atención en las emisiones de As (V) y el Zn (II) Cr (VI), Hg y Pb (Kumar, 2017; Hauschild *et al.*, 2018; Lou *et al.*, 2015). Las principales emisiones encontradas fueron: 5.22E-E kg de As, 1.12E-6 Cr (VI), 4.85E-8 kg de Hg, 6.28E-8 kg de Pb y 1.58E-5 kg de Zn (Anexo 34.8)

Es evidente que el uso de carbón activado desempeña un papel crucial en el impacto ambiental global de la BRF. La recomendación una vez más para reducir el impacto ambiental a la categoría de ecotoxicidad, radica en buscar una alternativa al carbón activado de origen fósil por carbón activado de origen vegetal.

En la tabla 7.3.3.2 pueden consultarse las principales emisiones relacionadas toxicidad y ecotoxicidad de la BRF.

**Tabla 7.3.3.2. Resumen de principales emisiones de la tecnología de BRF**

<b>Emisión</b> <b>Categoría de impacto</b>	<b>Zn (kg)</b>	<b>As (kg)</b>	<b>Cr (kg)</b>	<b>Hg (kg)</b>	<b>Otros (kg)</b>
Toxicidad humana cancerígena	1.63E-5	4.89E-5	3.84E-4		Residuales de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> : 4.82E-7 Cd; 8.31E-06 Al
Toxicidad humana no cancerígena	1.9E-5	6.25E-7		3.74E-11	
Ecotoxicidad al agua dulce	1.90E-5	1.14E-7	1.34E-6	4.86E-8	Pb: 6.28E-8
Ecotoxicidad marina	1.58E-5	5.22E-7	1.12E-6	4.85E-8	Pb: 6.28E-8

Referencias: Elaboración propia (Kumar, 2017; Hauschild *et al.*, 2018; Lou *et al.*, 2015)

Finalmente, con respecto a la generación de energía, los resultados muestran que la BRF H-M-S-Z-NN es autosuficiente. La BRF produce una energía total de 599 MJ (tabla 7.3.1.2) aproximadamente 166 kWh, que consiste en energía eléctrica de alto voltaje (electricidad obtenida en la cogeneración de metano biológico) y bajo voltaje (electricidad obtenida en las celdas de combustible operadas con biohidrógeno).

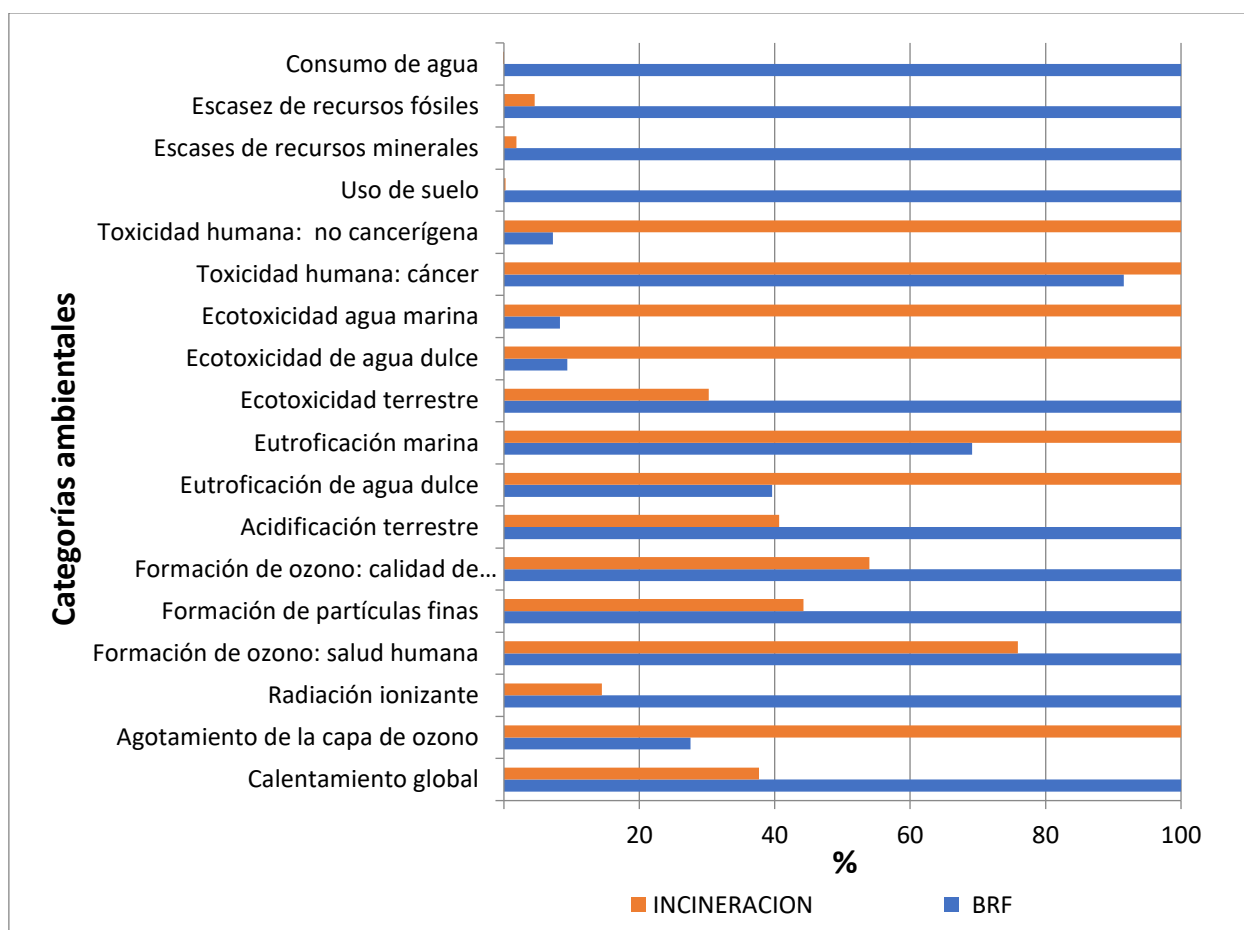
Además, la BRF es capaz de recuperar calor (sensible) de varias corrientes de proceso (biorreactores H y M) la recuperación de calor varía de 40 a 80%. Sin embargo, la BRF solamente produce el 63% de las cargas térmicas requeridas (Poggi-Varaldo, 2019).



### 7.3.4 Evaluación de impactos ambientales análisis comparativo de BRF H-M-S-Z-NN e incineración con recuperación de energía

En esta sección se muestra el análisis comparativo de la evaluación de impacto de la tecnología de BRF H-M-Z-NN e IRE. Para lo cual se tomaron los respectivos inventarios de ciclo de vida presentados en la sección 7.3.1 y en la actividad 2 respectivamente para cada tecnología.

#### 7.3.4.1 Resultados de evaluación de impacto, análisis comparativo de BRF H-M-Z-NN e IRE sobre las categorías de impacto, efectos porcentuales.



**Figura 7.3.4.1.1. Tendencias de los efectos porcentuales de BRF H-M-Z-S-NN e IRE sobre las categorías de impactos ambientales (ISO 14044, 2006)**

Se observa en la figura 7.3.4.1.1. que predomina la tecnología de IRE por encima de la BRF en las categorías de toxicidad humana cancerígena, toxicidad humana no cancerígena, ecotoxicidad marina y al agua dulce.

**Tabla 7.3.4.1.1. Efectos porcentuales de BRF H-M-Z-S-NN e IRE sobre las categorías de impactos ambientales, organizado por productos: calor y energía eléctrica**

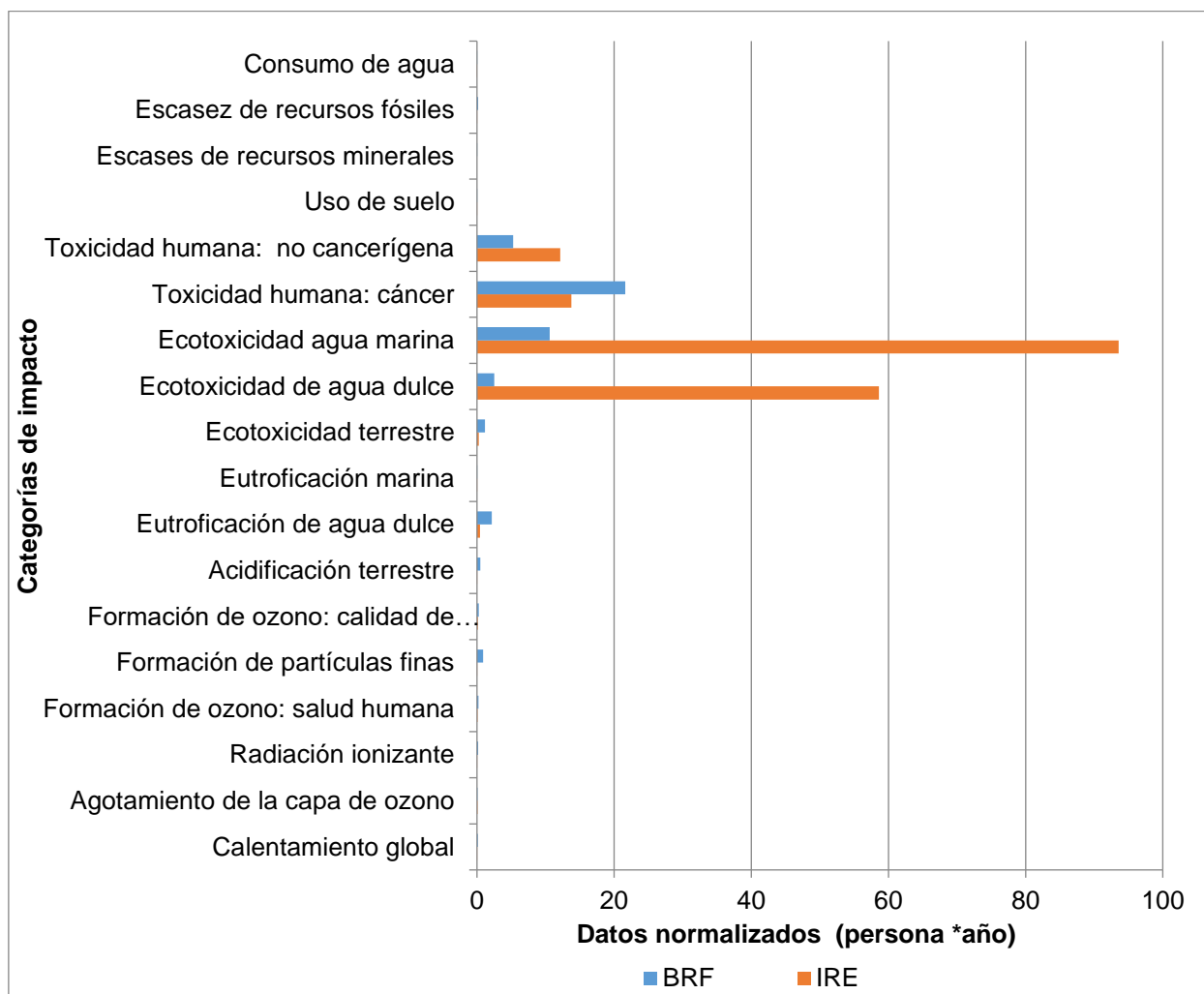
CATEGORÍAS AMBIENTALES	BRF %	INCINERACION %
Calentamiento global	100	37.68
Agotamiento de la capa de ozono	27.54	100
Radiación ionizante	100	14.47
Formación de ozono: salud humana	100	75.89
Formación de partículas finas	100	44.23
Formación de ozono: calidad de ecosistemas	100	53.99
Acidificación terrestre	100	40.63
Eutroficación de agua dulce	39.61	100
Eutroficación marina	69.13	100
Ecotoxicidad terrestre	100	30.24
Ecotoxicidad de agua dulce	9.36	100
Ecotoxicidad agua marina	8.28	100
Toxicidad humana: cáncer	91.55	100
Toxicidad humana: no cancerígena	7.24	100
Uso de suelo	100	0.22
Escases de recursos minerales	100	1.86
Escasez de recursos fósiles	100	4.52
Consumo de agua	100	-8

Referencia: Elaboración propia (ISO 14044, 2006)

Por su parte la tabla 7.3.4.1.1. muestra que la tecnología de IRE tiene un porcentaje mayor en las categorías de toxicidad humana cancerígena, toxicidad humana no cancerígena, ecotoxicidad marina y al agua dulce (color amarillo).

Sin embargo, la BRF en la categoría de toxicidad humana cancerígena la BRF se encuentra muy cercana a la IRE.

7.3.4.2 Resultados de análisis de impacto comparativo de BRF H-M-S-Z-NN e Incineración con recuperación de energía sobre las categorías de impacto, efectos normalizados.



**Figura 7.3.4.2.1. Tendencias de efectos normalizados de BRF H-M-Z-S-NN e IRE, sobre las categorías de impactos ambientales (ISO 14044, 2006)**

Se observa en la figura 7.3.4.2.1. que predominan los efectos normalizados en la categoría ecotoxicidad marina predomina en la tecnología de IRE. En segundo lugar, se encuentra la ecotoxicidad al agua dulce con mayores efectos normalizados también para IRE.

Respecto a la categoría de toxicidad humana cancerígena la BRF destaca por encima de IRE. Por su parte la toxicidad humana no cancerígena tiene menores efectos normalizados y se observa que la IRE tiene una participación mayor que la BRF.

**Tabla 7.3.4.2.1. Efectos normalizados de BRF H-M-Z-S-NN e IRE sobre categorías de impactos ambientales, organizado por productos: calor y energía eléctrica (persona\*año)**

<b>Categorías de impacto</b>	<b>IRE</b>	<b>BRF</b>
Calentamiento global	0.021	0.138
Agotamiento de la capa de ozono	0.089	0.062
Radiación ionizante	0.003	0.150
Formación de ozono: salud humana	0.092	0.206
Formación de partículas finas	0.012	0.890
Formación de ozono: calidad de ecosistemas	0.107	0.272
Acidificación terrestre	0.020	0.503
Eutroficación de agua dulce	0.432	2.175
Eutroficación marina	0.023	0.008
Ecotoxicidad terrestre	0.238	1.150
Ecotoxicidad de agua dulce	58.601	2.520
Ecotoxicidad agua marina	93.557	10.610
Toxicidad humana: cáncer	13.777	21.620
Toxicidad humana: no cancerígena	12.139	5.290
Uso de suelo	2.02E-05	1.00E-02
Escases de recursos minerales	3.82E-07	1.51E-05
Escasez de recursos fósiles	0.006	0.150
Consumo de agua	-0.002	0.042
Total efectos nomalizados $\alpha$	179.114	45.796

En la tabla 7.3.4.2.1 se observa que  $\alpha$  es mayor para IRE (179) que para BRF(45). Las categorías de impacto con mayores efectos normalizados son la ecotoxicidad marina y al agua dulce, con 93 y 58 persona\*año, respectivamente para IRE. Muy por encima de la BRF.

En lo que concierne a la toxicidad humana cancerígena, la BRF (21) muestra mayores efectos normalizados que la IRE (13). Con respecto a la toxicidad humana no cancerígena IRE (12) también posee mayores efectos normalizados que la BRF (5). El resto de las categorías no representan un PIAN importante.

### 7.3.5 Interpretación de análisis comparativo de BRF H-M-S-Z-NN e incineración con recuperación de energía

En la figura 7.3.4.2.1. referente al análisis comparativo de evaluación de impactos del ciclo de vida, muestra que la sumatoria de los potenciales impactos normalizados ( $\sum$  PIAN) es mayor para IRE (179) que para BRF H-M-S-Z-NN (45).

Se observa en la tabla 7.3.4.2.1. que predominan los efectos normalizados en la categoría ecotoxicidad marina (93) para la tecnología de IRE. En segundo lugar, se encuentra la ecotoxicidad al agua dulce (58) con mayores efectos normalizados también para IRE.

El índice de impactos normalizados ( $\alpha$ ) es equivalente a la suma de los potenciales impactos normalizados ( $\sum$  PIAN ).

$$\alpha = \sum \text{PIAN}_j ; 1 \leq j \leq 18$$

$\alpha$  = índice de impactos normalizados

$\sum$  PIAN = sumatoria de los potenciales impactos normalizados

Donde  $\text{PIAN}_j$  representa el potencial impacto ambiental normalizado; j subíndice que representa al j-ésimo impacto

Entonces, cuando  $\alpha$  es mayor, entonces la sostenibilidad es menor

$$\alpha_{\text{BRF}} = 45.80 ; \alpha_{\text{IRE}} = 179.11$$

Por lo cual a nivel global la BRF es más sostenible (ambientalmente) que IRE

Respecto a la categoría de toxicidad humana cancerígena la BRF (21) destaca por encima de IRE (13).

Para IRE el nivel más alto de PIAN es en ecotoxicidad marina (93) y al agua dulce (93), seguido por la toxicidad cancerígena humana y de la toxicidad humana no cancerígena.

Lo cual refiere que los principales contribuyentes a estas categorías son el Cr (VI) emitido al agua dulce y además es el principal impulsor de toxicidad cancerígena (Hauschild *et al.*, 2018).

Por su parte, el As (V), el Zn (II) emitidos al agua dulce muestran un impacto en la categoría toxicidad humana no cancerígena (Hauschild *et al.*, 2018). Aunado a lo anterior, los metales pesados como Hg y Pb contribuyen a la categoría toxicidad humana (Lou *et al.*, 2015).

Respecto a la BRF H-M-S-Z-NN se observa que el tratamiento de residuos de  $H_3PO_4$ , producto del uso de fosfatos para la conformación del medio de cultivo de la etapa Z, tiene el mayor PIAN para la toxicidad humana cancerígena.

Se observo en la tabla 7.3.3.1. que las etapas Z Y NN contribuyen con mayor PIAN para la tecnología de BRF. Predominan las categorías de ecotoxicidad marina y del agua dulce. La mayor contribución proviene de los procesos relacionados con purificación de residuos de la producción de  $H_3PO_4$  y de procesos relacionados con el tratamiento de residuales de minería, de carbón y cenizas.

Con respecto a la capacidad energética, de acuerdo con los datos analizados de Poggi-Varaldo (2019), la BRF-H-M-S-Z-NN produce en energía total 166 kWh de energía eléctrica por 1000kg de FORSU procesado. Además es capaz de recuperar calor (sensible) de varias corrientes de proceso (biorreactores H y M), sin embargo, la BRF solamente produce el 63% de las cargas térmicas requeridas.

Por su parte la IRE que produce 129.3 kWh y 5893 MJ de calor por tonelada de FORSU procesada.

Por lo tanto, de acuerdo con estos datos la BRF (166 kWh) genera más energía eléctrica que la IRE 129.3 kWh. En consecuencia, la generación de energía eléctrica es más baja para IRE.

La baja generación de energía esta relacionado con la composición de los RSO (bajo poder calorífico) y las condiciones de operación. Además, es necesario un consumo extra de energía obtenida a partir de gas natural para los procesos de TGC y el tratamiento de residuos (Lou *et al.*, 2015).

## 8. CONCLUSION

Actualmente no existen legislaciones en materia de BRF en México y por lo tanto en comparación con las legislaciones de EUA y la UE, México muestra un rezago.

No obstante, en cuanto al tema de bioenergía, el marco legal muestra puntos importantes respecto a los mecanismos fiscales. Sin embargo, son necesarios apoyos especiales a los biocombustibles obtenidos a partir de residuos tal y como existe en EUA y la UE.

Por lo cual es indispensable ejecutar acciones para la consolidación de un marco legal de bioenergía sólido que permita en un futuro el desarrollo de BRFs comerciales en México.

Pues hasta el momento la producción y el consumo de biocombustibles en el país ha sido limitado y existe un déficit en el crecimiento esperado de más del 35 % para el año 2030, por lo cual son necesarias:

- Leyes que incentiven el desarrollo de la industria de bioenergéticos y que den certeza a inversionistas para la creación de un mercado estable para la bioindustria.
- Objetivos claros en la ley respecto a la introducción de bioenergéticos (etanol y biodiesel).

Respecto al ACV los resultados muestran que en cuanto a la generación de energía eléctrica la BRF H-M-S-Z-NN es más eficiente que la tecnología de IRE, ya que genera más del doble de energía eléctrica por ton de FORSU procesada, pues la BRF genera 166.4, mientras que la IRE produce 129.3 kWh netos / UF.

Sobre la sostenibilidad ambiental, los resultados de ACV comparativo realizado a las tecnologías de BRF H-M-S-Z-NN e IRE muestran que la BRF H-M-S-Z-NN representa una opción más sostenible que la IRE en el procesamiento de la FORSU en México.

Pues la suma de los efectos normalizados de la IRE fue 170, mientras que la suma de efectos normalizados de la BRF fue 45. Es decir que la IRE contamina casi 4 veces más que la BRF.

Las categorías de impacto de ecotoxicidad marina (93) y de agua dulce (58) predominan en la IRE.

Los principales residuos que contribuyen a estas categorías en la IRE son el Cr(VI) emitido al agua dulce y los metales pesados (Hg y Pb) contenidos en los gases de combustión, mientras que el As (V) y el Zn (II) emitidos contribuyen a la categoría toxicidad humana no cancerígena.

Por otro lado la BRF es la que más contribuye a la toxicidad humana, ya que predomina en la categoría de toxicidad humana cancerígena.

En caso de BRF destaca el tratamiento del  $H_3PO_4$  pues contribuye en un 60 % a la toxicidad humana cancerígena y está asociado con el uso de fosfato de sodio en la etapa Z.

Por su parte, en la categoría de toxicidad humana no cancerígena contribuye el tratamiento de residuales de carbón fósil y minería de este elemento en la etapa NN.



## 9. REFERENCIAS

- André, F. & Cerdá, E. (2006). Gestión de residuos sólidos urbanos: análisis económico y políticas públicas. [https://www.researchgate.net/publication/277260510\\_Gestion\\_de\\_residuos\\_solidos\\_urbanos\\_analisis\\_economico\\_y\\_politicas\\_publicas](https://www.researchgate.net/publication/277260510_Gestion_de_residuos_solidos_urbanos_analisis_economico_y_politicas_publicas)
- Bauer, F., Coenen, L., Hansen T., McCormick, K. & Palgan, Y. V. (2017). Technological innovation systems for biorefineries: A review of the literature. *Biofuel. Bioprod. Bior.* 11(3), 534-548. <https://doi.org/10.1002/bbb.1767>
- Biganzoli, L., Racanella, G., Marras, R. & Rigamonti, L. High temperature abatement of acid gases from waste incineration. Part II: Comparative life cycle assessment study . *Waste Manage* 2015;35:127–34.
- Buekens, A. (2013). Waste Incineration. En *Incineration Technologies* (pp. 5-26). Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5752-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5752-7_3)
- Budavari, Z., Szalay, Z., Brown, N., Malmqvist, T., Peupartier, B., Zabalza, I., Krigsvoll, G., Wetzel, C., Cai, X., Staller, H., & Tritthart, W. (2011). *Indicators and weighting systems, including normalisation of environmental profiles*. 80.
- Campos-Montiel, R.G., Razo-Rodríguez, O.E., del Almaraz-Buendía, I., Ramírez-Bibriesca, E., Soriano-Robles, R., Salinas-Martínez, J.A., Arias-Margarito, L. & González-Muñoz, S.S. (2018). Bioconversión de desperdicios vegetales a biogás a partir de microorganismos ruminales. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 34 (1), 149–155. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.13>
- Bautista S., Enjolras M., Narvaez P., Camargo M. y Morel L. (2016). Biodiesel-triple bottom line (TBL): A new hierarchical sustainability assessment framework of principles criteria & indicators (PC&I) for biodiesel production. Part II-validation. *Ecol. Indic.* 69, 803-817. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.046>
- Bazán G.R., Muñoz G. y Jesús Cuevas J. (2020). *Refinería Dos Bocas: riesgos y conjeturas*. *Energía y debate [en línea]*. <https://www.energiaadebate.com/downstream/refineria-dos-bocas-riesgos-y-conjeturas/> 24/05/2021
- BIC (2017). Biorefineries in Europe 2017. Mapping European biorefineries. Bio-Based Industries Consortium [en línea]. <https://biconsortium.eu/news/mapping-european-biorefineries> 5/21/2021
- CEDRSSA (2020). La producción y el comercio de los biocombustibles en México y en el Mundo. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural y Sustentable y la Soberanía Alimentaria. Cámara de Diputados, CDMX, México, 28pp.
- Cherubini, F., Bird, N.D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B. & Woess-Gallasch, S. (2009) Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resour Conserv Recycling* 53:434–447
- Cole-Hunter, T., Johnston, F. H., Marks, G. B., Morawska, L., Morgan, G. G., Overs, M., Porta-Cubas, A., & Cowie, C. T. (2020) The health impacts of waste-to-energy emissions: A systematic review of the literature. *Environmental Research Letters*, 15(12), 123006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abae9f>
- Curran, M. A. (1996). Environmental life-cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(3), 179-179. <https://doi.org/10.1007/BF02978949>
- Dael, M. V., Márquez, N., Reumerman, P., Pelkmans, L., Kuppens, T. & Passel, S. V. (2014). Development and techno-economic evaluation of a biorefinery based on biomass (waste) streams – case study in the Netherlands. *Biofuel. Bioprod. Bior.* 8(5), 635-644. <https://doi.org/10.1002/bbb.1460>
- Demirbas, A. (2009) Biorefineries: Current activities and future developments. *Energy Conversion and Management* 50: 2782–2801.
- Demirbas, A. (2010). Biorefinery. En: *Biorefineries: For biomass upgrading facilities*. Green Energy and Technology. (A. Demirbas, Ed.). Springer, Nueva York, EUA, pp. 75-92. [https://doi.org/10.1007/978-1-84882-721-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-84882-721-9_3)
- Di-Maria, F., Mastrantonio, M. & Uccelli, R. (2021). The life cycle approach for assessing the impact of municipal solid waste incineration on the environment and on human health. *Science of The Total Environment*, 776, 145785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145785>
- Dincer, K. (2008). Lower Emissions from Biodiesel Combustion. *Energ. Source. Part A.* 30 (10), 963-968. <https://doi.org/10.1080/15567030601082753>

- DOF (1917). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Publicada en el Diario oficial el 5 de febrero de 1917. Ciudad de México, 414 pp.
- DOF (1976). Ley Orgánica de la Administración Pública Federal. Publicada en el Diario oficial el 29 de diciembre de 1976. Ciudad de México, 156 pp.
- DOF (2013). Ley Impuesto Sobre la Renta. Publicada en el Diario oficial el 11 de diciembre de 2013. Ciudad de México, 295 pp.
- DOF (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. Publicada en el Diario oficial el 12 de julio de 2019. Ciudad de México. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5565599](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565599) 12/09/2020
- Dong, J., Jeswani, H. K., Nzihou, A. & Azapagic, A. (2020). The environmental cost of recovering energy from municipal solid waste. *Applied Energy*, 267, 114792. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114792>
- Durán, A. (2013). Mexico city's municipal solid waste characteristics and composition analysis. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29, 39-46.
- Eide, A., FAO (2008). The right to food and the impact of liquid biofuels (agrofuels). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado 05 de marzo de 2021, a partir de <http://www.fao.org/3/ap550e/ap550e.pdf>
- Escamilla-Alvarado, C. (2009). Proceso integrado para producción de energía y enzimas a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. Tesis de Maestría. Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, CINVESTAV. CDMX, México.
- Escamilla-Alvarado, C., Ríos-Leal, E., Ponce-Noyola, M.T. & Poggi-Varaldo, H.M. (2012) Gas biofuels from solid substrate hydrogenogenic–methanogenic fermentation of the organic fraction of municipal solid waste. *Process Biochemistry* 47: 1572–1587
- Escamilla-Alvarado, C., Ponce-Noyola, M.T., Ríos-Leal, E., et al. (2013a) A multivariable evaluation of biohydrogen production by solid substrate fermentation of organic municipal wastes in semi-continuous and batch operation. *International Journal of Hydrogen Energy* 38(28): 12527–12538.
- Escamilla-Alvarado, C. (2014). Integración de un proceso modelo de biorrefinería para la obtención de hidrógeno, metano, enzimas y sacarificados, a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral. Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, CINVESTAV, CDMX, México.
- Escamilla-Alvarado, C., Ponce-Noyola, M.T., Poggi-Varaldo, H.M., Ríos-Leal, E., García-Mena, J. & Rinderknecht-Seijas, N. (2014b). Energy analysis of in-series biohydrogen and methane production from organic wastes. *International Journal of Hydrogen Energy* 39(29): 16587-16594.
- Escamilla-Alvarado, C., Poggi-Varaldo, H. M., & Ponce-Noyola, M. T. (2017). Bioenergy and bioproducts from municipal organic waste as alternative to landfilling: a comparative life cycle assessment with prospective application to Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(33), 25602-25617.
- Espinoza-Pérez A.T., Camargo M., Narváez-Rincón P.C. y Alfaro-Marchant M. (2017). Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: A bibliographic analysis. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 69, 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.084>
- European Commission. Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration. Brussels; 2006
- FAO (2000). The energy and agriculture nexus. Food and Agriculture Organization of the United Nations [en línea] <http://www.fao.org/3/x8054e/x8054e00.htm> 30/01/2020
- FAO (2007). Recent trends in the law and policy of bioenergy production, promotion and use. Food and Agriculture Organization of the United Nations [en línea]. <http://www.fao.org/3/a1452e/a1452e00.htm> 30/08/202
- FAO (2009). Case studies on bioenergy policy and law: Options for sustainability. Food and Agriculture Organization of the United Nations [en línea]. <http://www.fao.org/3/i1285e/i1285e.pdf> 5/07/2020
- Fava, F., Totaro, G., Diels, L., Reis, M., Duarte, J., Carioca, O. B. & Ferreira, B. S. (2015). Biowaste biorefinery in Europe: opportunities and research & development needs. *New Biotechnology*, 32(1), 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.11.003>
- Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D. & Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessments. *Journal of Environmental Management* 91, 1–21.

- Fruergaard, T. & Astrup, T. (2011). Optimal utilization of waste-to-energy in an LCA perspective. *Waste Management*, 31, 572-582. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.009>
- Fava, F., Totaro, G., Diels, L., et al. (2013) Biowaste biorefinery in Europe: opportunities and research & development needs. *New Biotechnology*. Epub ahead of print 24 November 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nbt.2013.11.03>.
- Fruergaard, T. & Astrup, T. (2011). Optimal utilization of waste-to-energy in an LCA perspective. *Waste Management*, 31, 572-582. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.009>
- G7 Germany Summit (2015). Leader's Declaration G7 Germany Summit [en línea]. [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/7320LEADERS%20STATEMENT\\_FINAL\\_CLEAN.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/7320LEADERS%20STATEMENT_FINAL_CLEAN.pdf) 16/05/2021
- Grieco, E. & Poggio, A. (2009). Simulation of the influence of flue gas cleaning system on the energetic efficiency of a waste-to-energy plant. *Appl Energy*;86:1517–23.
- Goldemberg, J. (2000). World energy assessment: Energy and the challenge of sustainability. United Nations Development Programme. New York, EUA, 506 pp.
- Guinée, J.B. (2004). Handbook on Life Cycle Assessment, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, Kluwer Academic Publishers.
- Guo, M., Murphy, R.J. (2012) LCA data quality: Sensitivity and uncertainty analysis. *Sci Total Environ* 435–436:230–243
- Hamelers, H. V. M., Sleutels, T.H.J.A., Jeremiasse, A.W., Post, J.W., Strik, D.P.B.T.B. & Rozendal, R.A. (2009). In: K. Rabaey, L. T. Angenent, U. Schröder, J. Keller (Eds.). (2009). Bioelectrochemical systems: From extracellular electron transfer to biotechnological application, *IWA Publishing*, London, UK.
- Hamelers, H. V., Ter Heijne, A., Sleutels, T. H., Jeremiasse, A. W., Strik, D. P., & Buisman, C. J. (2010). New applications and performance of bioelectrochemical systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(6): 1673-1685.
- Hauschild, Z. M., Ralph, K.R., Stig, I.O. (2018). *Life Cycle Assessment* (1.<sup>a</sup> ed.). Springer Cham. Recuperado 23 de abril de 2018, a partir de <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-56475-3>
- IEA (2017), Delivering Sustainable Bioenergy, IEA Technology Roadmaps, IEA, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264287600-en>.
- INEGI (2012). Censo Nacional de Residuos Sólidos Urbanos Municipales, 2010. Elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para la secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT.
- INEGI (2016) Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, United Kingdom and New York, NY, USA
- IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. [en línea] <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> 03/04/20
- IRENA (2013). Statistical issues: bioenergy and distributed renewable energy. International Renewable Energy Agency. [en línea]. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/Statistical-issues\\_bioenergy\\_and\\_distributed-renewable\\_energy.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/Statistical-issues_bioenergy_and_distributed-renewable_energy.pdf) 06/11/20
- IRENA (2015). Renewable Energy Prospects: Mexico. International Renewable Energy Agency [en línea]. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA\\_REmap\\_Mexico\\_report\\_2015.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Mexico_report_2015.pdf) 09/09/20
- IRENA (2018). Renewable Energy Prospects for the European Union. International Renewable Energy Agency [en línea]. <https://www.irena.org/publications/2018/Feb/Renewable-energy-prospects-for-the-EU> 10/05/21
- ISO (2006a) ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment- Principles and framework. The International Organization for Standardization, Geneva
- ISO (2006b) ISO 14044. Environmental management - Life cycle assessment- Requirements and guidelines. The International Organization for Standardization, Geneva
- Jungbluth N, Chudacoff M, Dauriat  
Kedrowski, C. & Chromec, P. (2012) Hitachi Zosen Inova Technology. Hitachi Zosen Inova U.S.A. LLC, Norcross, GA, USA Robert A. Meyers (ed.), Encyclopedia of Sustainability Science and Technology,

- DOI 10.1007/978-1-4419-0851-3, Springer Science+Business Media. Recuperado 23 de abril de 2018, a partir de [http://www.hz-inova.com/cms/en/home?page\\_id=250#grate](http://www.hz-inova.com/cms/en/home?page_id=250#grate)
- Kirtay, E. (2011) Recent advances in production of hydrogen from biomass. *Energy Conversion and Management* 52: 1778–1789.
- Koppmann, R. (2007). *Volatile organic compounds in the atmosphere* (1st ed edición). Blackwell Pub. ISBN 978-0-470-99415-3. OCLC 608623032.
- Kumar, A., Samadder, S.R. (2017) A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste, *Waste Management*, Volume 69, Pages 407-422, ISSN 0956-053X. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- LGEEPA (2014) Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera. Recuperado 23 de abril de 2018, a partir de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131860/40.\\_REGLAMENTO\\_DE\\_LA\\_LGEEPA\\_EN\\_MATERIA\\_DE\\_PREVENCIÓN\\_Y\\_CONTROL\\_DE\\_LA\\_CONTAMINACIÓN\\_DE\\_LA\\_ATMÓSFERA.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131860/40._REGLAMENTO_DE_LA_LGEEPA_EN_MATERIA_DE_PREVENCIÓN_Y_CONTROL_DE_LA_CONTAMINACIÓN_DE_LA_ATMÓSFERA.pdf)
- Li, A., Antizar-Ladislao, B. & Khraisheh, M. (2007). Bioconversion of municipal solid waste to glucose for bioethanol production. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 30, 189-196.
- Liu, D., Wang, S., Xue, R., Gao, G., & Zhang, R. (2021). Life cycle assessment of environmental impact on municipal solid waste incineration power generation. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(46), 65435-65446. Recuperado 23 de abril de 2018, a partir de <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15483-0>
- Lou, Z., Bilitewski, B., Zhu, N., Chai, X., Li, B., Zhao, &, (2015) Environmental impacts of a large-scale incinerator with mixed MSW of high water content from a LCA perspective. *Journal of Environmental Sciences* 30, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.10.004>
- May, H. D., Evans, P. J., & LaBelle, E. V. (2016). “The bioelectrosynthesis of acetate”. *Current Opinion in Biotechnology*, 42: 225-233.
- Maresca, A., Bisinella, V., & Astrup, T. F. (2022) Life cycle assessment of air-pollution-control residues from waste incineration in Europe: Importance of composition, technology and long-term leaching. *Waste Management*, 144, 336-348. <https://doi.org/10.1016/j.wasman>.
- Menrad, K., Klein, A. & Kurka, S. (2009). Interest of industrial actors in biorefinery concepts in Europe. *Biofuel. Bioprod. Bior.* 3(3), 384-394. <https://doi.org/10.1002/bbb.144>
- Mohan, S.V., Nikhil, G. N., Chiranjeevi, P., Nagendranatha, R.C., Rohit, M. V., Kumar, A. N. & Sarkar, O. (2016). Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy: Critical review and future perspectives. *Bioresource Technol.* 215, 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.130>
- Monni, S., (2012) From landfilling to waste incineration: implications on GHG emissions of different actors. *Int. J. Greenhouse Gas Control* 8, 82–89.
- Naciones Unidas (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. [en línea]. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf> 09/09/2020
- Naciones Unidas (2015). Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Asamblea General de las Naciones Unidas. Recuperado 10 de septiembre de 2021, a partir de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Neuwahl, F., Cusano, G., Gómez Benavides, J., Holbrook, S. & Roudier, S. (2019). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), EUR 29971 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-12993-6 (online), doi:10.2760/761437 (online), JRC118637.
- Niessen, W. R. (2002). *Combustion and incineration processes*. (Tercera). Marcel Dekker Inc. Andover, Massachusetts, 708 p.
- Nizami, A. S., Rehan, M., Waqas, M., Naqvi, M., Ouda, O. K. M., Shahzad, K., Miandad, R., Khan, M. Z., Syamsiro, M., Ismail, I. M. I. & Pant, D. (2017). Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries. *Bioresource Technol.* 241, 1101-1117. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.097>
- Office of the Federal Register (2000). Public Law 106 - 224 - Agricultural Risk Protection Act of 2000. U.S. Government Printing Office, 19 Jun 2000.

- Office of the Federal Register (2002). Public Law 107 - 171 - Farm Security and Rural Investment Act of 2002. U.S. Government Printing Office, 12 May 2002.
- Office of the Federal Register (2005). Public Law 109 - 58 - Energy Policy Act of 2005. U.S. Government Printing Office, 7 Aug 2005.
- Office of the Federal Register (2007). Public Law 110 - 140 - Energy Independence and Security Act of 2007. U.S. Government Printing Office, 18 Dec 2007.
- Office of the Federal Register (2008). Public Law 110 - 246 - Food, Conservation, and Energy Act of 2008. U.S. Government Printing Office, 17 Jun 2008.
- Office of the Federal Register (2008). Public Law 110 - 234 - Food, Conservation, and Energy Act of 2008. U.S. Government Printing Office, 21 May 2008.
- Office of the Federal Register (2009). Public Law 111 - 5 - American Recovery and Reinvestment Act of 2009. U.S. Government Printing Office, 16 Feb 2009.
- Office of the Federal Register (2012). Public Law 112 - 55 - Consolidated and Further Continuing Appropriations Act, 2012. U.S. Government Printing Office, 17 Nov 2011.
- Office of the Federal Register (2012). Public Law 112 - 240 - American Taxpayer Relief Act of 2012. U.S. Government Printing Office, 1 Jan 2013.
- Office of the Federal Register (2013). Public Law 113 - 6 - Consolidated and Further Continuing Appropriations Act, 2013. U.S. Government Publishing Office, 25 Mar 2013.
- Office of the Federal Register (2014). Public Law 113 - 79 - Agricultural Act of 2014. U.S. Government Publishing Office, 6 Feb 2014.
- Office of the Federal Register (2015). Public Law 113 - 235 - Consolidated and Further Continuing Appropriations Act, 2015. U.S. Government Publishing Office, 15 Dec 2014.
- Office of the Federal Register (2016). Public Law 114 - 113 - Consolidated Appropriations Act, 2016. U.S. Government Publishing Office, 17 Dec 2015.
- Office of the Federal Register (2017). Public Law 115 - 31 - Consolidated Appropriations Act, 2017. U.S. Government Publishing Office, 4 May 2017.
- Office of the Federal Register (2018). Public Law 115 - 334 - Agriculture Improvement Act of 2018. U.S. Government Publishing Office, 19 Dec 2018.
- Parajuli R., Dalgaard T., Jorgensen U., Adamsen A.P.S., Knudsen M.T., Birkved M., Gylling M. y Schjorring J.K. (2015). Biorefining in the prevailing energy and materials crisis: a review of sustainable pathways for biorefinery value chains and sustainability assessment methodologies. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 43, 244–263. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.041>
- Parisi C. (2020). Distribution of the bio-based industry in the EU. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/745867>
- Parlamento Europeo (2021). El poder Legislativo. ¿Cómo se desarrolla el trabajo legislativo? [en línea]. <https://www.europarl.europa.eu/about-parliament/es/powers-and-procedures/legislative-powers/8/05/2021>
- Pérez-Denicia E., Fernández-Luqueño F., Vilariño-Ayala D., Montañó-Zetina M. y Maldonado-López A. (2017). Renewable energy sources for electricity generation in Mexico: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 78, 597–613. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.009>
- Poggi-Varaldo, H.M., Muñoz-Paez, K.M., Escamilla-Alvarado, C., Robledo-Narváez, P.N., Ponce-Noyola, M.T., Calva, G., Ríos-Leal, E., Galíndez-Mayer, J, Estrada-Vázquez, C., Ortega-Clemente, A., Rinderknecht-Seijas, N.F. (2014). Biohydrogen, biomethane and bioelectricity as crucial components of biorefinery of organic wastes: A review. *Waste Management & Research* 34 (1): 1–13.
- Poggi-Varaldo, H.M. (2019) Informe Análisis del Ciclo de Vida de una biorrefinería que procesa la fracción orgánica de RSU y produce bioenergías, ácidos orgánicos, enzimas y nanopartículas. México, 90pp.
- PRé, various authors (2019). SimaPro Database Manual Methods Library. Report v 4.14.2, PRé Sustainability, Amersfoort, The Netherlands.
- Rabaey, K. & Rozendal, R.A. (2010). Microbial electrosynthesis—revisiting the electrical route for microbial production. *Nature Reviews Microbiology*, 8(10): 706-716.
- Regulation (EU) No 1291/2013 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2013 establishing Horizon 2020 - the Framework Programme for Research and Innovation (2014-2020) and repealing Decision No 1982/2006/EC Text with EEA relevance, Pub. L. No. 32013R1291, 347 OJ L (2013). Recuperado 23 de abril de 2018, a partir de <http://data.europa.eu/eli/reg/2013/1291/oj/eng>
- Riber, C. (2007) Technical University of Denmark, Institute of Environment & Resources, DTU, M & R, & E & R.. *Evaluation of waste specific environmental impacts from incineration*. Kgs. Lyngby.

- Romero-Cedillo, L., Poggi-Varaldo, H. M., Matsumoto-Kuwuabara, Y., García-Rocha, M., Ponce-Noyola, M.T., Escamilla-Alvarado, C., Bretón-Deval, L. & Santoyo-Salazar, J. (2018). Biological synthesis of iron nanoparticles from anaerobic consortia grown in anaerobic fluidized bed reactors from
- Sadhukhan, J., Martínez-Hernández, E., Murphy, R. J., Ng, D. K. S., Hassim, M. H., Siew, K. & Andiappan, V. (2018). Role of bioenergy, biorefinery and bioeconomy in sustainable development: Strategic pathways for Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1966-1987. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.007>
- Sala S., Crenna E., Secchi M. & Pant, R. (2017). Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment, EUR (28984), Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-77213-9, doi:10.2760/88930, JRC109878
- SEDEMA (2015) Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-024-AMBT-2013, que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del Distrito Federal. Recuperado 25 de junio de 2018, a partir de <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/images/infografias/NADF-024-AMBT-2013.pdf>
- SAGARPA (2001). Ley de Desarrollo Rural Sustentable. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Publicada por el Diario Oficial de la Federación el 7 de diciembre del 2001. Ciudad de México, México, 72 pp.
- SEMARNAT (1988). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Publicada por el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero del 1988. Ciudad de México, México, 128 pp.
- SEMARNAT (2002). Guía para la presentación de la manifestación de impacto ambiental aprovechamientos forestales modalidad: particular. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Publicada por el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero del 1988. Ciudad de México, México, 105 pp.
- SEMARNAT (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Publicada por el Diario Oficial de la Federación el 18 de enero del 2021. Ciudad de México, México, 56 pp.
- SEMARNAT (2012). Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de evaluación ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Publicado por el Diario Oficial de la Federación el 30 de mayo del 2000. Ciudad de México, México, 29 pp.
- SEMARNAT (2012). Ley General de Cambio Climático. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Publicada por el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio del 2012. Ciudad de México, México, 64 pp.
- SEMARNAT (2012). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [en línea]. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/CD001408.pdf> 8/10/2020
- SEMARNAT (2017) Análisis de instrumentos de política pública para estimular la valorización energética de residuos urbanos en México y propuestas para mejorarlos y ampliarlos. Recuperado 23 de abril de 2018, a partir de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/269184/Analisis\\_de\\_instrumentos.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/269184/Analisis_de_instrumentos.pdf)
- SEMARNAT (2018). Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2017-2018. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México, 82 pp.
- SEMARNAT (2019). Visión Nacional hacia una Gestión Sustentable: Cero Residuos. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México, 16 pp.
- SEMARNAT (2020). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México, 274 pp.
- Senado de la República (2021). Proceso legislativo [en línea]. [https://www.senado.gob.mx/64/sobre\\_el\\_senado/proceso\\_legislativo](https://www.senado.gob.mx/64/sobre_el_senado/proceso_legislativo) 8/05/2021
- SENER (2008). Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos. Secretaría de Energía. Publicada por el Diario Oficial de la Federación el 1 de febrero del 2008. Ciudad de México, México, 12 pp.
- SENER (2009). Reglamento de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. Secretaría de Energía. Publicado por el Diario Oficial de la Federación el 18 de junio del 2009. Ciudad de México, México, 20 pp.

- SENER (2012). Ley para el Aprovechamiento Sustentable de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética. Secretaría de Energía. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 12 de enero del 2012. Ciudad de México, México 11 pp.
- SENER (2014) Estrategia nacional de energía 2014-2028. Secretaría de Energía [en línea] <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/214/ENE.pdf> 30/09/19
- SENER (2015). Ley de Transición Energética. Secretaría de Energía. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre del 2015. Distrito Federal, México, 31 pp.
- SENER (2015). Plan Nacional de Desarrollo 2023-2018. Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables. [en línea]. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/249/PEAER-2014.pdf> 27/03/2020
- SENER (2016). Prospectiva de energías renovables 2016-2030. Secretaría de Energía [en línea]. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva\\_de\\_Energ\\_as\\_Renovables\\_2016-2030.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2016-2030.pdf) 15/05/2020
- SENER (2016). Balance nacional de energía 2015. Secretaría de Energía [en línea]. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/248570/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2015\\_\\_2\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/248570/Balance_Nacional_de_Energ_a_2015__2_.pdf) 09/09/2020
- SENER (2019). Reporte anual de Potencial de Mitigación de GEI. Secretaría de Energía [en línea]. <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/reportes-anuales-del-potencial-de-mitigacion-de-gei-en-el-sector-electrico-y-su-metodologia?idiom=es> 5/03/2021
- SENER (2020). Balance Nacional de Energía 2019. Secretaría de Energía [en línea]. <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia-2019> 10/05/2021
- Shi, D.Z., Wu, W.X., Lu, S.Y., Chen, T., Huang, H.L., Chen, Y.X., et al., 2008. Effect of MSW source-classified collection on the emission of PCDDs/Fs and heavy metals from incineration in China. *J. Hazard. Mater.* 153 (1–2), 685–694.
- Sotelo-Navarro P.X., Poggi-Varaldo H.M. y Ponce-Noyola M.T. (2021). Situación de las biorrefinerías en México y países selectos: una revisión. *Memorias. VI Congreso Internacional de Química e Ingeniería Verde. Modalidad virtual 8 al 10 de septiembre, 2021.*
- Tarapués, V.M., Muñoz, L.I.R., Rodas, M.H., Ayerbe, M.A.G. & Rebellón, L.F.M. (2020). Estado de la valorización de biorresiduos de origen residencial en grandes centros urbanos. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 36, 755–774. <https://doi.org/10.20937/RICA.53341>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Eliassen, R. (1977) *Solid wastes: Engineering principles and management issues*, McGraw-Hill, Inc.
- Tchobanoglous, G. & Kreith, F. (2002) *Handbook of Solid Waste Management*. 2nd Edition, McGraw Hill Handbooks. New York.
- Turconi, R., Butera, S., Boldrin, A., Grosso, M., Rigamonti, L. & Astrup, T. (2011). Life cycle assessment of waste incineration in Denmark and Italy using two LCA models. *Waste Management & Research*, 29(10\_suppl), S78–S90. <https://doi.org/10.1177/0734242X11417489>
- UE (2006). Decisión 1982/2006/CE. Relativa al Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea para acciones de investigación, desarrollo tecnológico y demostración (2007 a 2013). Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. Publicada por el Diario Oficial de la Unión Europea el 18 de diciembre del 2006.
- UE (2013). Decisión 2013/743/EU. Por la que se establece el Programa Específico por el que se ejecuta Horizonte 2020 – Programa Marco de Investigación e Innovación (2014-2020). Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. Publicada por el Diario Oficial de la Unión Europea el 3 de diciembre del 2013.
- UE (2013). Reglamento (UE) n° 1291/2013 . Programa Marco de Investigación e Innovación (2014-2020). Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. Publicada por el Diario Oficial de la Unión Europea el 11 de diciembre del 2013.
- UE (2014). Reglamento (UE) N° 560/2014 del consejo por el que se establece la Empresa Común para las Bioindustrias. Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. Publicada por el Diario Oficial de la Unión Europea el 6 de mayo del 2014.
- UE (2021). Textos consolidados. EUR-Lex El acceso al Derecho de la Unión Europea [en línea]. [https://eur-ex.europa.eu/content/legis/avis\\_consolidation.html?locale=es](https://eur-ex.europa.eu/content/legis/avis_consolidation.html?locale=es) 12/05/2021
- UN FCCC (2015). Adoption of the Paris agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. [en línea]. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. 12/05/2021

- U.S. Congress (2020). Congress.gov Library of Congress. Legislative Search Results [en línea]. <https://www.congress.gov/6/08/2020>
- U.S. House of Representatives (2021). The Legislative Process. How are laws made? United States House of Representatives [en línea]. <https://www.house.gov/the-house-explained/the-legislative-process> 16/05/2021
- Vermeulen, I., Van-Caneghem, J., Block, C., Dewulf, W. & Vandecasteele, C. (2012). Environmental impact of incineration of calorific industrial waste: rotary kiln vs. cement kiln. *Waste Manag.* 32 (10), 1853–1863.
- World Energy Resources, (2016). World Energy Council, Waste to Energy. Recuperado 09 de abril de 2022, a partir de <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>
- WRAP, (2006). Environmental benefits of recycling: an international review of life cycle comparisons for key materials in the UK recycling sector. Recuperado 18 de marzo de 2019, a partir de [http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Environmental\\_benefits\\_of\\_recycling\\_2010\\_update.3b174d59.8816.pdf](http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Environmental_benefits_of_recycling_2010_update.3b174d59.8816.pdf)
- Xi, J.Q., Jiang, H.H., Wang, Z.G. & Cao, J.S. (2003) Status quo of municipal solid waste disposal in China and related issues. *Environ. Monit. China* 19 (1), 21–23.
- Yáñez-Vergara, A.G.; Sotelo-Navarro, P.X., Poggi-Varaldo, H.M., Calderón-Salinas, J.V., Sánchez-Pérez, R. & Matsumoto-Kuwabara, Y. (2022) Análisis de legislación de biorrefinerías en México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 38, 111–142. <https://doi.org/10.20937/RICA.54314>
- Wang H. (2011). Building a regulatory framework for biofuels governance in China: Legislation as the starting point. *Nat. Resour. Forum.* 35 (3), 201-212. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2011.01390.x>
- Zhao, Y., Cao, W., Wang, Z., Zhang, B., Chen, K. & Ouyang, P. (2016). Enhanced succinic acid production from corncob hydrolysate by microbial electrolysis cells. *Bioresource Technology*, 202: 152-157.



## **Anexo 1. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección del Medio Ambiente**

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección del Medio Ambiente (LGEEPA) emitida el 28 de enero de 1988, tiene por objetivo instaurar el derecho de toda persona a vivir de manera adecuada en un ambiente que garantice su desarrollo, salud y bienestar (Art. 1º LGEEPA). Establece que el uso de los recursos naturales renovables debe garantizar la diversidad de los recursos y la sostenibilidad (Art. 15 fracción VII y XII LGEEPA 1988).

En la sección III de la ley se estipula que el gobierno federal y las autoridades estatales tienen la tarea de diseñar, desarrollar y aplicar incentivos económicos para cumplir con los objetivos de la política ambiental. Además, otorga incentivos fiscales en favor de quienes realizan investigaciones tecnológicas que conducen a una reducción de contaminantes y preserven el equilibrio ecológico (Art. 21 LGEEPA 1988)

La ley exige que las autoridades federales, estatales y locales desarrollen políticas sólidas que incluyan impuestos económicos, financieros y fiscales y esquemas basados en el mercado que otorgan alta prioridad a las actividades relacionadas con "la investigación e implementación de mecanismos de ahorro de energía y el uso de fuentes de energía que minimicen la contaminación" (art. 22bis).

La ley también establece que la SEMARNAT supervisara y autorizará las obras que puedan causar algún desequilibrio ecológico (artículo 28 fracción V).

También la SEMARNAT debe proveer la protección del suelo, prácticas de restauración en actividades agrícolas, y realizar estudios de evaluación de impacto ambiental (art. 104).

La producción de bioenergía a partir de RSU , deberá ser direccionada por la SEMARNAT (art. 138).

## **Anexo 2. Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos**

La LPDB fue emitida en el año 2008 por la SENER.

### *Objetivos de la ley*

El objetivo de la ley es alentar el desarrollo y la promoción de la bioenergía para diversificar el consumo de energía en el país y lograr un desarrollo sostenible mediante el apoyo al sector agrícola.

La ley promueve la producción de bioenergía a partir de procesos agrícolas, forestales, biotecnológicos y enzimáticos.

En el artículo 1 de la ley se proponen varios objetivos:

- Apoyar al desarrollo rural y el de las comunidades rurales
- Reducir las emisiones atmosféricas y los GEI
- Coordinar las acciones del gobierno federal, los estados, el Distrito Federal y los municipios, así como las contribuciones del sector privado para el desarrollo de la bioenergía

### *Estructura para implementar la ley*

Se crea la Comisión Intersecretarial de Bioenergéticos, que incluye representantes de SEMARNAT, SAGARPA, SENER, el Secretario de Economía y la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (art. 8).

La comisión tiene el objetivo de: monitorear la implementación de la ley; formar parte de la redacción de programas producción, comercialización y uso de bioenergía; establecer los principios para la celebración de acuerdos entre los distintos niveles de gobierno; (iv) establecer las bases del sector privado en la implementación de la ley, la promoción de las inversiones necesarias y el uso eficiente de las tecnologías para la producción y comercialización de bioenergía (art. 8).

### *Aspectos ambientales, sociales y económicos.*

La ley establece que SENER establecerá el programa de lanzamiento de bioenergía que contempla la introducción de la oxigenación de la gasolina mediante la mezcla con etanol y biodiesel (Título II, Capítulo III, art.12).

En el artículo 13 estipula que la SEMARNAT aplicará las regulaciones bajo la Ley de Bioseguridad y Organismos Genéticamente Modificados (OGM) (DOF 2005). También establece que la SEMARNAT debe supervisar que las leyes ambientales sean aplicadas a los programas y actividades para sean llevados a cabo de manera sostenible (art. 13). Además la SAGARPA es la responsable de evaluar el impacto de los programas de bioenergía en materia de seguridad alimentaria (art. 11).

La ley establece que SAGARPA y SENER que apoyarán la investigación científica y tecnológica para que la producción de bioenergía esté en armonía con el medio ambiente (art. 19).

Por su parte la SENER es la encargada de otorgar los permisos relacionados con actividades y servicios de producción, distribución y comercialización de bioenergía (art.24).

La ley establece que las Secretarías que conforman la Comisión de Bioenergía deben generar un plan de trabajo con el propósito de mejorar la producción sostenible de cultivos (bioenergéticos) (art.17). Además deben apoyar empresas rurales y establece que el 30 % de los accionistas deben ser productores de cultivos (art. 17).

La LPDB dentro del Título III Capítulo 1, ordena a las Secretarías federales, los Gobiernos Estatales y los Distritos Federales deben fomentar la creación de infraestructura para la producción de bioenergía. Además, promueve incentivos a quienes contribuyen al desarrollo de la industria de la bioenergía (art. 17 y 18).

### *Investigación y desarrollo*

Respecto a la investigación y desarrollo el artículo 19 estipula que SAGARPA y SENER deben promover la producción y uso de bioenergía.

En esta línea la SENER debe introducir la bioenergía y biocombustibles (que no sean etanol y biodiesel) (art.12). También dispone a la Comisión de Bioenergía la tarea de promover la investigación científica y la capacitación en bioenergía (art. 20).

Por su parte el artículo 25 establece que se sancionarán actividades o servicios sin permiso, así como también las multas y el cierre parcial, permanente o temporal de las instalaciones (art. 26).

### **Anexo 3. Ley General del Cambio Climático**

La LGCC fue publicada el 6 de junio del 2012, con una última reforma el 6 de noviembre del 2020.

#### *Objetivos de la ley*

El objetivo de la ley es emitir políticas públicas y acciones para minimizar las consecuencias derivadas del cambio climático. Esto en concordancia para que México cumpla con el Acuerdo de París (art. 2).

#### *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*

En función con el artículo 13 de la ley, se crea el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

Es responsabilidad del INECC coordinar, promover, desarrollar la investigación y tecnología relacionada con la política nacional en materia de bioseguridad, desarrollo sostenible, protección del medio ambiente preservación y restauración del equilibrio ecológico (art. 22).

En el artículo 15, se describen los objetivos del INECC:

- Coordinar estudios y proyectos de investigación relacionados con el cambio climático, protección al ambiente y restauración del equilibrio ecológico.
- Realizar análisis de prospectiva sectorial y evaluar el cumplimiento de los objetivos previstos en esta ley. También le corresponde supervisar las metas y acciones contenidas en la Estrategia Nacional.

#### *Instrumentos de planeación de la Política Nacional de Cambio Climático*

La Política Nacional de Cambio Climático es coordinada por el Sistema Nacional de Cambio Climático (art.38). Tiene como propósito establecer programas e instrumentos económicos de política y regulatorios para la reducción y monitoreo de emisiones específicas (art.31). También promueve la seguridad alimentaria, así como la preservación de los ecosistemas y recursos naturales (art 27).

Las políticas públicas basadas en una economía sostenible tienen por objetivo, la protección del medio ambiente y reducción de GEI. Fomenta incentivos económicos y fiscales a empresas socialmente responsables con el ambiente y que desarrollen tecnologías de energía renovable (art.33). También el artículo 93 menciona estímulos fiscales a las actividades relacionadas con la adaptación al cambio climático y la mitigación de GEI.

Por su parte la SENER debe a su vez establecer políticas e incentivos para fomentar a las tecnologías limpias (art.34). Además, en conjunto con la SHCP incitaran fiscal y financieramente a las empresas a formar parte de proyectos de reducción de emisiones (art.36).

La SEMARNAT en conjunto con el INECC deben diseñar la Estrategia Nacional, con el propósito de dirigir la política nacional hacia una economía sostenible (art.60).

La ley implementa el Fondo de cambio climático, el cual promueve actividades dirigidas a mitigar el cambio climático (art.80).

La ley menciona que la Federación y las entidades federativas deben generar instrumentos económicos, con el propósito de incentivar el cumplimiento de los objetivos de la política nacional en materia de cambio climático (art.91), mediante el financiamiento de proyectos, investigación y tecnología para el desarrollo de bajas emisiones en carbono (art.92).

#### **Anexo 4. Ley de Transición Energética**

La Ley de Transición Energética- LTE emitida el 24 de diciembre del 2015, tiene por objetivo regular el aprovechamiento de la energía de manera sostenible y reducir las emisiones provenientes de la industria eléctrica (art.1). Esto en concordancia con el aprovechamiento sostenible (recursos renovables, residuos) de la energía en el consumo final y en los procesos involucrados (art.2).

La ley también establece que la SENER promoverá la generación eléctrica proveniente de fuentes de energía limpias aprobados por la LGCC (art.4). Aunado a esto, deberán generar estrategias con políticas y medidas para impulsar el aprovechamiento energético de recursos renovables y sustituyan a los combustibles fósiles (art. 5).

En el artículo 10 de esta ley se establece que la SENER, la CRE, el CENACE y la CONUEE deberán: establecer la normatividad y los métodos de instalación de sistemas de generación limpia, así como también elaborar las bases para la certificación de empresas y su personal en este tema. Además, deberán proponer mecanismos de apoyo (fiscales o financieros).

La ley estipula que se deberá generar una “Estrategia” que tenga por objetivo fomentar la reducción de emisiones contaminantes derivadas de la industria eléctrica y minimizar la dependencia del país de los combustibles fósiles como fuente primaria de energía (art.27). Deberán destinarse fondos necesarios para realizar dicha Estrategia, mediante programas en pro de la transición energética y el aprovechamiento sostenible de la energía (art.48).

Respecto al financiamiento para el aprovechamiento sostenible de la energía los objetivos estipulan que se deberán sustituir los equipos y realizar las mejoras necesarias para hacer más eficiente el consumo energético. Además, menciona la instalación de equipos que permitan aprovechar a los hogares las fuentes de energía renovables (art.55).

La SENER deberá establecer las obligaciones para adquirir los Certificados de Energías Limpias (art.68).

La ley establece que la SENER en conjunto con el CONACYT, promoverán la investigación aplicada y el desarrollo de tecnologías en materia de Energías Limpias y

Eficiencia Energética (art. 75). Poniendo especial atención en la generación de empleos (art.75).

A partir de esto, es creado el Sistema Nacional de Información Energética con el objetivo de: registrar, organizar y difundir la información referente al aprovechamiento sostenible de la energía (art.98).

La ley establece que la excelencia en eficiencia energética es un proceso de certificación voluntario, para productos y edificaciones que cumplan con los más altos estándares de eficiencia energética (art.107), esta certificación estará a cargo de la SENER, con el apoyo técnico de la CONUEE (art.108).

La Estrategia Nacional de Cambio Climático emitida en el 2007, establece el objetivo de instalar una capacidad de 7000 MW para generar 16000 GWh por año, a partir de energías renovables (excluyendo grandes proyectos hidroeléctricos).

La Estrategia también describe instrucciones para futuras acciones en la producción y uso de energía. Establece incentivos fiscales para promover inversiones en proyectos de energía sostenible; eliminando los subsidios al consumo y la producción de energía a partir de combustibles fósiles; promoción de la producción de electricidad a partir de fuentes renovables; mejorar la participación del sector privado en la producción de energía de baja intensidad, en particular a partir de energías renovables; y apoyando la investigación en tecnologías de baja intensidad energética, en energías renovables particulares (Estrategia Nacional de Cambio Climático 2007).

Posteriormente el 3 de junio de 2013 se publicó el Acuerdo por el que se expide la Estrategia Nacional de Cambio Climático como instrumento de planeación nacional en el mediano y largo plazo.

La Visión de la Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión10-20-40, tiene por objetivo (SEMARNAT 2013),:

*“La visión de largo plazo de este instrumento rector plantea que el país crecerá de manera sostenible y promoverá el manejo sustentable y equitativo de sus recursos naturales, así como el uso de energías limpias y renovables que le permitan un desarrollo con bajas emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero”.*

## **Anexo 5. Programa Nacional para la Prevención y Gestión integral de los Residuos 2017-2018.**

El PNPGIR fue presentado por primera vez en el año 2009, su elaboración fue encabezada por la SEMARNAT (según lo dispuesto en la LGPGIR). Además, es de relevancia para el desarrollo integral del país (PNPGIR 2018).

El PNPGIR tiene por objetivo facilitar la reinserción de los RSU a las cadenas productivas y la minimización de su disposición final, aprovechando al máximo su valorización (material y energética) (2018).

La LGPGIR en el año 2003, sentó las bases en el manejo de los residuos en México, mediante el desarrollo de instrumentos jurídicos a nivel nacional, estatal y municipal (PNPGIR 2018).

En el capítulo 1 se refiere a la importancia de promover la prevención, aprovechamiento, tratamiento y manejo adecuado de los RSU, por medio de la participación de los diferentes sectores de la población, la incorporación de nuevas tecnologías y de la legislación aplicable (PNPGIR 2018).

También menciona que el reciclaje en México se estima cercano al 9%, por debajo de países como: Alemania, Bélgica, Suecia y Dinamarca (se encuentran por encima del 35%) los cuales se caracterizan por invertir en el desarrollo de infraestructura para la valorización de los RSU (PNPGIR 2018).

El PNPGIR es el encargado de medir el número de infraestructuras desarrolladas para el tratamiento anaerobio de la FORSU, con aprovechamiento energético construidos. Al respecto menciona que actualmente en México el uso de tecnologías de tratamiento anaerobio es prácticamente nulo, debido al alto costo de inversión inicial, a los requerimientos técnicos para su construcción y operación (PNPGIR 2018). También menciona que el aprovechamiento de la FORSU mediante compostaje es prácticamente inexistente en el país (PNPGIR 2018).

De acuerdo con el PNPGIR, México se encuentra rezagado, en cuanto a la valorización y aprovechamiento de los RSU, puesto que cuenta con 17 plantas de selección ubicadas en 14 entidades federativas y estas recuperan aproximadamente el 1.31 % del total de los RSU. Sumado a lo anterior el 4.24 % de los residuos son recibidos en los centros de acopi y el 4.07 % de la actividad informal (PNPGIR 2018).



Entre los objetivos y estrategias derivados del PNPGIR (2018) se encuentran:

- Implementar una política integral de desarrollo que vincule la sostenibilidad ambiental con costos y beneficios para la sociedad.
- Fortalecer la política nacional de cambio climático y cuidado al medio ambiente para transitar hacia una economía competitiva y sostenible.
- Promover el aprovechamiento energético, desarrollo de mercados y cooperación internacional, teniendo como estrategia y tomando como indicador el número de infraestructuras de tratamiento anaerobio (meta 2018 biodigestor).
- Plantea la creación de una norma mexicana de compostaje

Se puede concluir que el desempeño de la Política de Gestión Integral de los RSU ha influido positivamente en el ámbito gubernamental, en políticas públicas, institucional, legislativo y financiero (PNPGIR 2018).

Cabe hacer mención que de acuerdo con el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2020 (DBGIR), existen cinco plantas de biodigestión en México, ubicadas en los municipios de Xalatlaco (Estado de México), Parícutaro (Michoacán), Comalcalco (Tabasco) y dos en Chiconautla (Puebla) y una planta de biodigestión en la CDMX se señala la existencia de una planta de digestión anaerobia en Milpa Alta (PNPGIR 2017), con capacidad de 3 t/día de residuos de nopal.

Aunado a esto, también existe una planta de digestión anaerobia en el municipio de Atlacomulco, (Estado de México) con capacidad de 30 t/día.

De acuerdo con el DGBIR la existencia de las pocas plantas de biodigestión a nivel nacional se debe al elevado costo de instalación y mantenimiento, además de las dificultades que constituyen procesar RSO debido a la heterogeneidad (2020).

Cabe resaltar que el gobierno de la CDMX en el año 2017 licitó un contrato de prestación de servicios para la construcción, puesta en marcha y operación y mantenimiento de un biodigestor para procesar al día 2.500 toneladas de (residuos sólidos orgánicos) RSO, que generara 159.9 Gwh/año, sin embargo, este no se llevó a cabo y el proyecto se canceló (DGBIR 2020).

## **Anexo 6. Detalles del artículo 28 de la LGEEPA**

En la fracción V relacionada a impactos ambientales, en el artículo 28 de la LGEEPA se establece que la SEMARNAT se encargará de las condiciones a las que se sujetará las obras que puedan causar algún desequilibrio ecológico y que por tanto su autorización dependerá de la SEMARNAT. De acuerdo con los incisos del art. 28, ellas son:

*“Las obras que están sujetas a la autorización en materia de impacto ambiental de la SEMARNAT:*

*I.- Obras hidráulicas, vías generales de comunicación,*

*II.- Industria petroquímica, química, siderúrgica, papelera, azucarera, del cemento y eléctrica;*

*III.- Exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la Federación en los términos de las Leyes Minera y Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear;*

*IV.- Instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, así como residuos radiactivos;*

*V.- Aprovechamientos forestales en selvas tropicales y especies de difícil regeneración;*

*VII.- Cambios de uso del suelo de áreas forestales, selvas y zonas áridas;*

*VIII.- Parques industriales donde se prevea la realización de actividades altamente riesgosas;*

*IX.- Desarrollos inmobiliarios que afecten los ecosistemas costeros;*

*X.- Obras y actividades en humedales, manglares, lagunas, ríos, lagos y esteros conectados con el mar, así como en sus litorales o zonas federales;*

*XI. Obras y actividades en áreas naturales protegidas de competencia de la Federación;*

*XII.- Actividades pesqueras, acuícolas o agropecuarias que puedan poner en peligro la preservación de los ecosistemas*

*XIII.- Obras referentes a asuntos de competencia federal, que puedan generar impactos al medio ambiente”*

## Anexo 7. Resultados de contribución de procesos a la categoría de radiación ionizante referente a la tecnología de IRE

En la figura A7 y tabla A7 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de radiación ionizante

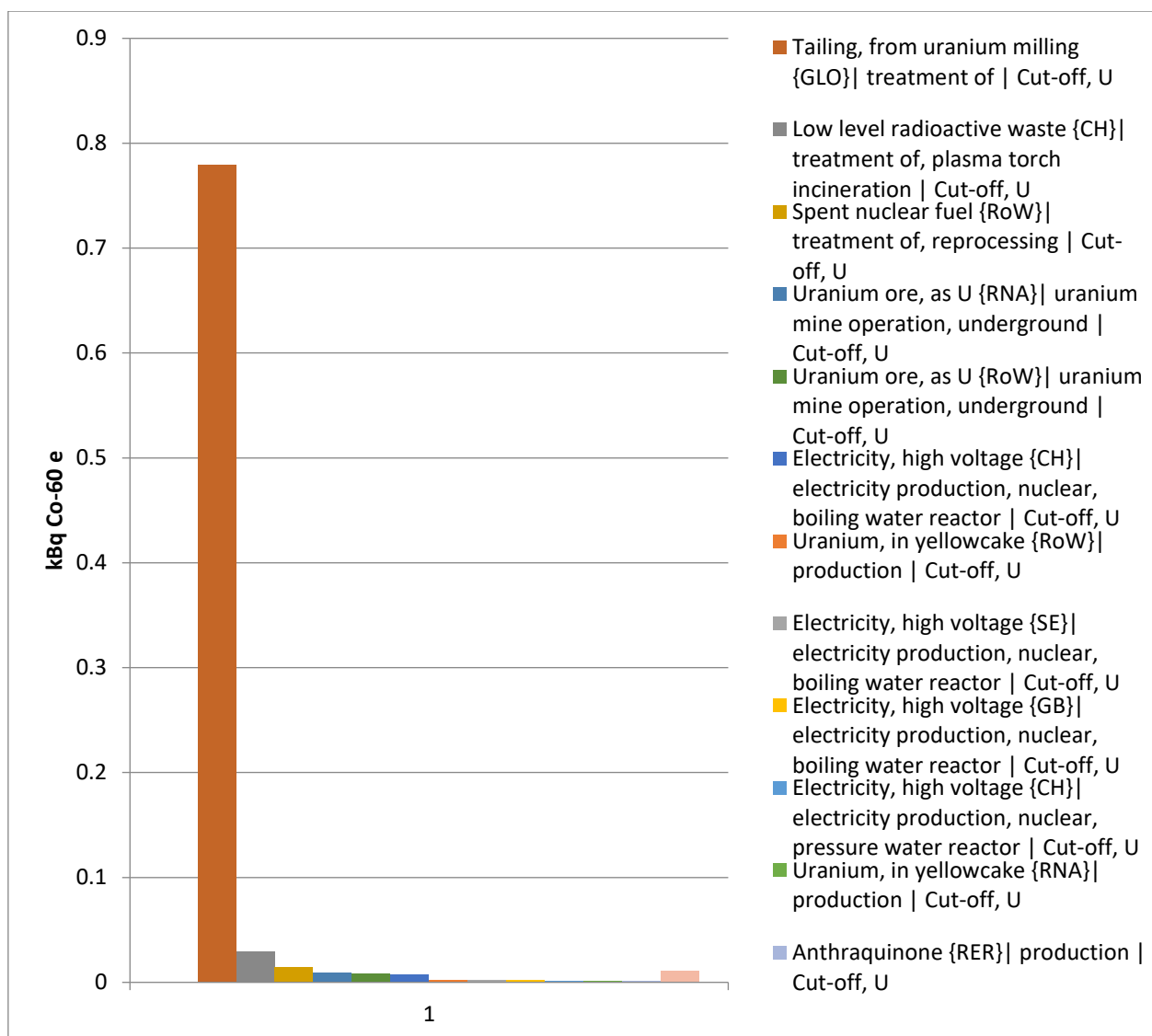


Figura A7. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de Radiación ionizante

**Tabla A7 Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de Radiación ionizante**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Tailing, from uranium milling {GLO}  treatment of   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.779 4
2	Low level radioactive waste {CH}  treatment of, plasma torch incineration   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.029 1
3	Spent nuclear fuel {RoW}  treatment of, reprocessing   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.014 2
4	Uranium ore, as U {RNA}  uranium mine operation, underground   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.009
5	Uranium ore, as U {RoW}  uranium mine operation, underground   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.008 6
6	Electricity, high voltage {CH}  electricity production, nuclear, boiling water reactor   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.007 4
7	Uranium, in yellowcake {RoW}  production   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.002 3
8	Electricity, high voltage {SE}  electricity production, nuclear, boiling water reactor   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.001 8
9	Electricity, high voltage {GB}  electricity production, nuclear, boiling water reactor   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.001 8
10	Electricity, high voltage {CH}  electricity production, nuclear, pressure water reactor   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.001 5
11	Uranium, in yellowcake {RNA}  production   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.001
12	Anthraquinone {RER}  production   Cut-off, U	kBq Co-60 al aire	0.001
13	Procesos remanentes	kBq Co-60 al aire	0.010 6

Se observa en la figura A7 y en la tabla A7, que el proceso con mayor contribución a esta categoría de impacto es debido a la generación de residuos que pueden contener uranio con 0.7794 kBq Co-60 al aire, seguido de residuos derivados del tratamiento de reactivos radioactivos.

## Anexo 8. Resultados de contribución de procesos a la categoría de partículas finas 2.5 $\mu\text{m}$ o menos referente a la tecnología de IRE

En la figura A8 y tabla A8 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de partículas finas 2.5  $\mu\text{m}$  o menos

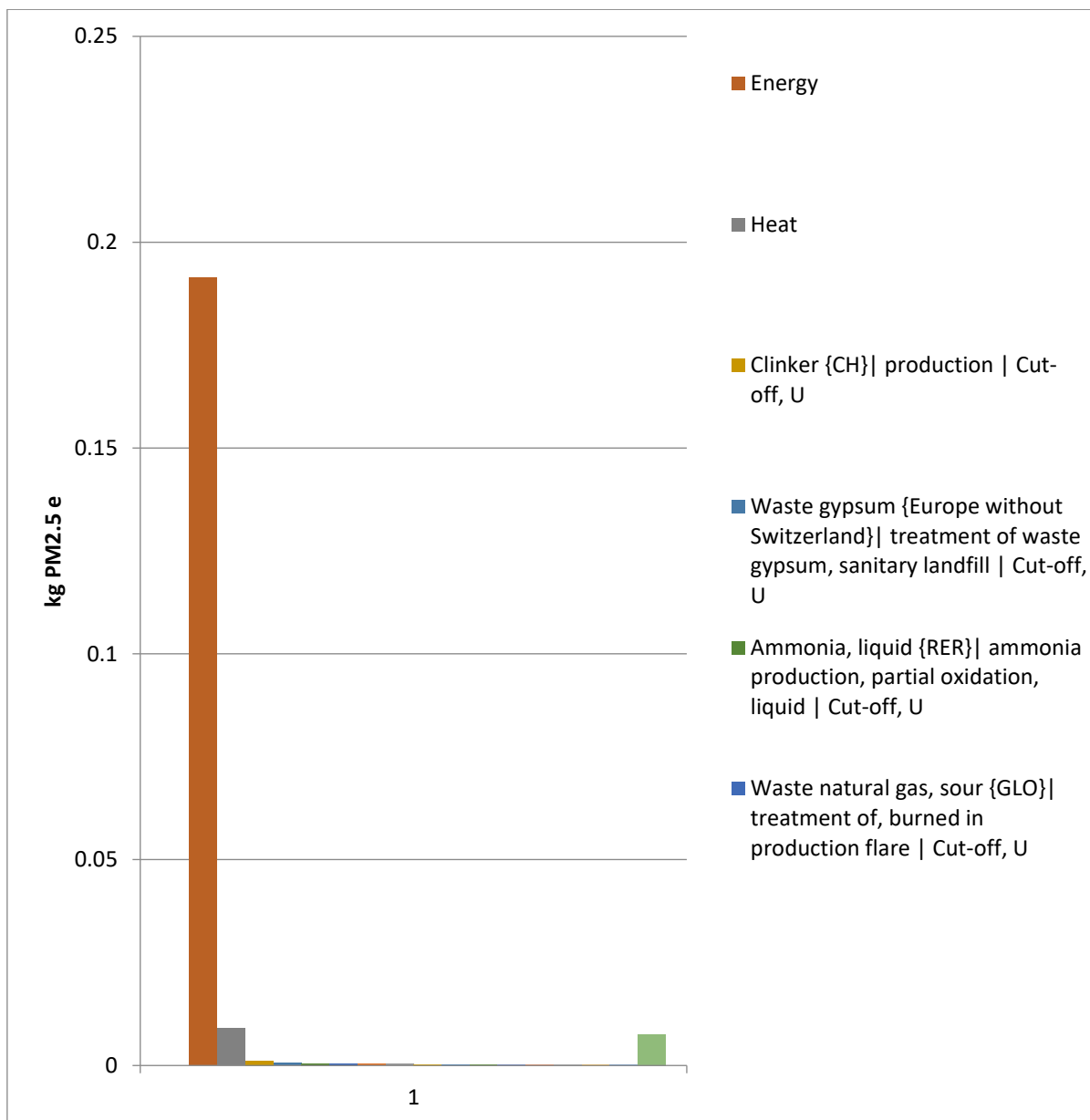


Figura A8 Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de partículas finas 2.5  $\mu\text{m}$  o menos

Se muestra en la figura A8 y en la tabla A8 que el proceso con mayor contribución a esta categoría de impacto es debido a la generación de energía con 0.1914 kg de partículas 2.5  $\mu\text{m}$ , la contribución del resto de los procesos a esta categoría es mínima.

**Tabla 10.2.3.1. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de Partículas finas 2.5  $\mu\text{m}$  o menos**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Energy	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.1914
2	Heat	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.009
3	Clinker {CH}  production   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.001
4	Waste gypsum {Europe without Switzerland}  treatment of waste gypsum, sanitary landfill   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0006
5	Ammonia, liquid {RER}  ammonia production, partial oxidation, liquid   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0005
6	Waste natural gas, sour {GLO}  treatment of, burned in production flare   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0005
7	Electricity, high voltage {ID}  electricity production, lignite   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0004
8	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0004
9	Sour gas, burned in gas turbine {RoW}  processing   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0003
10	Electricity, high voltage {RFC}  electricity production, lignite   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0003
11	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}  processing   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0003
12	Sulfuric acid {RER}  production   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0003
13	Electricity, high voltage {SERC}  electricity production, lignite   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0003
14	Quicklime, in pieces, loose {CH}  production   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0003
15	Electricity, high voltage, for internal use in coal mining {CN}  electricity production, hard coal, at coal mine power plant   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0003
16	Ammonia, liquid {RER}  ammonia production, steam reforming, liquid   Cut-off, U	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0002
17	Procesos remanentes	kg de partículas 2.5 $\mu\text{m}$	0.0076

## Anexo 9. Resultados de contribución de procesos a la categoría de acidificación terrestre referente a la tecnología de IRE

En la figura A9 y tabla A9 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de acidificación terrestre.

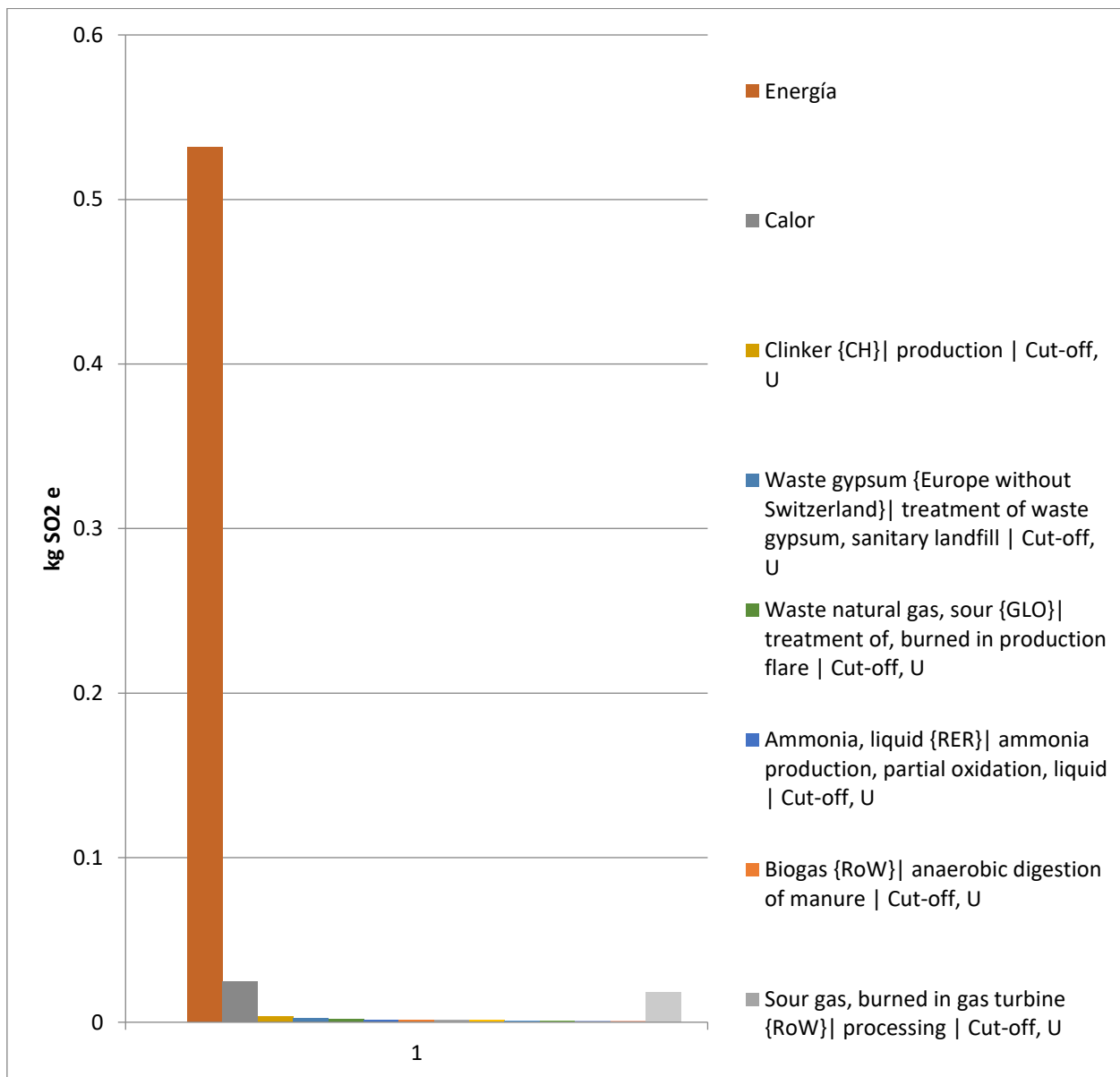


Figura A9. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría acidificación terrestre

**Tabla A9. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría acidificación terrestre**

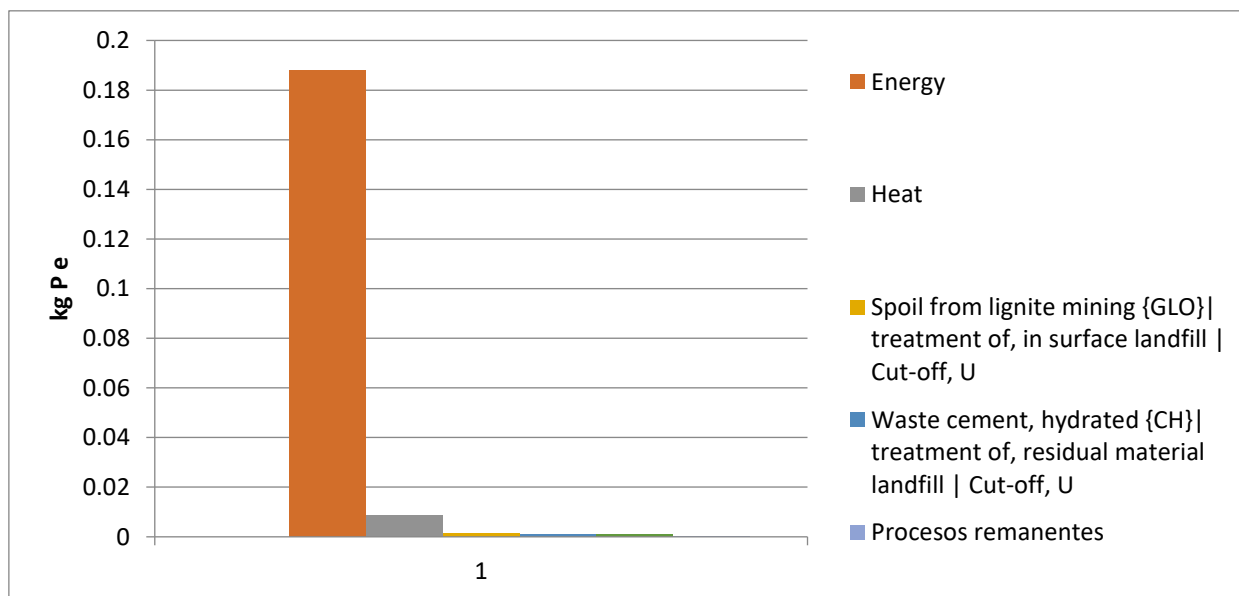
No.	Procesos	Unidades	Total
1	Energía	kg SO2 e	0.532
2	Calor	kg SO2 e	0.025
3	Clinker {CH}  production   Cut-off, U	kg SO2 e	0.0037
4	Waste gypsum {Europe without Switzerland}  treatment of waste gypsum, sanitary landfill   Cut-off, U	kg SO2 e	0.0021
5	Waste natural gas, sour {GLO}  treatment of, burned in production flare   Cut-off, U	kg SO2 e	0.0016
6	Ammonia, liquid {RER}  ammonia production, partial oxidation, liquid   Cut-off, U	kg SO2 e	0.0014
7	Biogas {RoW}  anaerobic digestion of manure   Cut-off, U	kg SO2 e	0.0013
8	Sour gas, burned in gas turbine {RoW}  processing   Cut-off, U	kg SO2 e	0.0012
9	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U	kg SO2 e	0.0012
10	Sulfuric acid {RER}  production   Cut-off, U	kg SO2 e	0.001
11	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}  processing   Cut-off, U	kg SO2 e	0.001
12	Quicklime, in pieces, loose {CH}  production   Cut-off, U	kg SO2 e	0.0008
13	Clinker {Europe without Switzerland}  production   Cut-off, U	kg SO2 e	0.0006
14	Procesos remanentes	kg SO2 e	0.018

Se observa en la figura A9 y en la tabla A9 que el proceso con mayor contribución a esta categoría es debido a la generación de energía con 0.532 kg SO<sub>2</sub> e. Debido principalmente a los componentes ácidos (SO<sub>2</sub>, HCL y HF) que se forman en el proceso de combustión por los residuos alimenticios. También las emisiones de NO<sub>x</sub> son responsables de los impactos de acidificación, por lo cual un sistema SCR más eficiente podría conducir a menores emisiones de NO<sub>x</sub>.



## Anexo 10. Resultados de contribución de procesos a la categoría de eutroficación de agua dulce referente a la tecnología de IRE

En la figura A10 y tabla A10 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de eutroficación de agua dulce.



**Figura A10. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de eutroficación de agua dulce**

**Tabla A10. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de Eutroficación de agua dulce**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Energía	kg P e	0.1877
2	Calor	kg P e	0.0088
3	Spoil from lignite mining {GLO}   treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg P e	0.0014
4	Waste cement, hydrated {CH}   treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	kg P e	0.0009
5	Spoil from hard coal mining {GLO}   treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg P e	0.0009
6	Procesos remanentes	kg P e	9.2E-05

Se muestra en la figura A10 y en la tabla A10 que el proceso con mayor contribución a esta categoría es debido a la generación de energía, las contribuciones del resto de los procesos son mínimos. Debido al tratamiento de LHG de combustión implica descargas de agua con altos niveles de cloruro y metales pesados (cadmio) (World Energy Resources, 2016).

### Anexo 11. Resultados de contribución de procesos a la categoría de eutroficación marina referente a la tecnología de IRE

En la figura A11 y tabla A11 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de eutroficación marina.

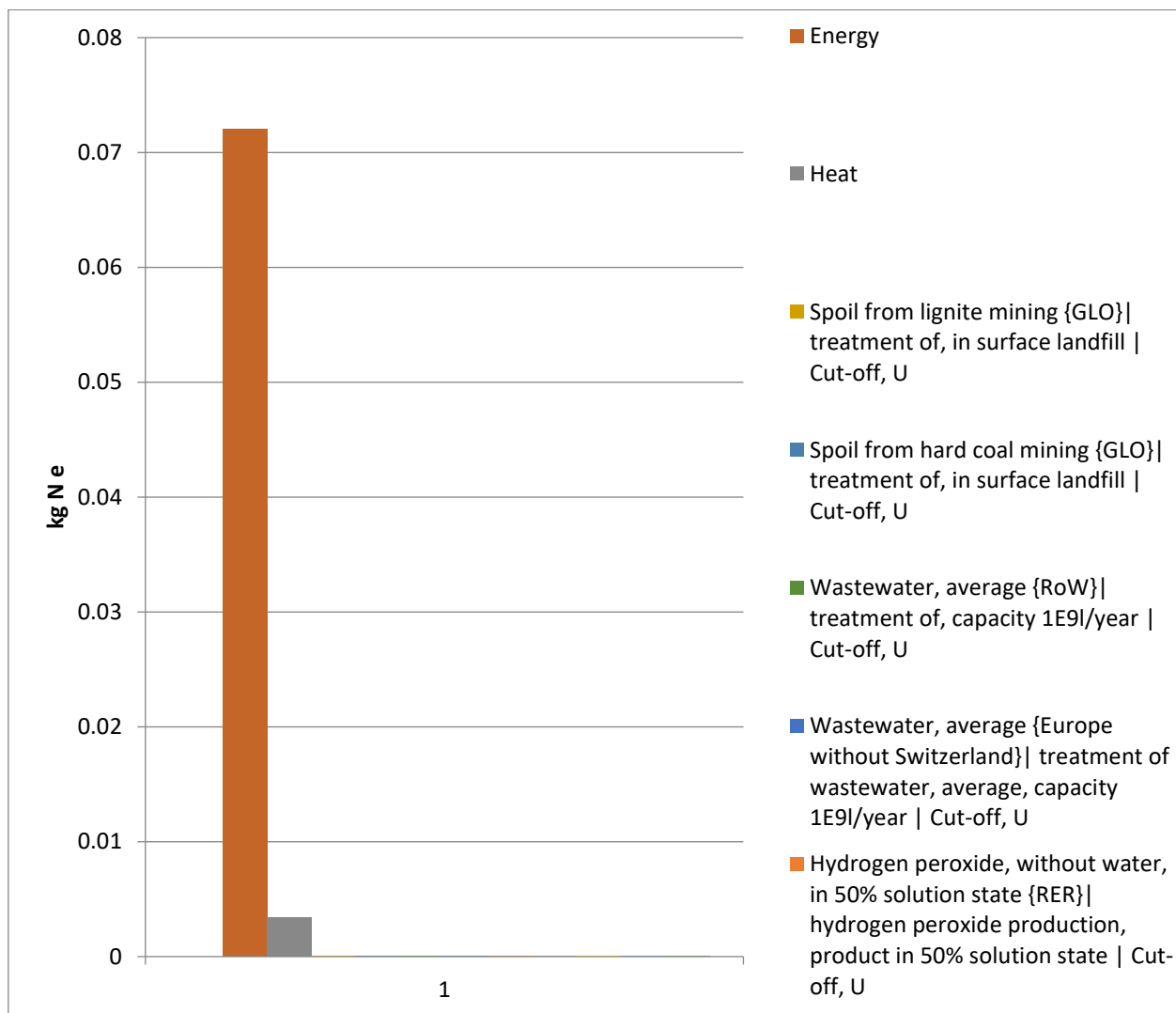


Figura A11. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de eutroficación marina

**Tabla A11. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de eutroficación marina**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Energy	kg N e	0.072
2	Heat	kg N e	0.0034
3	Spoil from lignite mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg N e	8.52E-05
4	Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg N e	5.52E-05
5	Wastewater, average {RoW}  treatment of, capacity 1E9l/year   Cut-off, U	kg N e	2.69E-05
6	Wastewater, average {Europe without Switzerland}  treatment of wastewater, average, capacity 1E9l/year   Cut-off, U	kg N e	1.71E-05
7	Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RER}  hydrogen peroxide production, product in 50% solution state   Cut-off, U	kg N e	1.68E-05
8	Municipal solid waste {RoW}  treatment of, sanitary landfill   Cut-off, U	kg N e	1.62E-05
9	Uranium, in yellowcake {GLO}  uranium production, in yellowcake, in-situ leaching   Cut-off, U	kg N e	1.34E-05
10	Decarbonising waste {RoW}  treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	kg N e	8.19E-06
11	Procesos remanentes	kg N e	2.0E-05

Se observa en la figura 10.2.6.1. y en la tabla 10.2.6.1. que los procesos que más contribuyen a la categoría de eutroficación marina es la energía, la cual contribuye con 0.072 kg N e y el calor con 0.0034 kg N e, el resto de los procesos son menores.

## Anexo 12. Resultados de contribución de procesos a la categoría de uso de suelo referente a la tecnología de IRE

En la figura A12 y tabla A12 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría uso de suelo.

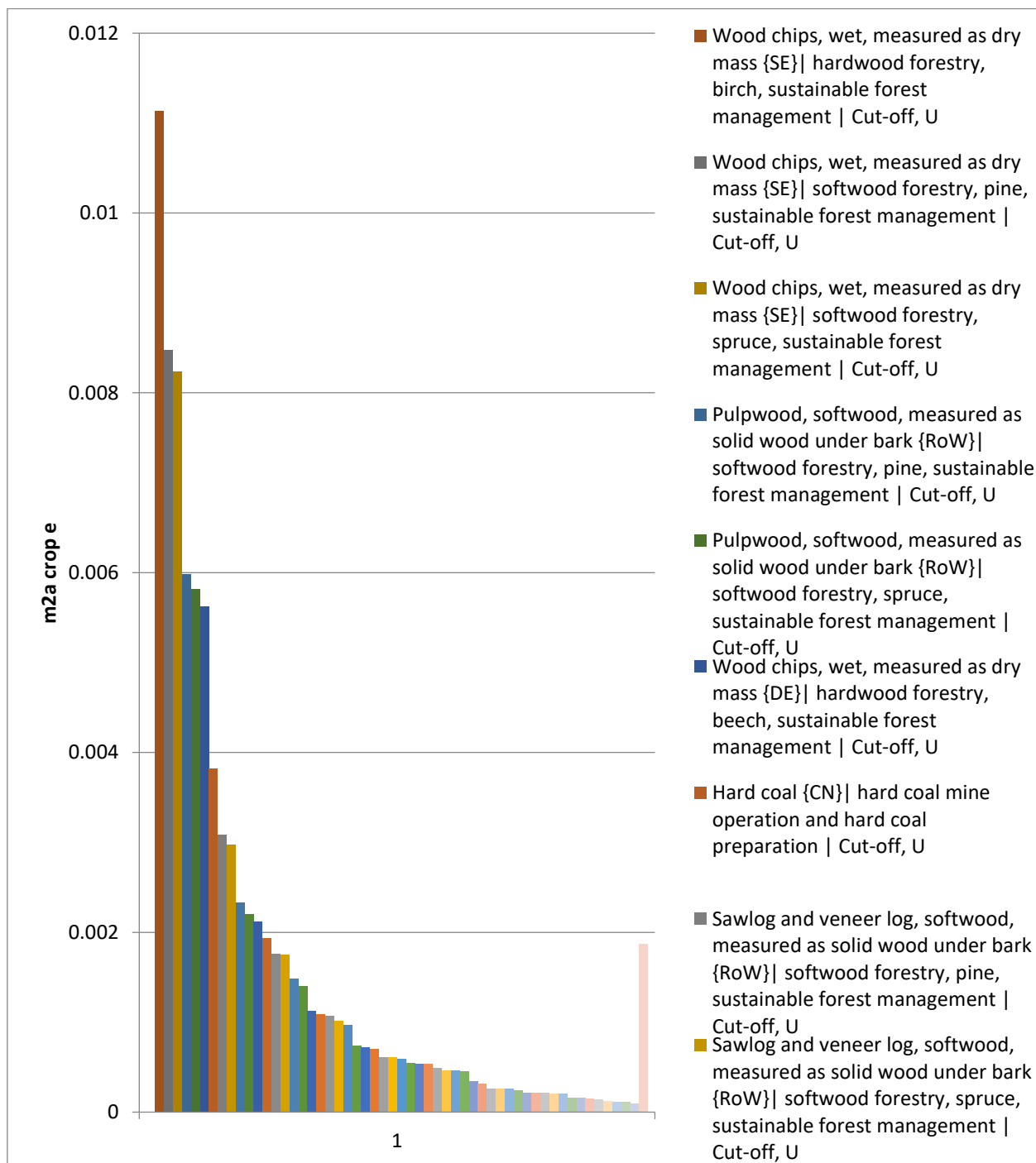


Figura A12. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría uso de suelo

**Tabla A12. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría uso de suelo**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Wood chips, wet, measured as dry mass {SE}  hardwood forestry, birch, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0111
2	Wood chips, wet, measured as dry mass {SE}  softwood forestry, pine, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0085
3	Wood chips, wet, measured as dry mass {SE}  softwood forestry, spruce, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0082
4	Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {RoW}  softwood forestry, pine, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.006
5	Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {RoW}  softwood forestry, spruce, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0058
6	Wood chips, wet, measured as dry mass {DE}  hardwood forestry, beech, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0056
7	Hard coal {CN}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0038
8	Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark {RoW}  softwood forestry, pine, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.003
9	Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark {RoW}  softwood forestry, spruce, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.003
10	Wood chips, wet, measured as dry mass {DE}  softwood forestry, spruce, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0023
11	Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {SE}  softwood forestry, pine, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0022
12	Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {SE}  softwood forestry, spruce, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0021
13	Wood chips, wet, measured as dry mass {DE}  softwood forestry, pine, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0019
14	Wood chips, wet, measured as dry mass {CH}  hardwood forestry, mixed species, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0018
15	Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark {CA-QC}  softwood forestry, mixed species, boreal forest   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0018
16	Wood chips, wet, measured as dry mass {RoW}  hardwood forestry, birch, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0015
17	Hard coal {RNA}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0014
18	Wood chips, wet, measured as dry mass {RoW}  softwood forestry, pine, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.0011
19	Wood chips, wet, measured as dry mass {RoW}  softwood forestry, spruce, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.001
20	Wood chips, wet, measured as dry mass {DE}  hardwood forestry, oak, sustainable forest management   Cut-off, U	m2xyr crop e	0.001

Se muestra en la figura A12 y en la tabla A12 que la principal contribución en esta categoría es debido a la deforestación con 0.0111 de m2xyr crop e pueda provocar la instalación de una incineradora.

### Anexo 13. Resultados de contribución de procesos a la categoría de escasez de recursos minerales referente a la tecnología de IRE

En la figura A13 y tabla A13 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de escasez de recursos minerales.

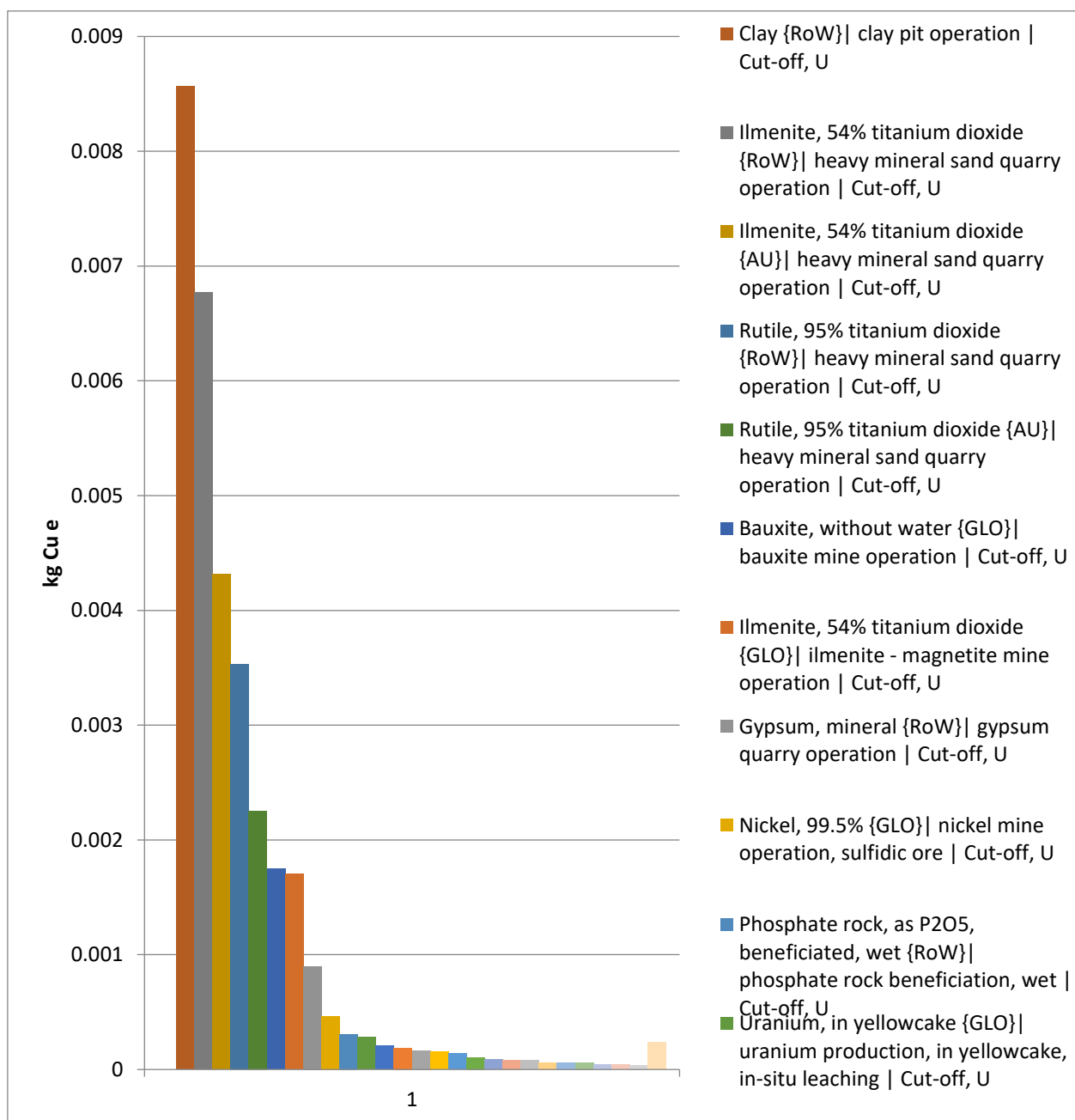


Figura A13. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría Escasez de recursos minerales

Tabla A13. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría escasez de recursos minerales

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Clay {RoW}  clay pit operation   Cut-off, U	kg Cu e	0.0086
2	Ilmenite, 54% titanium dioxide {RoW}  heavy mineral sand quarry operation   Cut-off, U	kg Cu e	0.0068
3	Ilmenite, 54% titanium dioxide {AU}  heavy mineral sand quarry operation   Cut-off, U	kg Cu e	0.0043
4	Rutile, 95% titanium dioxide {RoW}  heavy mineral sand quarry operation   Cut-off, U	kg Cu e	0.0035
5	Rutile, 95% titanium dioxide {AU}  heavy mineral sand quarry operation   Cut-off, U	kg Cu e	0.0023
6	Bauxite, without water {GLO}  bauxite mine operation   Cut-off, U	kg Cu e	0.0017
7	Ilmenite, 54% titanium dioxide {GLO}  ilmenite - magnetite mine operation   Cut-off, U	kg Cu e	0.0017
8	Gypsum, mineral {RoW}  gypsum quarry operation   Cut-off, U	kg Cu e	0.0009
9	Nickel, 99.5% {GLO}  nickel mine operation, sulfidic ore   Cut-off, U	kg Cu e	0.0005
10	Phosphate rock, as P2O5, beneficiated, wet {RoW}  phosphate rock beneficiation, wet   Cut-off, U	kg Cu e	0.0003
11	Uranium, in yellowcake {GLO}  uranium production, in yellowcake, in-situ leaching   Cut-off, U	kg Cu e	0.0003
12	Nickel, 99.5% {RU}  platinum group metal mine operation, ore with high palladium content   Cut-off, U	kg Cu e	0.0002
13	Ferronickel, 25% Ni {GLO}  production   Cut-off, U	kg Cu e	0.0002
14	Uranium ore, as U {RNA}  uranium mine operation, underground   Cut-off, U	kg Cu e	0.0002
15	Uranium ore, as U {RoW}  uranium mine operation, underground   Cut-off, U	kg Cu e	0.0002
16	Platinum {ZA}  group metal mine operation, ore with high rhodium content   Cut-off, U	kg Cu e	0.0001
17	Anthraquinone {RoW}  production   Cut-off, U	kg Cu e	0.0001
18	Chromite ore concentrate {GLO}  production   Cut-off, U	kg Cu e	8.61E-05
19	Clay {CH}  clay pit operation   Cut-off, U	kg Cu e	8.33E-05
20	Barite {RoW}  production   Cut-off, U	kg Cu e	7.91E-05
21	Uranium ore, as U {RoW}  uranium mine operation, open cast   Cut-off, U	kg Cu e	6.17E-05
22	Zinc concentrate {GLO}  zinc-lead mine operation   Cut-off, U	kg Cu e	6.05E-05
23	Iron ore, crude ore, 46% Fe {GLO}  iron mine operation, crude ore, 46% Fe   Cut-off, U	kg Cu e	5.9E-05
24	Anthraquinone {RER}  production   Cut-off, U	kg Cu e	4.67E-05
25	Uranium ore, as U {RNA}  uranium mine operation, open cast   Cut-off, U	kg Cu e	4.31E-05
26	Nickel, 99.5% {ZA}  platinum group metal mine operation, ore with high rhodium content   Cut-off, U	kg Cu e	3.97E-05
27	Procesos remanentes	kg Cu e	0.0002

Las principales contribuciones observadas en la A13. y en la figura A13. son debidas al uso y a la extracción de minerales empleados en el proceso de limpieza de gases de combustión y de tratamiento de residuos.

### Anexo 14. Resultados de contribución de procesos a la categoría de escasez de recursos fósiles referente a la tecnología de IRE

En la figura A14 y tabla A14 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de escasez de recursos fósiles.

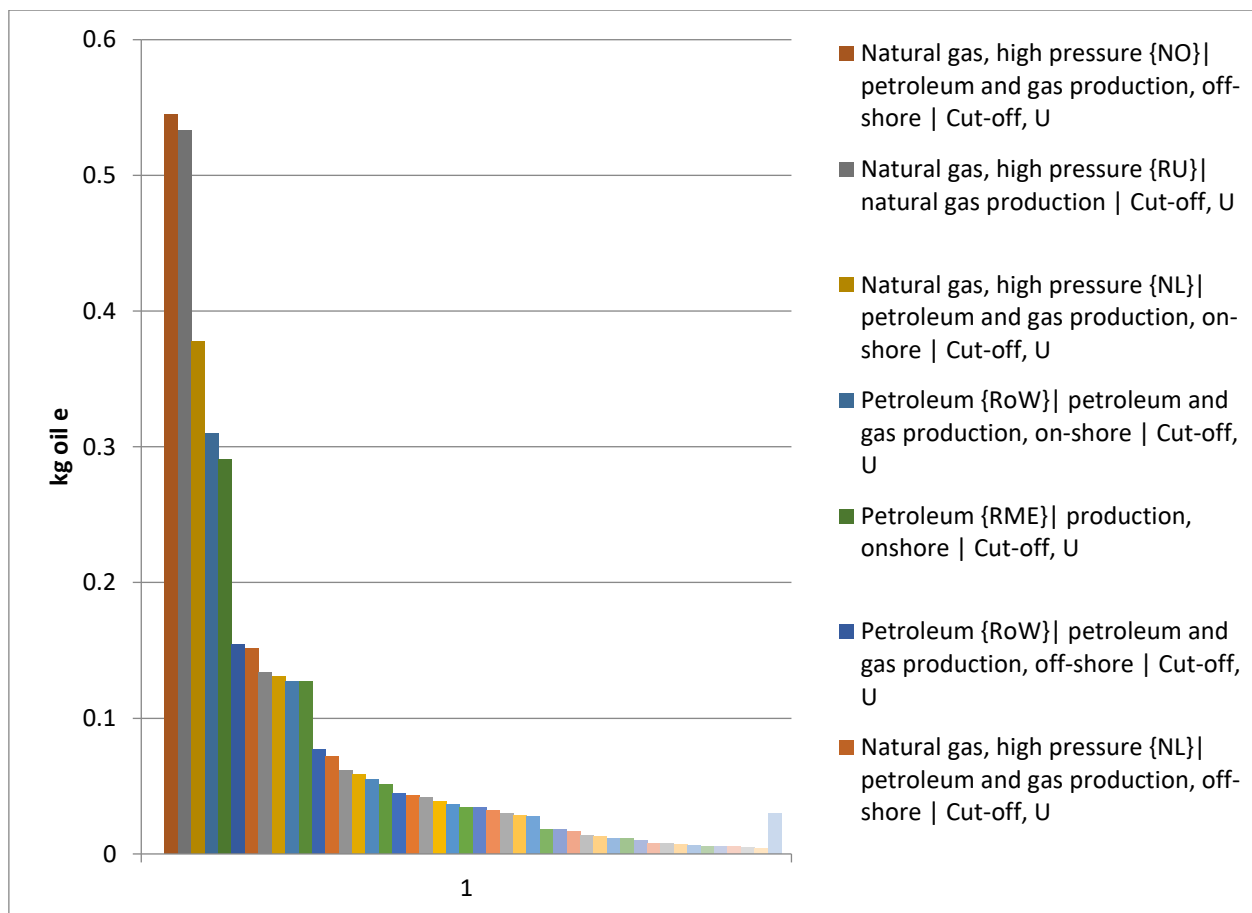


Figura A14. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría escasez de recursos fósiles

Se muestra en la figura A14 y en la tabla A14 que el proceso con mayor contribución a esta categoría de impacto es debido a la explotación de los recursos fósiles, en particular debido al gas natural y al petróleo



**Tabla A14. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de escasez de recursos fósiles**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Natural gas, high pressure {NO}  petroleum and gas production, off-shore   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.5449
2	Natural gas, high pressure {RU}  natural gas production   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.533
3	Natural gas, high pressure {NL}  petroleum and gas production, on-shore   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.3779
4	Petroleum {RoW}  petroleum and gas production, on-shore   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.3098
5	Petroleum {RME}  production, onshore   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.2903
6	Petroleum {RoW}  petroleum and gas production, off-shore   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.154
7	Natural gas, high pressure {NL}  petroleum and gas production, off-shore   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.1516
8	Natural gas, high pressure {DZ}  natural gas production   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.1338
9	Hydrogen, liquid {RER}  hydrogen cracking, APME   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.1308
10	Hard coal {CN}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.1268
11	Petroleum {RU}  production, onshore   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.1267
12	Natural gas, high pressure {DE}  natural gas production   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0772
13	Lignite {RER}  mine operation   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0716
14	Hard coal {Europe, without Russia and Turkey}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0614
15	Lignite {RoW}  mine operation   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0588
16	Hard coal {RNA}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0547
17	Hard coal {RU}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0516
18	Natural gas, high pressure {GB}  petroleum and gas production, off-shore   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0445
19	Hard coal, run-of-mine {IN}  hard coal mine operation   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0431
20	Hard coal {RoW}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0416
21	Petroleum {RoW}  production, onshore   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0383
22	Hard coal {AU}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0366
23	Natural gas, unprocessed, at extraction {GLO}  production   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0342
24	Natural gas, high pressure {RoW}  natural gas production   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.034
25	Natural gas, high pressure {US}  natural gas production   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0317
27	Hard coal {RLA}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0281
28	Sweet gas, burned in gas turbine {RoW}  processing   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0274
29	Natural gas, high pressure {RoW}  petroleum and gas production, on-shore   Cut-off, U	kg de petróleo bruto e	0.0178

## Anexo 15. Resultados de contribución de procesos a la categoría de consumo de agua referente a la tecnología de IRE

En la figura A15 y tabla A15 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de consumo de agua.

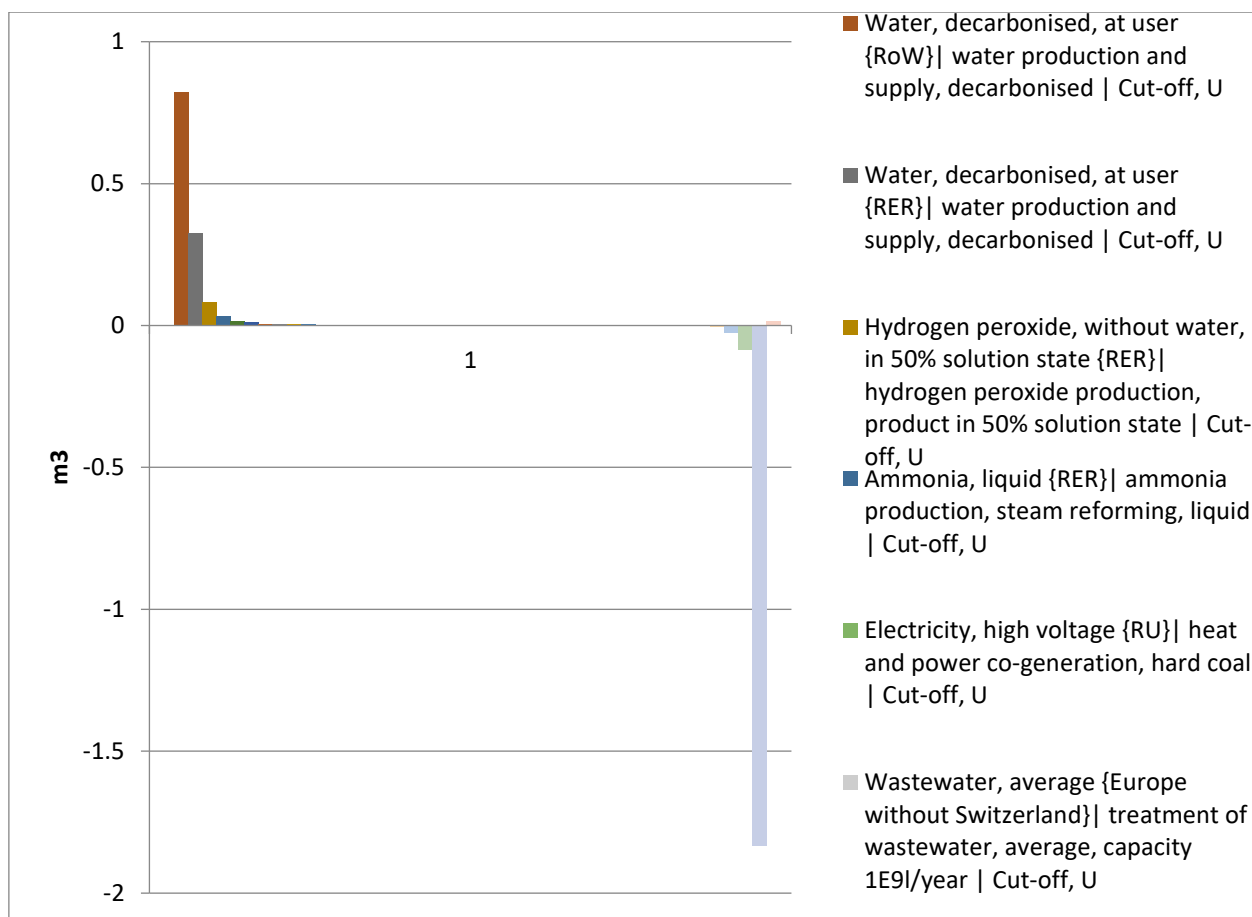


Figura A15. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de consumo de agua

**Tabla A15. Contribuciones generales de los procesos de la tecnología de incineración con recuperación de energía, a la categoría de consumo de agua**

No.	Procesos	Unidades	Total
1	Water, decarbonised, at user {RoW}  water production and supply, decarbonised   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.822 8
2	Water, decarbonised, at user {RER}  water production and supply, decarbonised   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.327
3	Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RER}  hydrogen peroxide production, product in 50% solution state   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.081 6
4	Ammonia, liquid {RER}  ammonia production, steam reforming, liquid   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.033 5
5	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RoW}  chlor-alkali electrolysis, membrane cell   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.017
6	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RoW}  chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.011 4
7	Sodium chloride, powder {RoW}  production   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.006 7
8	Electricity, high voltage {CH}  electricity production, hydro, reservoir, alpine region   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.006 3
9	Ammonia, liquid {RER}  ammonia production, partial oxidation, liquid   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.005 9
10	Sulfuric acid {RER}  production   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.004 4
11	Titanium dioxide {RER}  production, sulfate process   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.003
12	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER}  chlor-alkali electrolysis, membrane cell   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.002 8
13	Electricity, high voltage {NO}  electricity production, hydro, reservoir, alpine region   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.002 5
14	Hydrogen, liquid {RER}  hydrogen cracking, APME   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.002 4
15	Electricity, high voltage {PL}  heat and power co-generation, hard coal   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.002 1
16	Chlorine, gaseous {RER}  chlor-alkali electrolysis, membrane cell   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.002
17	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER}  chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.001 7
18	Diesel {Europe without Switzerland}  petroleum refinery operation   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.001 6
19	Tap water {Europe without Switzerland}  tap water production, direct filtration treatment   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.001 4
20	Sodium chloride, powder {RER}  production   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.001 4
21	Heavy fuel oil {Europe without Switzerland}  petroleum refinery operation   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.001 3
22	Electricity, high voltage {BR}  electricity production, hydro, reservoir, tropical region   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.001 3
23	Chlorine, gaseous {RER}  chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.001 2
<b>No.</b>	<b>Procesos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Total</b>
25	Tap water {Europe without Switzerland}  tap water production, conventional treatment   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.001 2
26	Oxygen, liquid {RER}  air separation, cryogenic   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.000 9

27	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER}  chlor-alkali electrolysis, mercury cell   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.000 9
28	Heavy fuel oil {CH}  petroleum refinery operation   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.000 8
29	Electricity, high voltage {RU}  heat and power co-generation, hard coal   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.000 8
30	Tap water {CH}  tap water production, underground water without treatment   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.000 7
31	Sulfuric acid {RoW}  production   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.000 7
32	Electricity, high voltage {IT}  electricity production, hydro, reservoir, alpine region   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.000 6
33	Tap water {CH}  tap water production, direct filtration treatment   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.000 6
34	Chlorine, gaseous {RER}  chlor-alkali electrolysis, mercury cell   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.000 6
35	Lime {Europe without Switzerland}  lime production, milled, loose   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.000 6
36	Hard coal {CN}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	0.000 6
37	Transport, freight, sea, liquefied natural gas {GLO}  processing   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	
38	Wastewater, average {Europe without Switzerland}  treatment of wastewater, average, capacity 1E9l/year   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	
39	Wastewater, average {RoW}  treatment of, capacity 1E9l/year   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	
40	Wastewater, unpolluted {RoW}  treatment of, capacity 5E9l/year   Cut-off, U	m <sup>3</sup> de agua	
41	CALOR	m <sup>3</sup> de agua	
42	ENERGIA	m <sup>3</sup> de agua	-2
43	Procesos remanentes	m <sup>3</sup> de agua	0.017

Se observa en la tabla A15 y en la figura A15 que existe un ahorro en el consumo de agua en el proceso de energía, esto debido a que la incineración de RSU utilizan agua en calderas y para otros procesos, como limpieza de gases de combustión, la cual puede provenir de agua tratada de alguna otra fuente que no implique agua potable.

## Anexo 16. Resultados de contribución de procesos a la categoría de toxicidad humana cancerígena de la tecnología de BRF H-M-Z-S-NN

En la figura A16 y tabla A16 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de toxicidad humana cancerígena.

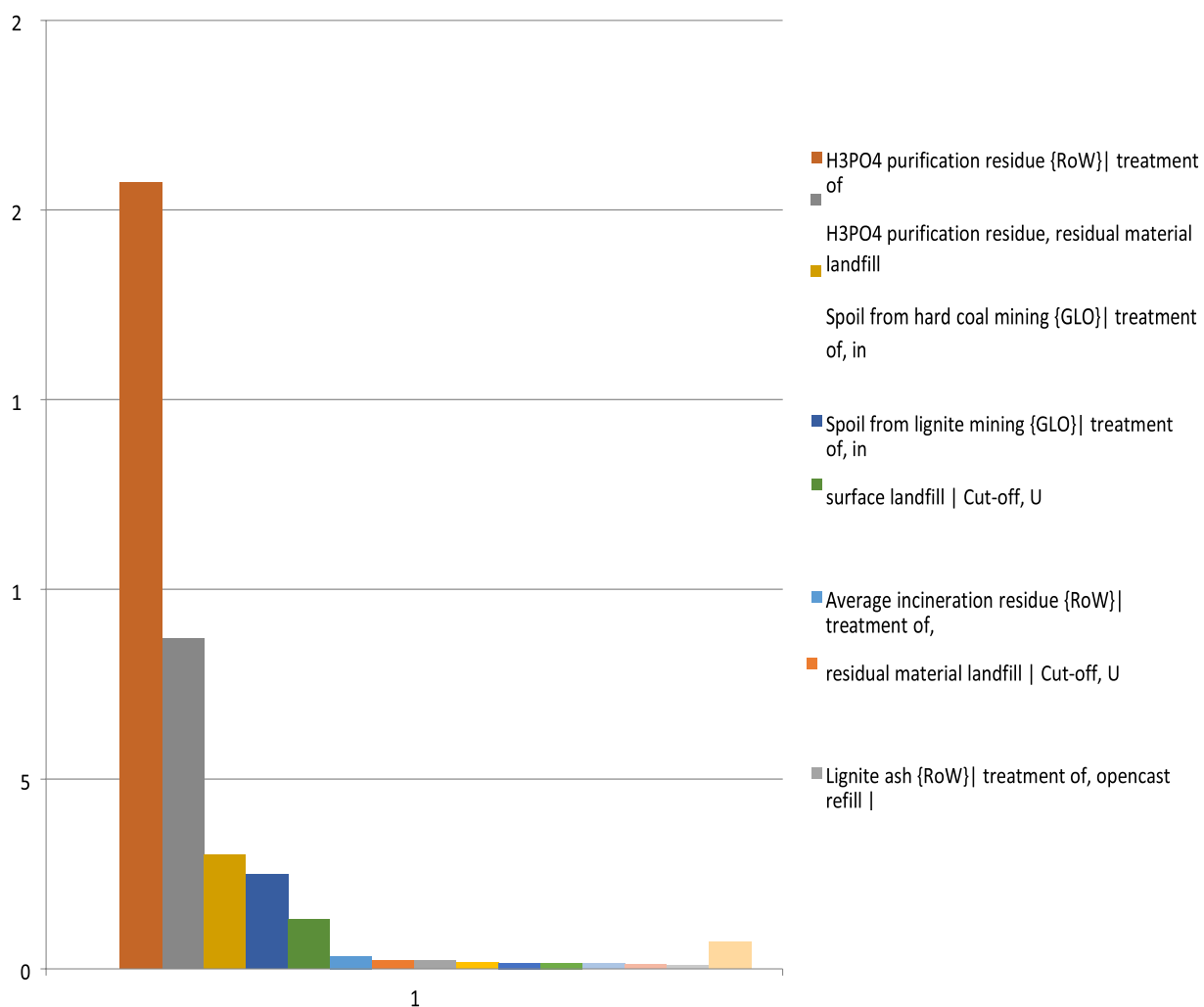


Figura A16. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría toxicidad humana de tipo carcinogénica (Poggi- Varaldo, 2019)

**Tabla A16. Contribuciones de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría Toxicidad humana de tipo carcinogénica (Poggi- Varaldo, 2019)**

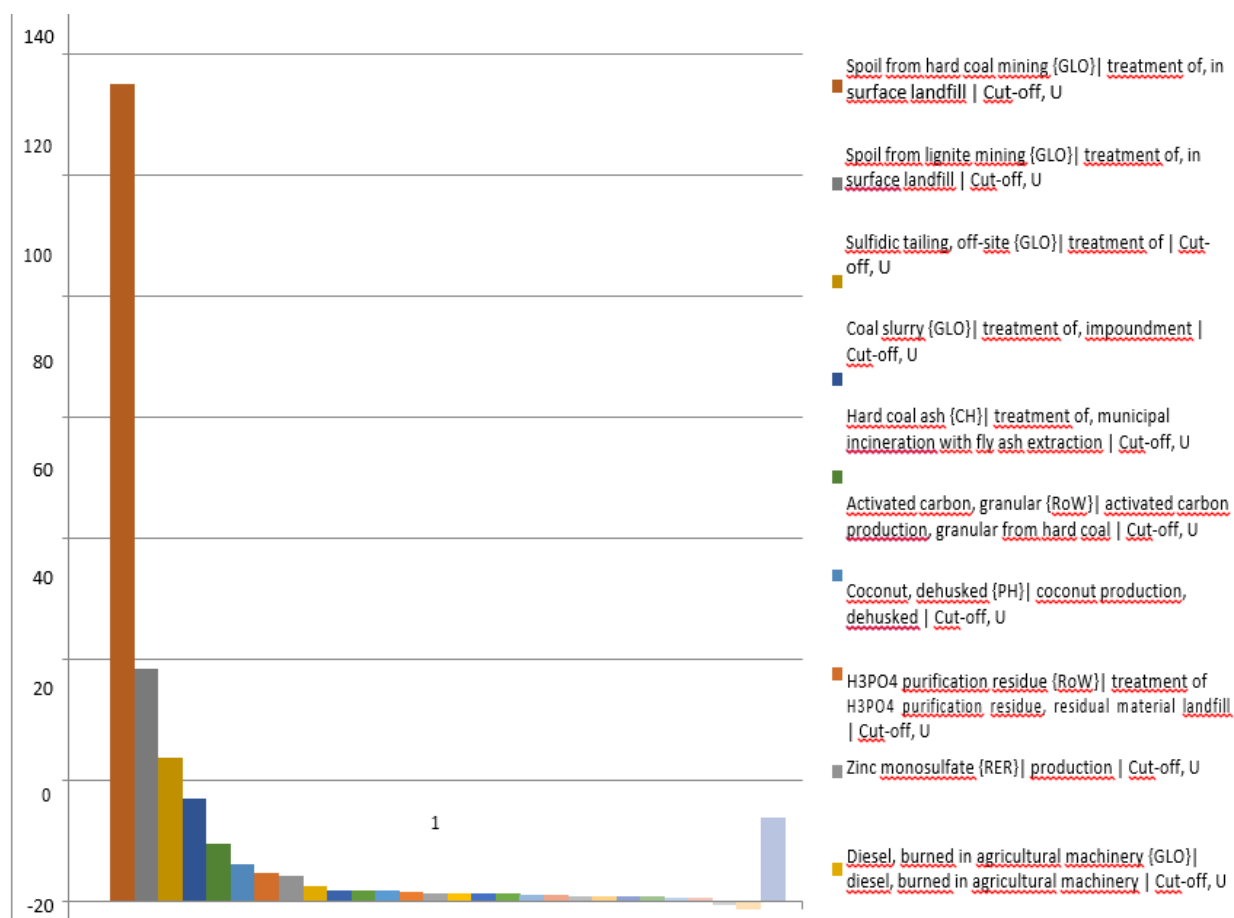
No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total	_BRF-ETAPA EXTRACCION	_BRF-ETAPA H	_BRF-ETAPA M	_BRF- ETAPA NN	_BRF- ETAPA SACARIFICACION	_BRF-ETAPA Z
	El total de todos los procesos		kg 1,4- DCB	38.5963	0.5961	1.4449	0.4422	10.47	2.509	23.139
	Procesos remanentes		kg 1,4- DCB	1.7880	0.0651	0.1591	0.0359	0.43	0.212	0.882
1	H3PO4 purification residue (RoW) treatment of H3PO4 purification residue, residual material landfill   Cut-off, U	Ecoinvent 3 -al	kg 1,4- DCB	20.7181	0.0000	0.0002	0.0000	0.00	0.000	20.718
2	U	Ecoinvent 3 -al	kg 1,4- DCB	8.7146	0.1394	0.8109	0.2323	6.21 0.776		0.550
3	Hard coal ash (RoW) treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	Ecoinvent 3 -al	kg 1,4- DCB	3.0139	0.0608	0.1162	0.0405	2.02 0.567		0.207
4	Spoil from lignite mining (GLO) treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	Ecoinvent 3 -al	kg 1,4- DCB	2.4902	0.0831	0.2438	0.0982	0.86	0.798	0.407
5	Coal slurry (GLO) treatment of, impoundment   Cut-off, U	Ecoinvent 3 -al	kg 1,4- DCB	1.3138	0.0208	0.1140	0.0352	0.94	0.120	0.083
6	Average incineration residue (RoW) treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	Ecoinvent 3 -al	kg 1,4- DCB	0.3371	0.2252	0.0005	0.0001	0.00	0.027	0.084

Se observa que en la BRF los procesos principalmente son relacionados en el tratamiento de residuos de ácido fosfórico, que se encuentran en algunos procesos y materiales encontrados en los archivos principales (A16). En proceso figura el 85% de la carga tóxica y el 60% total de la carga tóxica de la BRF (A16).

Con los datos obtenidos puede suponerse que en el proceso se encuentra relacionado el uso de fosfatos dentro de la conformación del medio de cultivo de la etapa Z, o si se manifiesta una producción de ácido fosfórico y tratamiento de sus residuos de la etapa Z

## Anexo 17. Resultados de contribución de procesos a la categoría de toxicidad humana no cancerígena de la tecnología de BRF H-M-Z-S-NN

En la figura A17 y tabla A17 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de toxicidad humana no cancerígena.



**Figura A17. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría toxicidad humana de tipo no carcinogénica (Poggi-Varaldo, 2019)**

Se observa en la figura A17 que algunos de los procesos que se encuentran vinculados a la minería de carbón y a sus múltiples tratamientos son los que abarcan la mayor influencia sobre la categoría de toxicidad humana de tipo no carcinogénica.

**Tabla A17. Contribuciones de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría toxicidad humana de tipo no carcinogénica**

Proceso	Unidad	Total	_BRF-ETAPA EXTRACCION	_BRF- ETAPA H	_BRF- ETAPA M	_BRF- ETAPA NN	_BRF-ETAPA SACARIFICACION	_BRF-ETAPA Z
El total de todos los procesos	kg 1,4- DCB	271.14	6.03	28.30	8.02	134.22	30.43	64.15
Procesos remanentes	kg 1,4- DCB	8.27	0.45	0.99	0.28	1.60	1.62	3.34
Spoil from hard coal mining (GLO)  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	135.05	2.16	12.57	3.60	96.18	12.02	8.52
Spoil from lignite mining (GLO)  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	38.36	1.28	3.76	1.51	13.26	12.29	6.27
Sulfidic tailing, off-site (GLO)  treatment of   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	23.68	0.50	0.55	0.01	0.35	0.25	22.03
Coal slurry (GLO)  treatment of, impoundment   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	16.95	0.27	1.47	0.45	12.14	1.55	1.08
Hard coal ash (CH)  treatment of, municipal incineration with fly ash extraction   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	9.50	0.27	5.11	1.04	0.69	0.54	1.86
Activated carbon, granular (RoW)  activated carbon production, granular from hard coal   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	6.17	0.00	0.00	0.00	6.17	0.00	0.00
Coconut, dehusked (PH)  coconut production, dehusked   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	4.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.52
H3PO4 purification residue (RoW)  treatment of H3PO4 purification residue, residual material landfill   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	4.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.22
Zinc monosulfate (RER)  production   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	2.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.35

El 80% del efecto general de la BRF, es el aglomerado de 4 procesos que se encuentran en esta categoría y que son procesos no explícitos anidados en otros que han sido convocados en los archivos principales del proyecto A17.

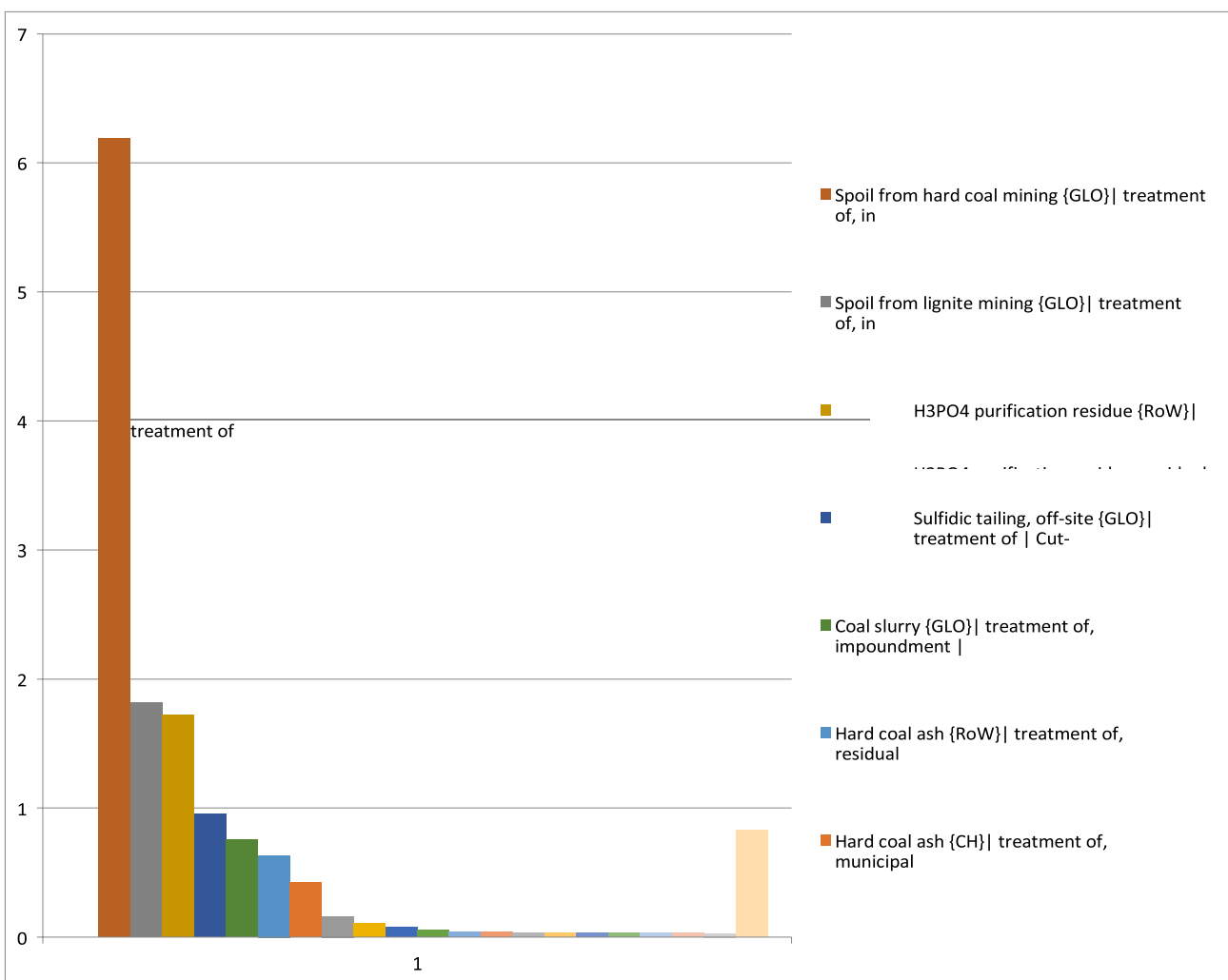
Sin embargo, hace falta corroborar si la minería del carbón y el tratamiento de sus remanentes, tienen algún vínculo con la elaboración del carbón activado, ya que se ha observado que afecta de manera importante varios impactos de la etapa NN.

La etapa NN fue la más dominante, seguida por los actos de las etapas Z la cual manifiesta los efectos del proceso y finalmente se encuentra el proceso de sacarificación.



### Anexo 18. Resultados de contribución de procesos a la categoría de ecotoxicidad marina de la tecnología de BRF H-M-Z-S-NN

En la figura A18 y tabla A18 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la ecotoxicidad marina.



**Figura A18. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría Ecotoxicidad marina en kg 1,4-DCB e (Poggi-Varaldo, 2019)**

Puede observarse en la Figura A18 que los procesos de carbón y tratamiento de sus residuos, ligado con el proceso de tratamiento de residuos de ácido fosfórico dominan los resultados. Es por ello por lo que se encuentran de manera preponderante, en el sentido que este subconjunto de procesos coopera a múltiples categorías de impacto toxicidad y ecotoxicidad.

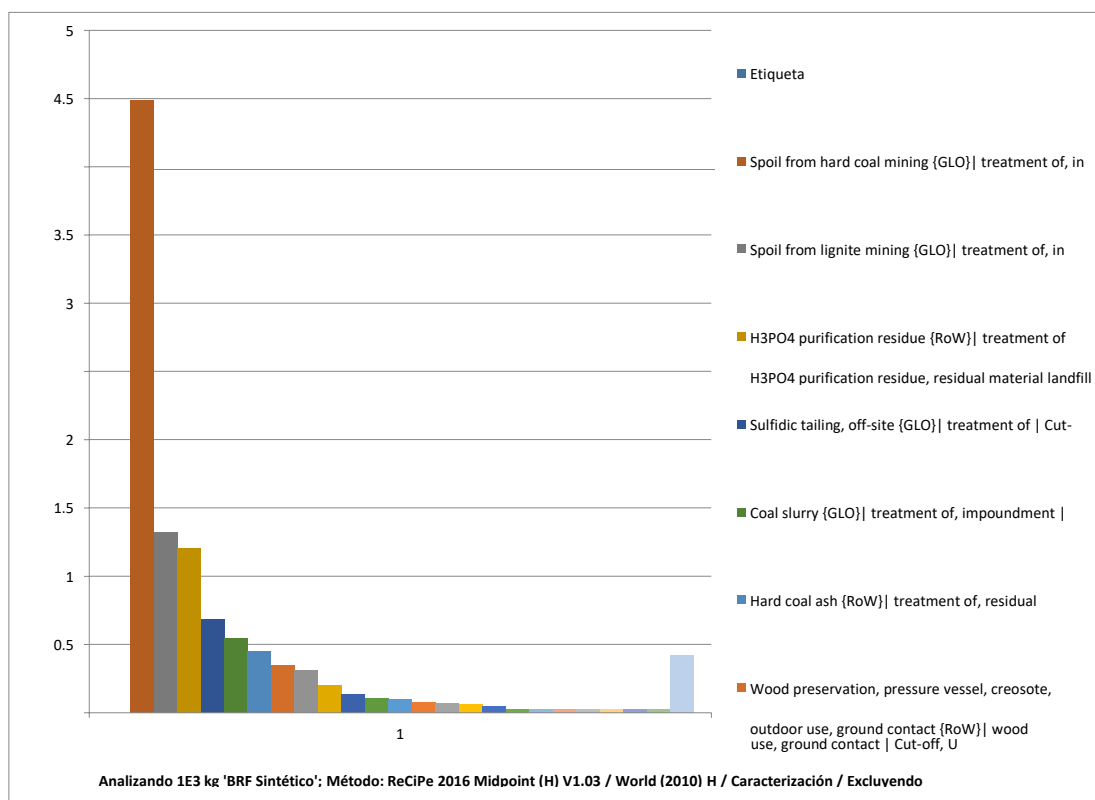
**Tabla A18. Contribuciones de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría ecotoxicidad marina: valores tabulados en kg 1,4-DCB e**

Proceso	Unidad	Total	_BRF-ETAPA EXTRACCION	_BRF- ETAPA H	_BRF- ETAPA M	_BRF- ETAPA NN	_BRF-ETAPA SACARIFICACION	_BRF-ETAPA Z
El total de todos los procesos	kg 1,4- DCB	14.039	0.296	1.226	0.342	6.273	1.496	4.407
Procesos remanentes	kg 1,4- DCB	1.110	0.078	0.128	0.029	0.213	0.132	0.530
H3PO4 purification residue {RoW}  treatment of H3PO4 purification residue, residual material landfill   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	1.721	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.721
Sulfidic tailing, off-site {GLO}  treatment of   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	0.954	0.020	0.022	0.000	0.014	0.010	0.887
Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	6.192	0.099	0.576	0.165	4.410 0.551		0.391
Spoil from lignite mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	1.815	0.061	0.178	0.072	0.627	0.582	0.296
Steel in car shredder residue {RoW}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	0.163	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.163
Hard coal ash {CH}  treatment of, municipal incineration with fly ash extraction   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	0.425	0.012	0.229	0.047	0.031	0.024	0.083
Coconut, dehusked {PH}  coconut production, dehusked   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	0.079	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.079
Coal slurry {GLO}  treatment of, impoundment   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	0.756	0.012	0.066	0.020	0.541	0.069	0.048
Hard coal ash {RoW}  treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	0.633	0.013	0.024	0.009	0.425	0.119	0.043
Phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state {RoW}  phosphoric acid production, dihydrate process   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.039
Zinc monosulfate {RER}  production   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033
Natural gas, unprocessed, at extraction {GLO}  production   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	0.055	0.001	0.003	0.000	0.012	0.007	0.031
Wood preservation, pressure vessel, creosote, outdoor use, ground contact {RoW}  wood preservation, pressure vessel, creosote, outdoor use, ground contact   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	0.031	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031
Waste cement, hydrated {RoW}  treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	kg 1,4- DCB	0.032	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.031

Los principales contribuyentes del impacto total de la ecotoxicidad marina son la etapa NN que se encuentra en primer lugar y posteriormente la Z. Entre las dos contribuyen cerca del 76% de la ecotoxicidad, ya que la etapa NN predomina por la aportación de tratamiento en relleno sanitario de desechos de minería de carbón global y que probablemente se encuentran vinculados en la extracción de carbón para fabricar carbón activado (Tabla A18).

## Anexo 19. Resultados de contribución de procesos a la categoría de ecotoxicidad al agua dulce de BRF H-M-Z-S-NN

En la figura A19 y tabla A19 se observan los resultados referentes contribución de procesos ecotoxicidad al agua dulce.



**Figura A19. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría ecotoxicidad al agua dulce, unidades en kg 1,4 DCB e (Poggi-Varaldo, 2019)**

Respecto a la Figura A19 es evidente que algunos procesos vinculados con residuos de minería de carbón son de contribución predominante.

La Tabla A19 indica que los procesos con mayores contribuciones son nuevamente NN y Z. En NN, a su vez, los procesos que se aprecian dominantes son aquellos de orden en relación con los residuos de la minería de carbón (hard coal) y lignito, en relleno sanitario. Para la situación del proceso Z, el proceso que se aprecia dominante respecto es respecto a los residuos ocasionados al tratamiento del ácido fosfórico que se dispone en relleno sanitario. Esto puede ser ocasionado por el uso de

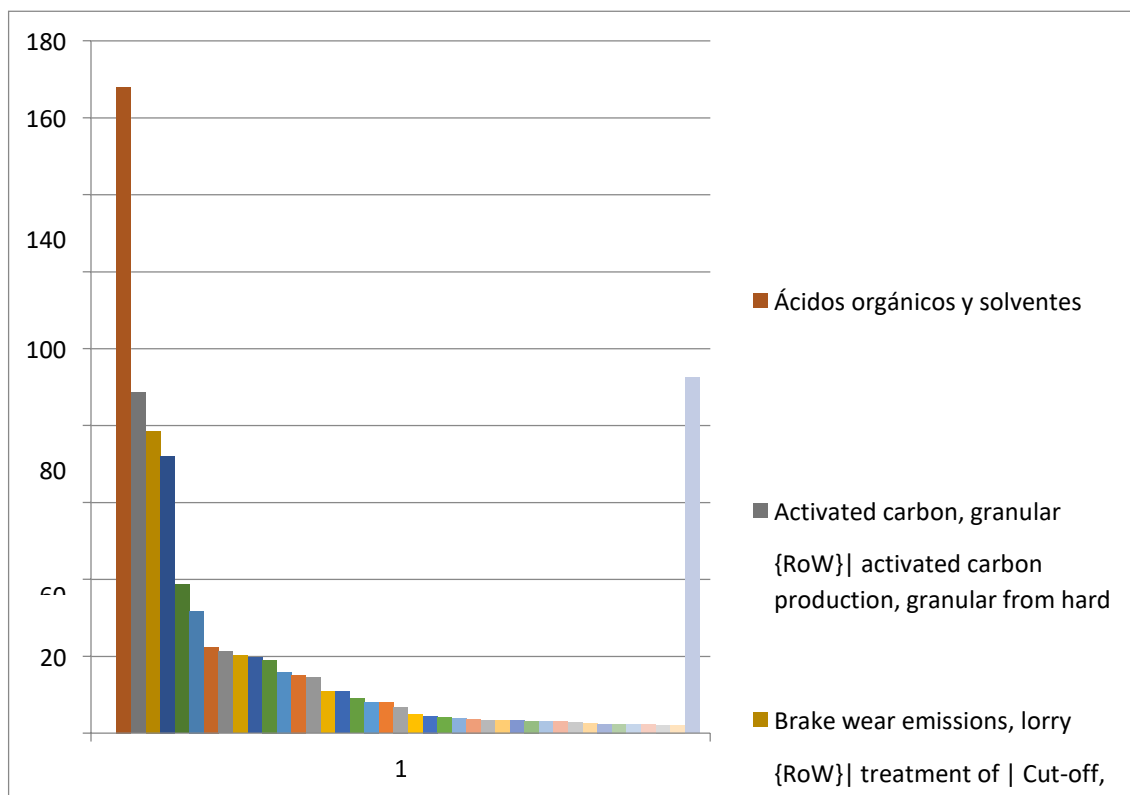
sales de fosfato en el medio de cultivo de Z, o a algunos materiales y procesos tácitos anidados en proxis.

**Tabla A19. Contribuciones de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría ecotoxicidad de agua dulce: valores tabulados en 1,4-DCB e (Poggi-Varaldo, 2019)**

Proceso	Total	BRF-E	BRF-H	BRF-M	BRF-NN	BRF-S	BRF.Z
El total de todos los procesos	10.74	3.63E-01	8.66E-01	2.40E-01	4.49E+00	1.06E+00	3.73E+00
Procesos remanentes	0.54	3.93E-02	6.08E-02	1.05E-02	6.88E-02	4.56E-02	3.18E-01
Ácidos orgánicos y solventes	0.06	6.30E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Extracted fermented waste wb	0.0270	2.70E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Coal slurry {GLO} treatment of, impoundment   Cut-off, U	0.53	8.64E-03	4.75E-02	1.47E-02	3.91E-01	4.99E-02	3.47E-02
Coconut, dehusked {PH}   coconut production, dehusked   Cut-off, U	0.09	5.63E-09	1.67E-06	1.70E-08	4.37E-08	3.62E-08	9.46E-02
H3PO4 purification residue {RoW}   treatment of H3PO4 purification residue, residual material landfill   Cut-off, U	1.20	5.59E-07	8.75E-06	8.12E-07	-3.94E-06	2.51E-06	1.21E+00
Hard coal ash {CH}   treatment of, municipal incineration with fly ash extraction   Cut-off, U	0.31	8.78E-03	1.67E-01	3.41E-02	2.24E-02	1.77E-02	6.07E-02
Hard coal ash {RoW}   treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	0.45	9.07E-03	1.73E-02	6.04E-03	3.02E-01	8.47E-02	3.08E-02
Lignite ash {RoW}   treatment of, opencast refill   Cut-off, U	0.08	2.74E-03	6.96E-03	1.83E-03	2.84E-02	2.65E-02	1.23E-02
Natural gas, unprocessed, at extraction {GLO}   production   Cut-off, U	0.04	1.11E-03	2.56E-03	2.42E-04	9.60E-03	5.53E-03	2.50E-02
Non-ionic surfactant {GLO}   non-ionic surfactant production, ethylene oxide derivate   Cut-off, U	0.20	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.99E-01
Scrap copper {RoW}   treatment of, municipal incineration   Cut-off, U	0.03	1.40E-04	1.28E-03	1.95E-04	4.59E-03	7.31E-04	2.01E-02
Spoil from hard coal mining {GLO}   treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	4.48	7.17E-02	4.17E-01	1.20E-01	3.19E+00	3.99E-01	2.83E-01
Spoil from lignite mining {GLO}   treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	1.32	4.41E-02	1.29E-01	5.21E-02	4.56E-01	4.23E-01	2.16E-01
Steel in car shredder residue {RoW}   treatment of, municipal incineration   Cut-off, U	0.14	1.40E-08	2.54E-06	2.73E-08	7.19E-08	5.95E-08	1.36E-01
Sulfidic tailing, off-site {GLO}   treatment of   Cut-off, U	0.68	1.44E-02	1.58E-02	3.20E-04	1.00E-02	7.36E-03	6.37E-01

## Anexo 20. Resultados de contribución de procesos a la categoría de ecotoxicidad terrestre de BRF H-M-Z-S-NN

En la figura A20 y tabla A20 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de ecotoxicidad terrestre.



**Figura A20. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría ecotoxicidad terrestre en unidades de kg 1,4 DCB e (Poggi-Varaldo, 2019)**

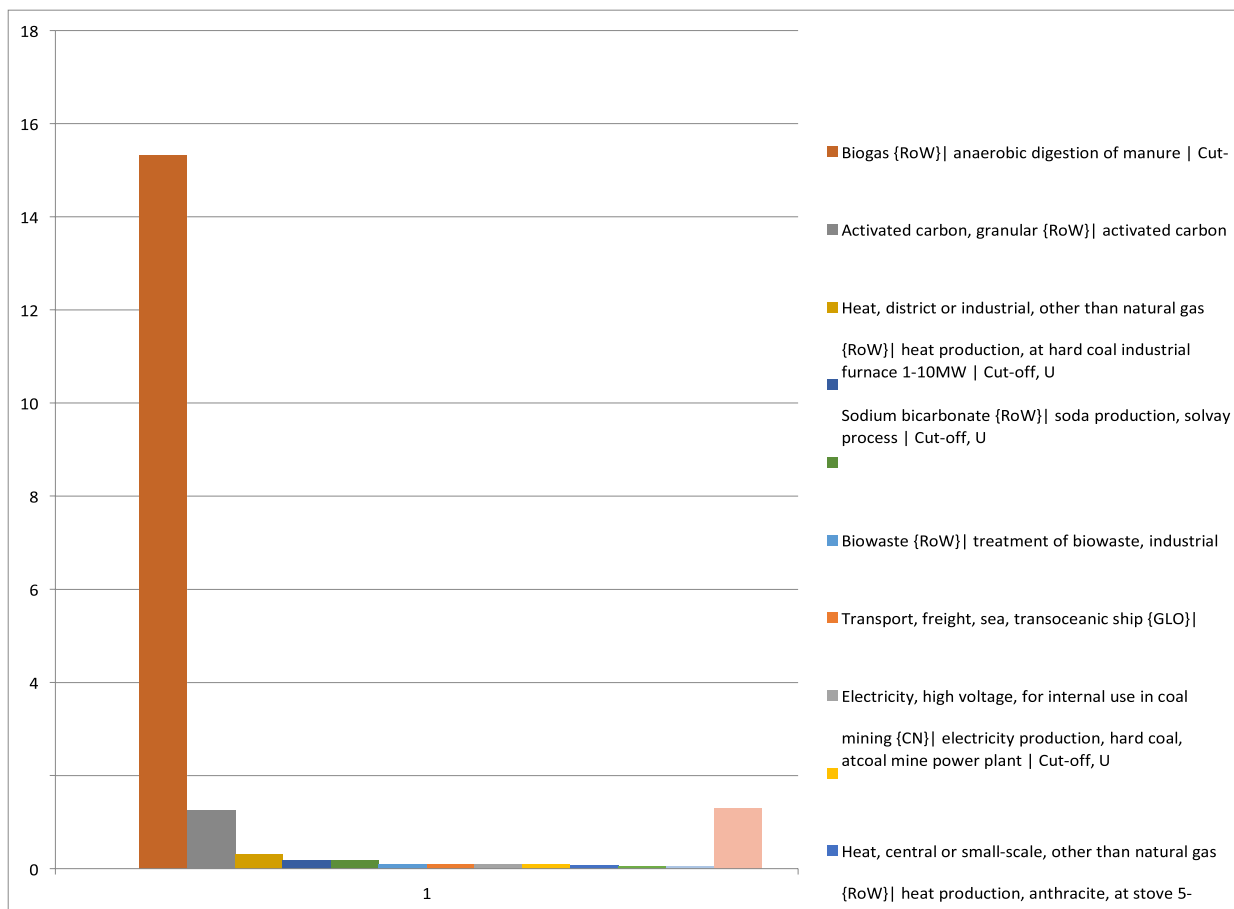
En la Figura A20 y en la Tabla A20 se presentan 2 procesos que predominan en la contribución de esta categoría: los productos ácidos orgánicos y solventes (que son extraídos en el proceso de extracción a partir de sólidos fermentados en H), nuevamente el carbón activado que se usa en NN y en el proceso S respectivamente. Un proceso omitido de transportación que causa emisiones por el consumo de los frenos de los vehículos de transporte se presenta en el tercer lugar.

**Tabla A20. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría ecotoxicidad terrestre en unidades de kg 1,4 DCB e**

Proceso	Total	BRF-E	BRF-H	BRF-M	BRF-NN	BRF-S	BRF-Z
El total de todos los procesos	832.154	272.233	68.499	23.099	153.691	66.062	248.570
Procesos remanentes	92.452	5.683	11.432	4.454	24.696	20.835	25.351
Ácidos orgánicos y solventes	168.017	168.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Activated carbon, granular {RoW}  activated carbon production, granular from hard coal   Cut-off, U	88.593	0.000	0.000	0.000	88.593	0.000	0.000
Brake wear emissions, lorry {RoW}  treatment of   Cut-off, U	78.504	4.239	7.478	3.828	9.560	12.496	40.902
Extracted fermented waste wb	72.007	72.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zinc monosulfate {RER}  production   Cut-off, U	38.716	0.002	0.004	0.001	0.002	0.006	38.702
Brake wear emissions, lorry {RER}  treatment of   Cut-off, U	31.902	1.723	3.039	1.556	3.885	5.078	16.622
Zinc monosulfate {RoW}  production   Cut-off, U	22.436	0.661	0.006	0.001	0.186	0.294	21.287
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U	21.319	0.723	14.644	0.026	0.485	0.392	5.049
Sulfuric acid {RoW}  primary zinc production from concentrate   Cut-off, U	20.250	0.615	0.006	0.001	0.173	0.274	19.182
Ammonia, liquid {RoW}  ammonia production, steam reforming, liquid   Cut-off, U	19.668	0.012	0.559	0.007	0.126	0.081	18.883
Ammonium sulfate, as N {GLO}  nickel mine operation, sulfidic ore   Cut-off, U	18.966	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	18.966
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW   Cut-off, U	15.991	0.423	11.175	0.019	0.360	0.293	3.720
Ammonia, liquid {RoW}  ammonia production, partial oxidation, liquid   Cut-off, U	15.108	0.009	0.430	0.005	0.097	0.062	14.505
Electricity, high voltage {RoW}  electricity production, oil   Cut-off, U	14.591	0.556	0.665	0.304	5.655	5.473	1.939
Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW}  heat production, anthracite, at stove 5-15kW   Cut-off, U	10.940	0.012	3.445	6.761	0.675	0.006	0.041
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   Cut-off, U	10.778	0.000	7.505	2.701	0.249	0.323	0.000
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}  processing   Cut-off, U	9.074	0.235	0.382	0.099	4.500	0.728	3.130
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW   Cut-off, U	8.150	4.396	0.036	0.003	0.028	0.022	3.664
_Acetic acid modif2 HP, without water, in 98% solution state {RoW}  acetic acid production, product in 98% solution state   Cut-off, U	8.024	8.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Electricity, high voltage {SA}  electricity production, oil   Cut-off, U	6.888	0.268	0.315	0.142	2.742	2.640	0.781

## Anexo 21. Resultados de contribución de procesos a la categoría de acidificación terrestre de BRF H-M-Z-S-NN

En la figura A21 y tabla A21 se observan los resultados referentes contribución de procesos a la categoría de acidificación terrestre.



**Figura A21. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría acidificación terrestre. Unidades en kg SO<sub>2</sub> e (Poggi-Varaldo, 2019)**

Se observa en la Figura A21 y en la tabla A21 que los procesos que más contribuyen están relacionados a la metanogénesis/digestión anaerobia que ocurre en el Proceso M como en el proceso NN, aporta con un 67% de la contribución. Seguido de él nuevamente se encuentra el Carbón activado que es un recurso de los procesos NN y S. En el primer proceso se utiliza como amortiguador para conformar las nanobio partículas; posteriormente se usa para detoxificar aquellos hidrolizados abundantes en

azúcares reductores que poseen inhibidores de fermentación como los son compuestos fenólicos y furanos.

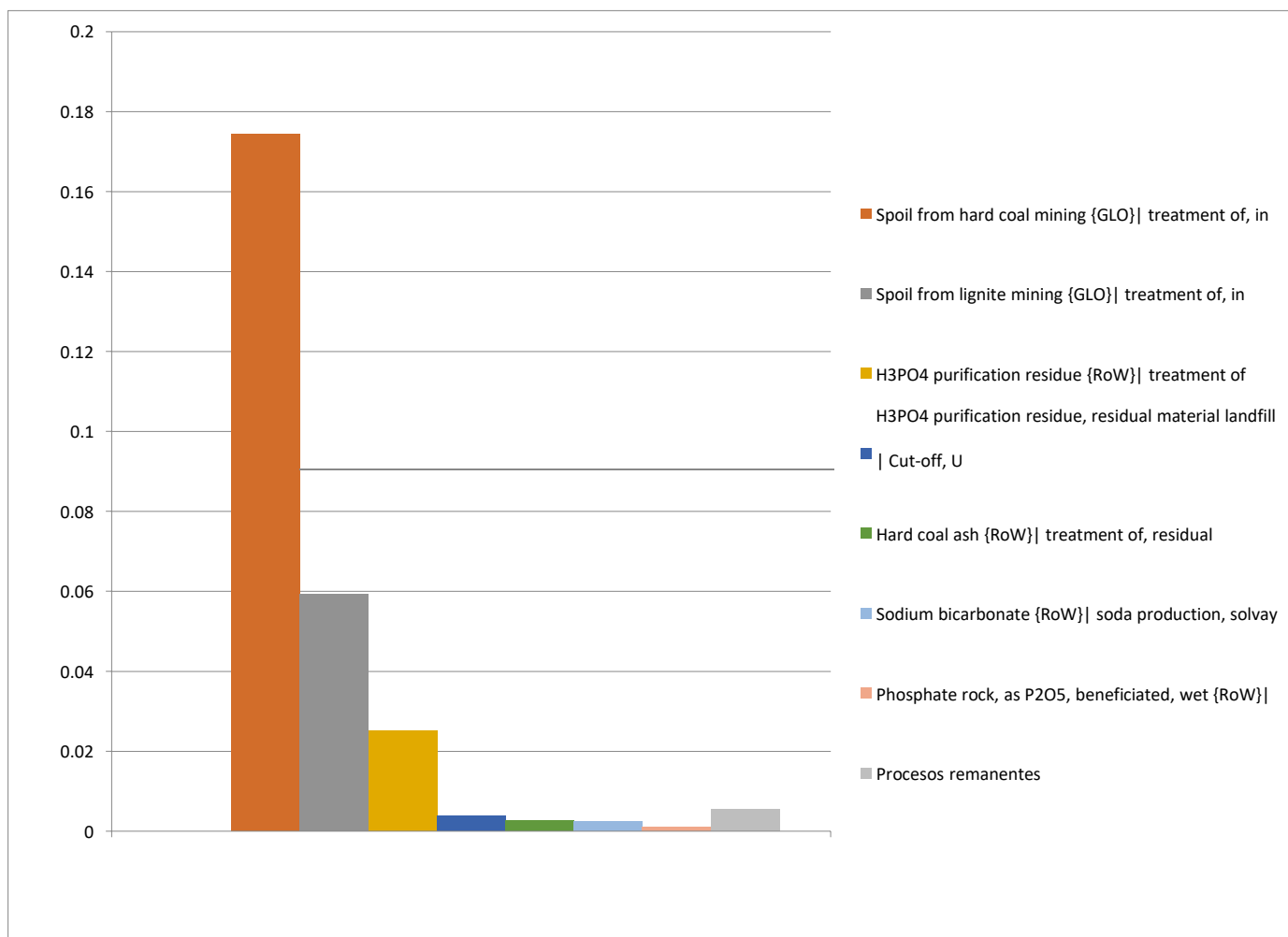
**Tabla A 2 1 . Contribuciones de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría acidificación terrestre: valores tabulados en kg SO<sub>2</sub> e**

Proceso	Unidad	Total	_BRF-ETAPA EXTRACCIÓN	_BRF-ETAPA H	_BRF-ETAPA M	_BRF-ETAPA NN	_BRF-ETAPA SACARIFICACION	_BRF-ETAPA Z
El total de todos los procesos	kg SO <sub>2</sub> e	1.91E+01	1.08E-01	5.40E+00	9.68E+00	2.65E+00	4.23E-01	7.99E-01
Procesos remanentes	kg SO <sub>2</sub> e	1.30E+00	4.33E-02	1.30E-01	1.09E-01	3.39E-01	2.49E-01	4.32E-01
Biogas {RoW}  anaerobic digestion of manure   Cut-off, U	kg SO <sub>2</sub> e	1.53E+01	5.33E-04	4.84E+00	9.53E+00	9.44E-01	4.78E-03	5.68E-03
Activated carbon, granular {RoW}  activated carbon production, granular from hard coal   Cut-off, U	kg SO <sub>2</sub> e	1.25E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.25E+00	0.00E+00	0.00E+00
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U	kg SO <sub>2</sub> e	3.00E-01	1.02E-02	2.06E-01	3.66E-04	6.83E-03	5.53E-03	7.11E-02
Sodium bicarbonate {RoW}  soda production, solvay process   Cut-off, U	kg SO <sub>2</sub> e	1.88E-01	0.00E+00	1.88E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sulfuric acid {RER}  production   Cut-off, U	kg SO <sub>2</sub> e	1.73E-01	3.20E-06	1.78E-05	2.97E-06	6.02E-06	2.53E-05	1.73E-01
Biowaste {RoW}  treatment of biowaste, industrial composting   Cut-off, U	kg SO <sub>2</sub> e	9.60E-02	9.16E-10	4.22E-08	2.87E-09	3.86E-09	9.60E-02	5.63E-06
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}  processing   Cut-off, U	kg SO <sub>2</sub> e	9.10E-02	2.36E-03	3.83E-03	9.98E-04	4.51E-02	7.31E-03	3.14E-02
Electricity, high voltage, for internal use in coal mining {CN}  electricity production, hard coal, at coal mine power plant   Cut-off, U	kg SO <sub>2</sub> e	8.59E-02	1.54E-03	8.77E-03	2.26E-03	5.86E-02	9.44E-03	5.26E-03
Sulfuric acid {RoW}  production   Cut-off, U	kg SO <sub>2</sub> e	8.46E-02	2.57E-03	2.33E-05	4.47E-06	7.22E-04	1.14E-03	8.01E-02
Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW}  heat production, anthracite, at stove 5-15kW   Cut-off, U	kg SO <sub>2</sub> e	6.61E-02	6.97E-05	2.08E-02	4.09E-02	4.08E-03	3.66E-05	2.46E-04
Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, 1kV - 60kV EU-27 S System - Copied from ELCD	kg SO <sub>2</sub> e	4.98E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.98E-02	0.00E+00
Acetone, liquid {RoW}  production   Cut-off, U	kg SO <sub>2</sub> e	4.76E-02	4.76E-02	5.86E-07	1.51E-07	2.94E-07	1.80E-07	2.85E-06



## Anexo 22. Resultados de contribución de procesos a la categoría de eutroficación de agua dulce para BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados de contribuciones de procesos y de las etapas de la BRF a la categoría de eutroficación de agua dulce se muestran en la Fig. A22 y Tabla A22.



**Figura A22. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría Eutroficación de agua dulce. Unidades en kg P e (Poggi-Varaldo 2019)**

Se muestra en la Figura A22 que las contribuciones más relevantes se tratan de el proceso M como en el proceso NN (método “Biogas RoW| anaerobic digestion of manure...” ). Seguido del Carbón activado que es un recurso de los procesos NN y S. En el primer proceso se utiliza como amortiguador para conformar las nanobio partículas; posteriormente se usa para destoxificar aquellos hidrolizados abundantes en azúcares

reductores que poseen inhibidores de fermentación como los son compuestos fenólicos y furanos.

**Tabla A22. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría eutroficación de agua dulce. Unidades en kg P e**

Proceso	Unidad	Total	ETAPA EXTRACCION	ETAPAH	ETAPAM	ETAPAN	ETAPA SACARIFICA CION	ETAPAZ
El total de todos los procesos	kg P e	2.74E-01	5.78E-03	2.50E-02	7.08E-03	1.47E-01	3.55E-02	5.39E-02
Procesos remanentes	kg P e	4.71E-03	1.34E-04	2.36E-04	6.33E-05	5.38E-04	4.71E-04	3.26E-03
Spoil from hard coal mining (GLO) treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg P e	1.74E-01	2.79E-03	1.62E-02	4.65E-03	1.24E-01	1.55E-02	1.10E-02
Spoil from lignite mining (GLO) treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	kg P e	5.93E-02	1.98E-03	5.80E-03	2.34E-03	2.05E-02	1.90E-02	9.68E-03
H3PO4 purification residue (RoW) treatment of H3PO4 purification residue, residual material landfill   Cut-off, U	kg P e	2.52E-02	1.17E-08	1.83E-07	1.70E-08	-8.22E-08	5.23E-08	2.52E-02
Sulfidic tailing, off-site (GLO) treatment of   Cut-off, U	kg P e	3.77E-03	7.95E-05	8.71E-05	1.77E-06	5.52E-05	4.05E-05	3.51E-03
Hard coal ash (RoW) treatment of, residual material landfill   Cut-off, U	kg P e	2.67E-03	5.37E-05	1.03E-04	3.58E-05	1.79E-03	5.02E-04	1.83E-04
Sodium bicarbonate (RoW) soda production, solvay process   Cut-off, U	kg P e	2.50E-03	0.00E+00	2.50E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Phosphate rock, as P2O5, beneficiated, wet (RoW) phosphate rock beneficiation, wet   Cut-off, U	kg P e	1.14E-03	4.86E-09	3.53E-08	9.55E-09	2.25E-08	7.40E-09	1.14E-03
Acetone, liquid (RoW) production   Cut-off, U	kg P e	7.47E-04	7.47E-04	9.19E-09	2.37E-09	4.61E-09	2.82E-09	4.47E-08

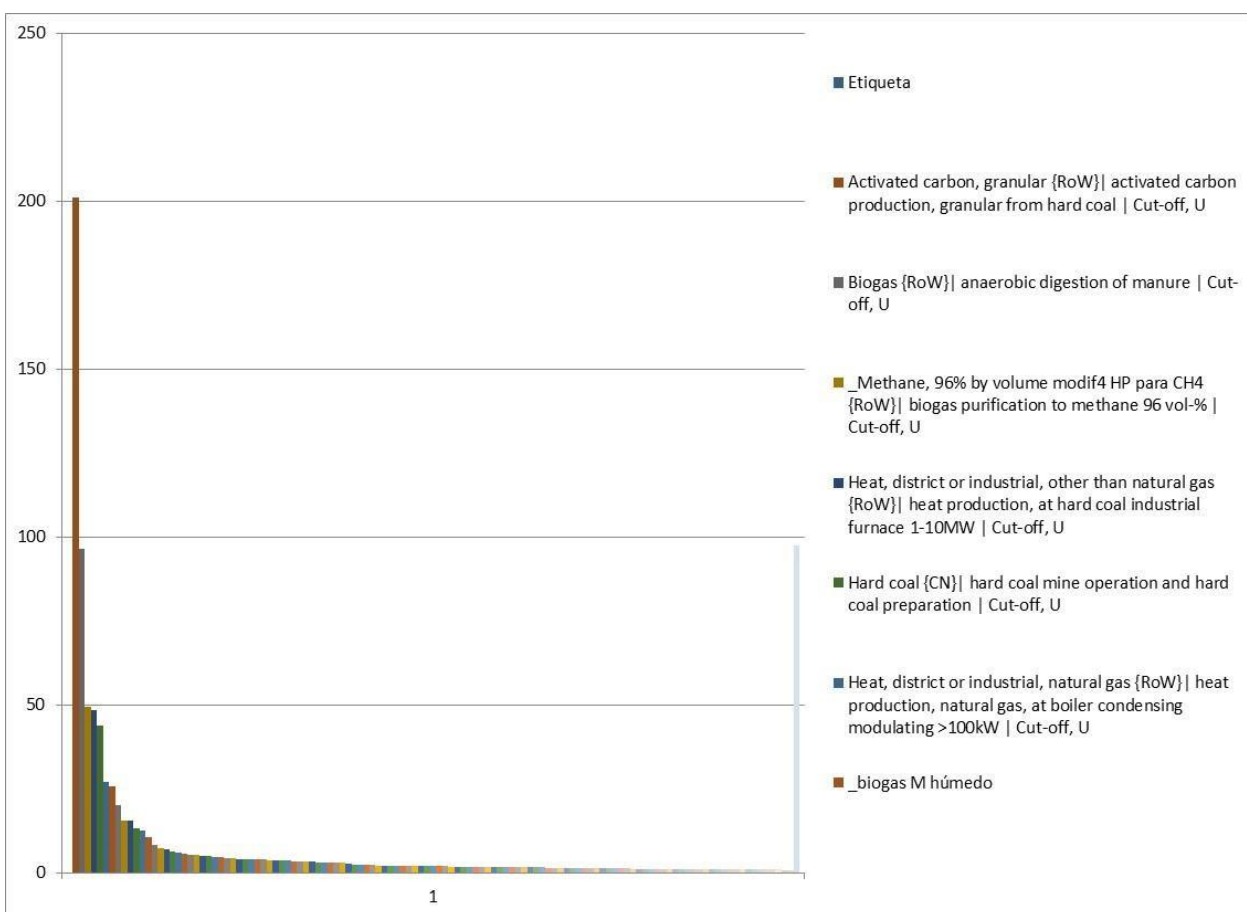
La Tabla A22 presenta que los procesos M y H poseen las mayores contribuciones en la clasificación de impacto (50 y 25% respectivamente).

Las etapas exhibidas en la en primer lugar, se encuentra la etapa NN con un 50% de la contribución total, a diferencia de la etapa Z que se posiciona en un segundo lugar con un 20% de la contribución total.

En los procesos que están relacionados a residuos de la minería de Carbón, se encuentra notoriamente la etapa NN, mientras que para los residuos de la purificación de ácido fosfórico predomina la Etapa Z

### Anexo 23. Resultados de contribución de procesos a la categoría de calentamiento global de BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados de contribuciones de procesos y de las etapas de la BRF a la categoría de calentamiento global se muestran en la Fig. A23 y Tabla A23.



**Figura A23. Contribuciones generales de los procesos a la categoría contribuciones generales de los procesos a la categoría calentamiento global de la BRF H-M-Z-S-NN (Poggi-Varaldo, 2019)**

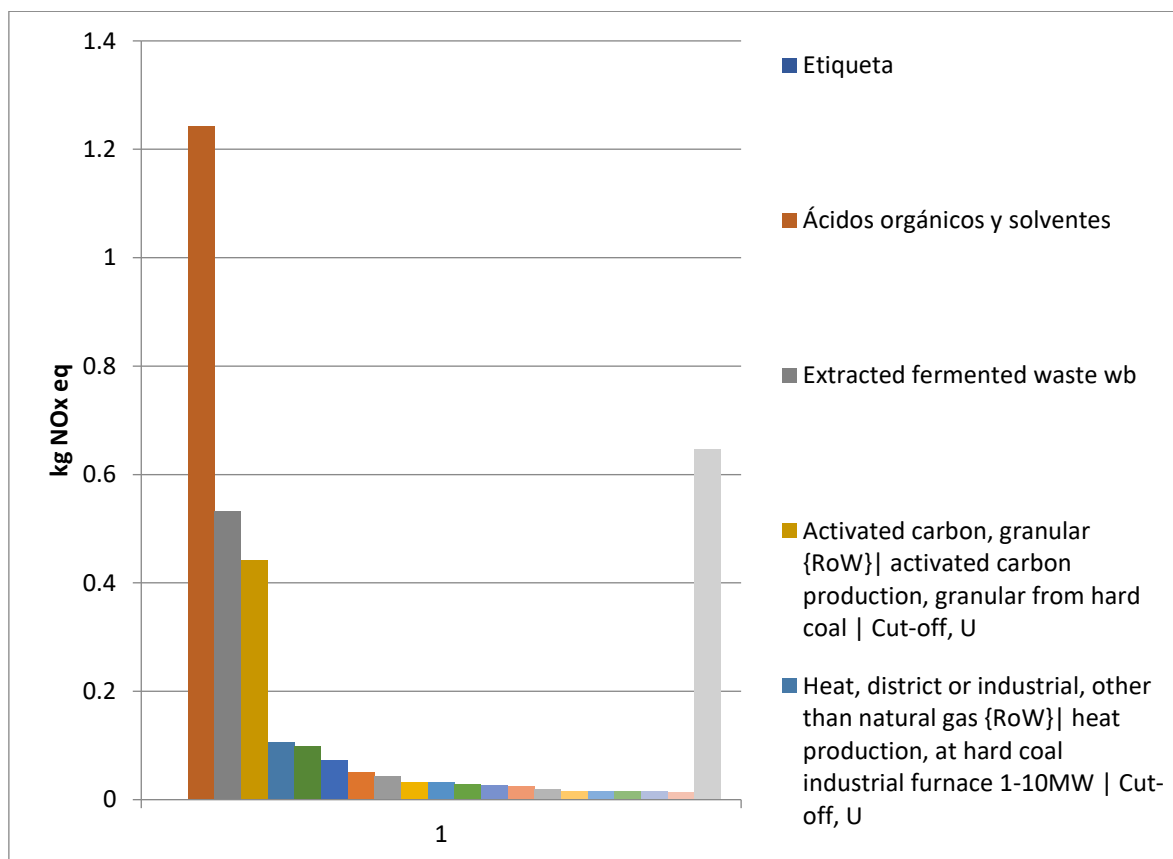
En la tabla A23 y la figura A23, se observa que los procesos de contribución a nivel BRFs, son los que están asociados a la etapa NN (consecuencia del carbón activado y procesos proxi no explícitos de su producción) y a la etapa M (Biogás de la digestión anaerobia de residuos agropecuarios resto del mundo'; 'biogás metanogénico húmedo producido en el birreactor M'; 'purificación del metano.

**Tabla A23. Contribuciones generales de los procesos a la categoría Contribuciones generales de los procesos a la categoría calentamiento global de la BRF H-M-Z-S-NN (Poggi-Varaldo, 2019)**

Proceso	Unidad	Total	BRF-ETAPA EXTRACCION	BRF-ETAPA H	BRF-ETAPA M	BRF-ETAPA NN	BRF-ETAPA SACARIFICACION	BRF-ETAPA Z
El total de todos los procesos	kg CO2 e	942.43	33.79	126.64	159.73	357.40	94.53	170.34
Procesos remanentes	kg CO2 e	55.46	2.87	5.73	2.69	14.67	9.87	19.62
Activated carbon, granular (RoW)  activated carbon production, granular from hard coal   Cut-off, U	kg CO2 e	201.10	0.00	0.00	0.00	201.10	0.00	0.00
Biogas (RoW)  anaerobic digestion of manure   Cut-off, U	kg CO2 e	96.67	0.00	30.52	60.12	5.95	0.03	0.04
_Methane, 96% by volume modif4 HP para CH4 (RoW)  biogas purification to methane 96 vol-%   Cut-off, U	kg CO2 e	49.40	0.00	0.00	49.40	0.00	0.00	0.00
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW)  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U	kg CO2 e	48.39	1.64	33.24	0.06	1.10	0.89	11.46
Hard coal (CN)  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 e	43.82	0.79	4.47	1.15	29.91	4.81	2.68
Heat, district or industrial, natural gas (RoW)  heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW   Cut-off, U	kg CO2 e	27.04	0.00	0.00	0.00	0.00	2.46	24.58
_biogas M húmedo	kg CO2 e	25.83	0.00	0.00	25.83	0.00	0.00	0.00
Sodium phosphate (RoW)  production   Cut-off, U	kg CO2 e	20.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.27
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor (GLO)  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   Cut-off, U	kg CO2 e	15.67	0.00	10.91	3.93	0.36	0.47	0.00
Heat, central or small-scale, other than natural gas (RoW)  heat production, anthracite, at stove 5-15kW   Cut-off, U	kg CO2 e	15.62	0.02	4.92	9.65	0.96	0.01	0.06
Acetone, liquid (RoW)  production   Cut-off, U	kg CO2 e	13.42	13.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fermented wastes	kg CO2 e	12.78	0.00	12.78	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat, district or industrial, natural gas (RU)  heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical   Cut-off, U	kg CO2 e	10.62	0.49	0.11	0.00	6.37	0.04	3.61
Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, 1kV - 60kV EU-27 S System - Copied from ELCD	kg CO2 e	8.33	0.00	0.00	0.00	0.00	8.33	0.00
Ethylene, average (RoW)  production   Cut-off, U	kg CO2 e	7.42	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	7.41
Heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)  heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW   Cut-off, U	kg CO2 e	7.13	0.25	0.17	0.00	0.01	0.01	6.70
Cow milk (RoW)  milk production, from cow   Cut-off, U	kg CO2 e	6.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.50
Electricity, high voltage (CN-NM)  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 e	6.19	0.24	0.30	0.13	2.53	2.30	0.70
Electricity, high voltage, for internal use in coal mining (CN)  electricity production, hard coal, at coal mine power plant   Cut-off, U	kg CO2 e	5.86	0.11	0.60	0.15	4.00	0.64	0.36
Hard coal (RoW)  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg CO2 e	5.49	0.06	0.07	0.03	4.81	0.23	0.29
Heat, district or industrial, natural gas (RoW)  heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical   Cut-off, U	kg CO2 e	5.30	0.24	0.06	0.00	3.18	0.02	1.80
_Methane, 96% by volume modif2 HP para CH4 (RoW)  biogas purification to methane 96 vol-%   Cut-off, U	kg CO2 e	5.23	0.00	0.00	0.00	5.23	0.00	0.00
Ammonia, liquid (RoW)  ammonia production, steam reforming, liquid   Cut-off, U	kg CO2 e	5.19	0.00	0.15	0.00	0.03	0.02	4.99
Electricity, high voltage (CN-SD)  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 e	4.63	0.18	0.23	0.10	1.89	1.72	0.52
Electricity, high voltage (CN-JS)  electricity production, hard coal   Cut-off, U	kg CO2 e	4.61	0.18	0.23	0.10	1.88	1.71	0.52
Propylene (RoW)  production   Cut-off, U	kg CO2 e	4.27	4.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
Hard coal, run-of-mine (IN)  hard coal mine operation   Cut-off, U	kg CO2 e	4.26	0.09	0.40	0.11	2.71	0.65	0.30
Electricity, high voltage (RFC)  electricity production, lignite   Cut-off, U	kg CO2 e	4.25	0.16	0.19	0.09	1.64	1.59	0.58
Electricity, high voltage (RU)  heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical   Cut-off, U	kg CO2 e	4.23	0.16	0.22	0.09	1.74	1.53	0.48
Transport, freight, sea, transoceanic ship (GLO)  processing   Cut-off, U	kg CO2 e	4.18	0.11	0.18	0.05	2.07	0.34	1.44

## Anexo 24. Resultados de contribución de procesos a la categoría de formación de ozono en ecosistemas terrestres de BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados de contribuciones de procesos y de las etapas de la BRF a la categoría de formación de ozono en ecosistemas terrestres se muestran en la Fig. A24 y Tabla A24.



**Figura A24. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría Formación de ozono en ecosistemas terrestres. Unidades en kg NOx e (Poggi-Varaldo, 2019)**

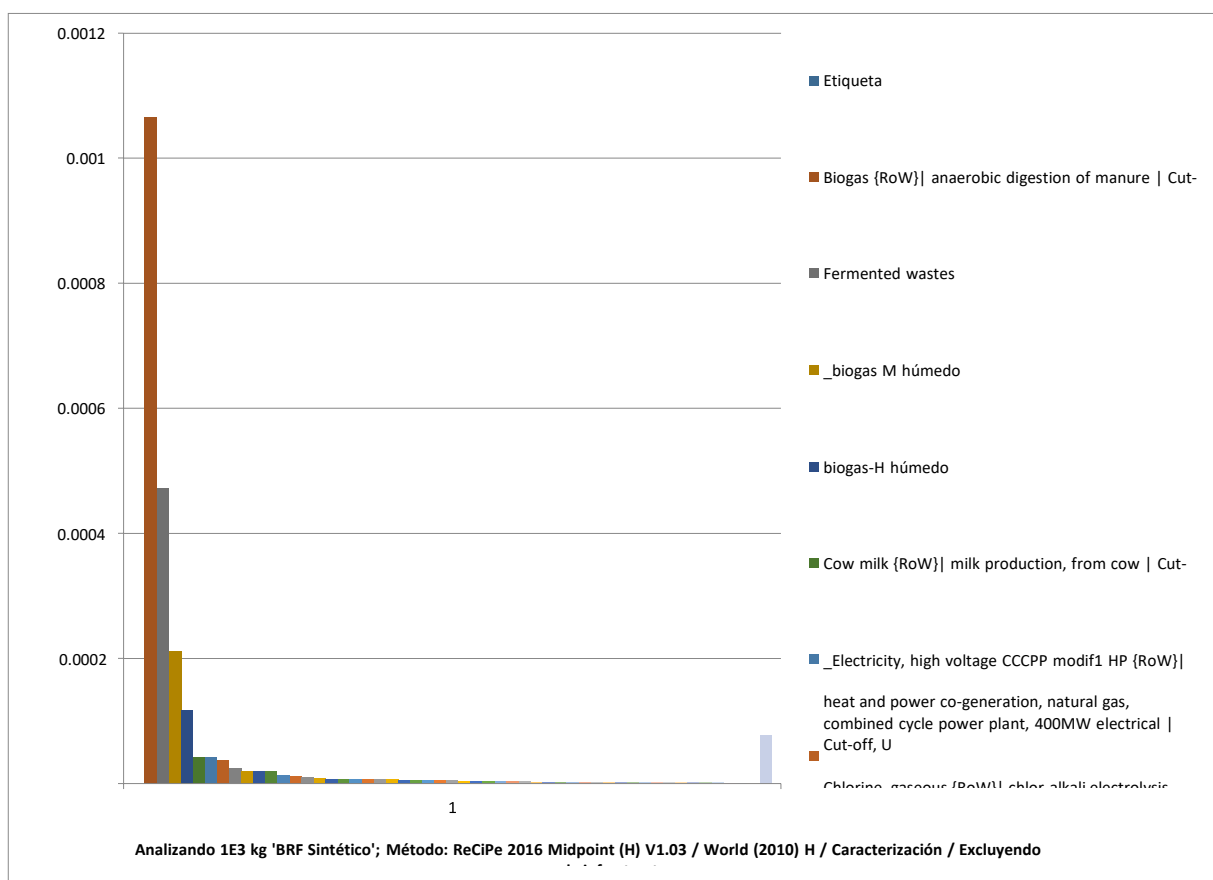
Existen 3 procesos que predominan en un orden descendente y son: 'Ácidos orgánicos y solventes', 'Extracted fermented waste', y la producción de C activado (Figura A23). En la etapa E se generan los dos primeros productos (extracción de ácidos orgánicos y solventes). Proporcionando el 60% de los sólidos fermentados que salen del biorreactor H y que son objeto de extracción líquido-líquido y el extracto es destilado para reusar el solvente de extracción. Mientras que el tercer proceso, destaca a las etapas NN y S, que es donde se utiliza el carbón activado.

**Tabla A24. Contribuciones de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría formación de ozono en ecosistemas terrestres: valores tabulados en kg NO<sub>x</sub> e**

Proceso	Total	_BRF-ETAPA EXTRACCION	_BRF-ETAPA H	_BRF-ETAPA M	_BRF- ETAPA NN	_BRF-ETAPA SACARIFICA CION	_BRF-ETAPA Z
El total de todos los procesos	3.48E+00	1.91E+00	1.85E-01	1.38E-01	7.53E-01	1.76E-01	3.13E-01
Procesos remanentes	4.07E-01	2.65E-02	4.51E-02	1.17E-02	1.08E-01	9.22E-02	1.24E-01
Ácidos orgánicos y solventes	1.24E+00	1.24E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Extracted fermented waste wb	5.33E-01	5.33E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Activated carbon, granular (RoW)  activated carbon production, granular from hard coal   Cut-off, U	4.43E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.43E-01	0.00E+00	0.00E+00
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW)  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U	1.07E-01	3.61E-03	7.32E-02	1.30E-04	2.42E-03	1.96E-03	2.52E-02
Electricity, high voltage CCCPP modif1 HP (RoW)  heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical   Cut-off, U	9.92E-02	0.00E+00	0.00E+00	8.98E-02	9.43E-03	0.00E+00	0.00E+00
Transport, freight, sea, transoceanic ship (GLO)  processing   Cut-off, U	7.34E-02	1.90E-03	3.09E-03	8.05E-04	3.64E-02	5.90E-03	2.53E-02
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor (GLO)  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   Cut-off, U	5.01E-02	1.65E-11	3.49E-02	1.26E-02	1.16E-03	1.50E-03	9.56E-08
4-methyl-2-pentanone (RoW)  production   Cut-off, U	4.33E-02	4.33E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Dodecanol (GLO)  dodecanol production, ziegler process   Cut-off, U	3.29E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.29E-02
Acetone, liquid (RoW)  production   Cut-off, U	3.16E-02	3.16E-02	3.88E-07	1.00E-07	1.95E-07	1.19E-07	1.89E-06
Transport, freight train (RoW)  diesel   Cut-off, U	2.95E-02	1.87E-03	2.04E-03	9.23E-04	8.09E-03	4.93E-03	1.17E-02
Blasting (RoW)  processing   Cut-off, U	2.60E-02	4.13E-04	3.04E-03	6.15E-04	1.58E-02	2.42E-03	3.68E-03
Electricity, high voltage, for internal use in coal mining (CN)  electricity production, hard coal, at coal mine power plant   Cut-off, U	2.51E-02	4.51E-04	2.56E-03	6.61E-04	1.71E-02	2.76E-03	1.54E-03
Electricity, high voltage (CN-NM)  electricity production, hard coal   Cut-off, U	2.01E-02	7.65E-04	9.90E-04	4.20E-04	8.22E-03	7.46E-03	2.27E-03
Diesel, burned in building machine (GLO)  processing   Cut-off, U	1.63E-02	1.55E-04	2.53E-03	2.48E-04	6.73E-03	1.06E-03	5.52E-03
Transport, freight train (CN)  diesel   Cut-off, U	1.60E-02	2.89E-04	1.63E-03	4.22E-04	1.09E-02	1.78E-03	9.85E-04
Electricity, high voltage (CN-SD)  electricity production, hard coal   Cut-off, U	1.51E-02	5.73E-04	7.41E-04	3.15E-04	6.15E-03	5.59E-03	1.70E-03
Electricity, high voltage (CN-JS)  electricity production, hard coal   Cut-off, U	1.50E-02	5.70E-04	7.38E-04	3.13E-04	6.13E-03	5.56E-03	1.69E-03
Ethylene, average (RoW)  production   Cut-off, U	1.43E-02	1.57E-07	1.02E-05	3.46E-06	1.65E-06	1.07E-06	1.43E-02
Sulfuric acid (RER)  production   Cut-off, U	1.39E-02	2.56E-07	1.42E-06	2.38E-07	4.82E-07	2.03E-06	1.39E-02
Electricity, high voltage (ZA)  electricity production, hard coal, conventional   Cut-off, U	1.35E-02	5.12E-04	7.55E-04	2.90E-04	5.40E-03	5.00E-03	1.55E-03
Blasting (RER)  processing   Cut-off, U	1.29E-02	2.04E-04	1.50E-03	3.04E-04	7.81E-03	1.20E-03	1.89E-03
Acetone, liquid (RoW)  acetone production, from isopropanol   Cut-off, U	1.28E-02	1.28E-02	1.58E-07	4.07E-08	7.93E-08	4.84E-08	7.67E-07
Electricity, high voltage (RoW)  electricity production, oil   Cut-off, U	1.22E-02	4.66E-04	5.58E-04	2.55E-04	4.74E-03	4.59E-03	1.63E-03
Electricity, high voltage (CN-SX)  electricity production, hard coal   Cut-off, U	1.15E-02	4.35E-04	5.63E-04	2.39E-04	4.68E-03	4.25E-03	1.29E-03
Electricity, high voltage (CN-HE)  electricity production, hard coal   Cut-off, U	1.12E-02	4.25E-04	5.50E-04	2.34E-04	4.57E-03	4.15E-03	1.26E-03

## Anexo 25. Resultados de contribución de procesos a la categoría deterioró de ozono en la estratosfera de BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados de contribuciones a procesos y de las etapas de la BRF a la categoría deterioro de ozono a la atmósfera se muestran en la Fig. A25 y Tabla A25.



**Figura A25. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría Deterioro de ozono en la estratósfera. Unidades en kg CFC11 e (Poggi-Varaldo, 2019)**

En la figura A25 y la tabla A25 se muestra el proceso “Biogas RoW| anaerobic digestion of manure | Cut-off, U” que se encuentran en el proxi que representa la digestión metanogénica en el proceso M, así como los procesos de una menor escala metanogénica del proceso NN (solo recolecta un 45% del impacto de la categoría).

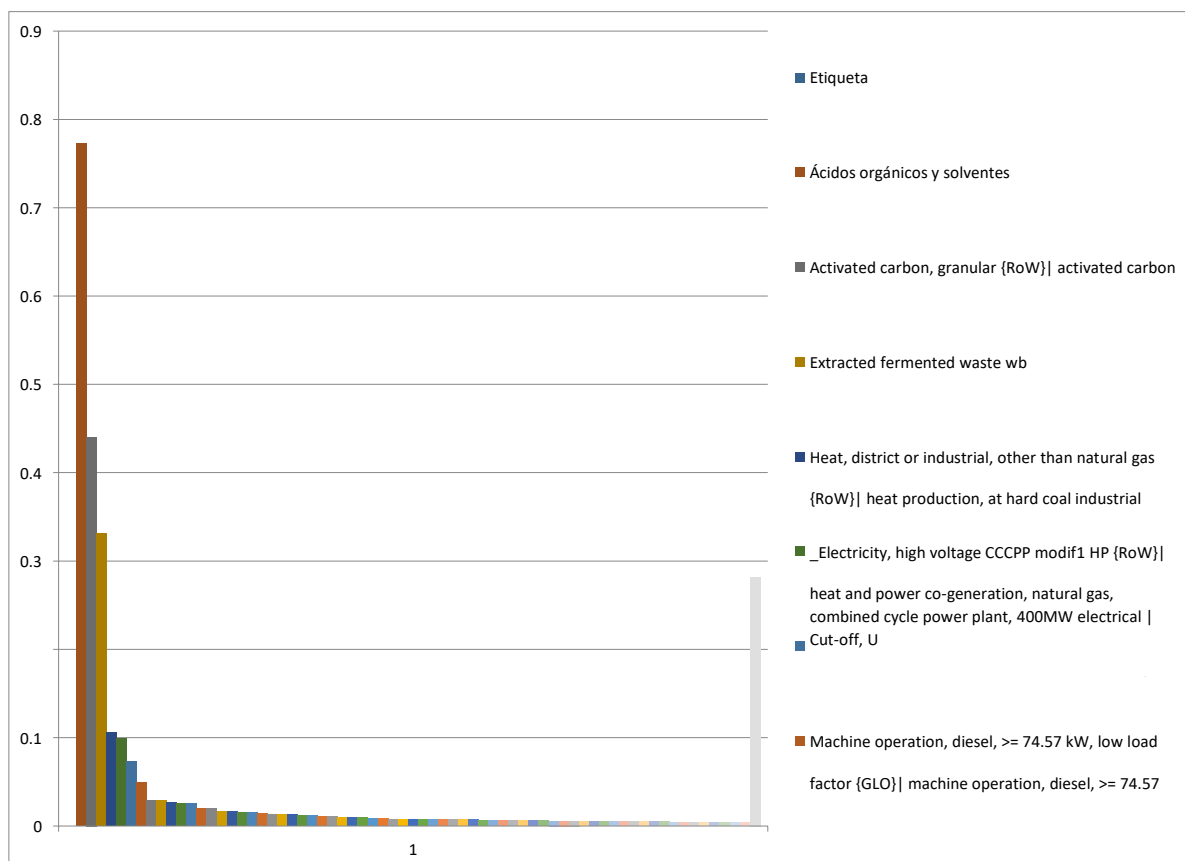
**Tabla A25. Contribuciones de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría Deterioro de ozono en la estratósfera: valores tabulados en kg CFC11 e (Poggi-Varaldo, 2019)**

Proceso	Unidad	Total	_BRF- ETAPA EXTRAC CIO N	_BRF- ETA PAH	_BRF- ETA PAM	_BRF- ETAP ANN	_BRF- ETAPA SACARIFI CACION	_BRF- ETA PAZ
El total de todos los procesos	kg CFC11 e	2.33E-03	4.48E-06	9.54E-04	9.24E-04	1.69E-04	8.82E-05	1.87E-04
Procesos remanentes	kg CFC11 e	7.81E-05	2.35E-06	7.07E-06	2.17E-06	2.28E-05	1.83E-05	2.54E-05
Biogas {RoW}  anaerobic digestion of manure   Cut-off, U	kg CFC11 e	1.07E-03	3.71E-08	3.37E-04	6.63E-04	6.56E-05	3.33E-07	3.95E-07
Fermented wastes	kg CFC11 e	4.72E-04	0.00E+00	4.72E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
_biogas M húmedo	kg CFC11 e	2.12E-04	0.00E+00	0.00E+00	2.12E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
biogas-H húmedo	kg CFC11 e	1.18E-04	0.00E+00	1.18E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Cow milk {RoW}  milk production, from cow   Cut-off, U	kg CFC11 e	4.25E-05	1.87E-23	3.15E-23	7.95E-24	2.88E-22	2.84E-23	4.25E-05
_Electricity, high voltage CCCPP modif1 HP {RoW}  heat and power co-generation,natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical   Cut-off, U	kg CFC11 e	4.18E-05	0.00E+00	0.00E+00	3.78E-05	3.97E-06	0.00E+00	0.00E+00
Chlorine, gaseous {RoW}  chlor-alkali electrolysis, membrane cell   Cut-off, U	kg CFC11 e	3.75E-05	4.68E-10	7.84E-10	2.94E-10	9.66E-06	2.78E-05	9.61E-09
Activated carbon, granular {RoW}  activated carbon production, granular from hard coal   Cut-off, U	kg CFC11 e	2.40E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.40E-05	0.00E+00	0.00E+00
Alfalfa-grass silage {RoW}  alfalfa/grass silage production   Cut-off, U	kg CFC11 e	2.04E-05	8.98E-24	1.51E-23	3.82E-24	1.38E-22	1.37E-23	2.04E-05
Coconut, dehusked {PH}  coconut production, dehusked   Cut-off, U	kg CFC11 e	2.03E-05	1.21E-12	3.58E-10	3.65E-12	9.40E-12	7.79E-12	2.03E-05
Biowaste {RoW}  treatment of biowaste, industrial composting   Cut-off, U	kg CFC11 e	1.93E-05	1.84E-13	8.45E-12	5.74E-13	7.73E-13	1.93E-05	1.13E-09
NN-Bioparticles	kg CFC11 e	1.30E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.30E-05	0.00E+00	0.00E+00
Nitric acid, without water, in 50% solution state {RER}  nitric acid production, product in 50% solution state   Cut-off, U	kg CFC11 e	1.24E-05	7.97E-08	6.00E-07	1.21E-07	2.99E-06	4.72E-07	8.10E-06
Nitric acid, without water, in 50% solution state {RoW}  nitric acid production, product in 50% solution state   Cut-off, U	kg CFC11 e	9.91E-06	6.62E-08	5.05E-07	1.01E-07	2.48E-06	3.91E-07	6.37E-06
Coconut, dehusked {ID}  coconut production, dehusked   Cut-off, U	kg CFC11 e	8.01E-06	4.77E-13	1.41E-10	1.44E-12	3.70E-12	3.07E-12	8.01E-06
Electricity, high voltage {RU}  market for   Cut-off, U	kg CFC11 e	7.69E-06	2.87E-07	4.07E-07	1.68E-07	3.17E-06	2.78E-06	8.74E-07
Coconut, dehusked {RoW}  coconut production, dehusked   Cut-off, U	kg CFC11 e	6.69E-06	3.98E-13	1.18E-10	1.20E-12	3.09E-12	2.56E-12	6.69E-06
Electricity, high voltage {MX}  market for   Cut-off, U	kg CFC11 e	6.58E-06	7.37E-08	4.79E-06	3.98E-08	7.39E-07	7.26E-07	2.15E-07
Chlorine, gaseous {RoW}  chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell   Cut-off, U	kg CFC11 e	6.54E-06	1.03E-10	1.50E-10	4.13E-11	3.80E-08	6.50E-06	2.23E-09
Hay {RoW}  production   Cut-off, U	kg CFC11 e	6.48E-06	2.85E-24	4.81E-24	1.21E-24	4.40E-23	4.34E-24	6.48E-06
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   Cut-off, U	kg CFC11 e	6.46E-06	2.13E-15	4.50E-06	1.62E-06	1.49E-07	1.94E-07	1.23E-11
Petroleum {RoW}  petroleum and gas production, on-shore   Cut-off, U	kg CFC11 e	5.79E-06	1.44E-07	1.63E-06	5.40E-07	8.85E-07	5.71E-07	2.03E-06
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U	kg CFC11 e	5.78E-06	1.96E-07	3.97E-06	7.04E-09	1.31E-07	1.06E-07	1.37E-06
Transport, pipeline, long distance, natural gas {RU}  processing   Cut-off, U	kg CFC11 e	5.63E-06	1.97E-07	1.34E-07	2.76E-08	1.98E-06	4.57E-07	2.84E-06
Maize silage {RoW}  production   Cut-off, U	kg CFC11 e	5.48E-06	2.41E-24	4.07E-24	1.03E-24	3.72E-23	3.67E-24	5.48E-06



## Anexo 26. Resultados de contribución de procesos a la categoría deterioró de ozono en la estratosfera de BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados de contribuciones a procesos y de las etapas de la BRF a la categoría de formación de ozono y salud humana se muestran en la figura A26 y tabla A26.



**Figura A26. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría Formación de ozono y salud humana. Unidades en kg NOx e (Poggi-Varaldo, 2019)**

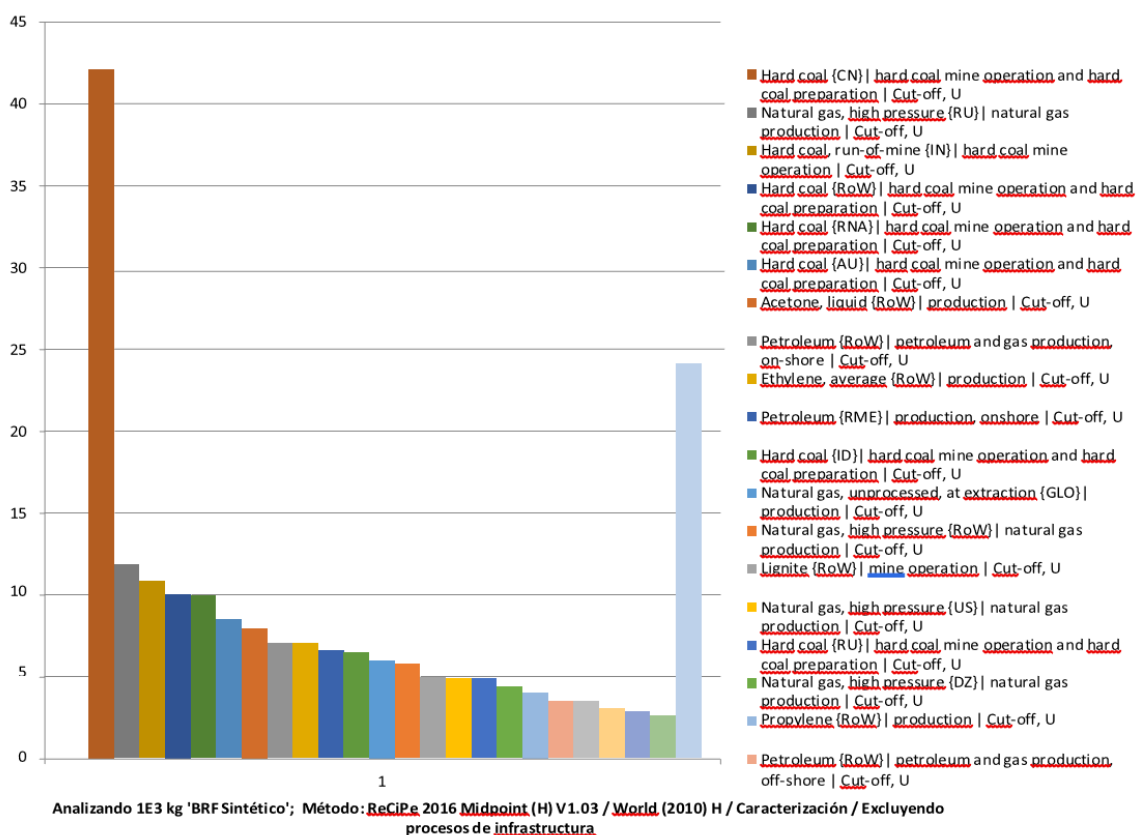
En la figura A26 y la tabla A26 se muestra la contribución del proceso de separación de ácidos orgánicos y solventes de bajo PM, donde destacan como ejecuciones únicas la obtención por solvente (L/L) y la destilación del solvente para ser reutilizado (el solvente usado es metil isobutil cetona).

**Tabla A26. Contribuciones de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría Formación de ozono y salud humana: valores tabulados en kg NOx e (Poggi-Varaldo, 2019)**

Proceso	Proyecto	Unidad	Total	BRF Sintético	_BRF-ETAPA EXTRACCIÓN	_BRF-ETAPA H	_BRF-ETAPA M	_BRF-ETAPA NN	_BRF-ETAPA SACARIFICACIÓN	_BRF-ETAPA Z
El total de todos los procesos		kg NOxeq	2.74E+00	0.00E+00	1.21E+00	1.82E-01	1.37E-01	7.48E-01	1.74E-01	2.91E-01
Procesos remanentes		kg NOxeq	2.82E-01	0.00E+00	1.78E-02	3.38E-02	8.73E-03	7.33E-02	5.75E-02	9.10E-02
Ácidos orgánicos y solventes	HMSZNN	kg NOxeq	7.73E-01	0.00E+00	7.73E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Activated carbon, granular (RoW)   activated carbon production, granular from hard coal   Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocation, out-off by classification - unit	kg NOxeq	4.40E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.40E-01	0.00E+00	0.00E+00
Extracted fermented waste w/b	HMSZNN	kg NOxeq	3.31E-01	0.00E+00	3.31E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW)   heat production, a third coal   industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocation, out-off by classification - unit	kg NOxeq	1.08E-01	0.00E+00	3.59E-03	7.28E-02	1.29E-04	2.41E-03	1.95E-03	2.51E-02
_Electricity, high voltage CCCPP modifi HP (RoW)   heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical   Cut-off, U	HMSZNN	kg NOxeq	9.92E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.98E-02	9.43E-03	0.00E+00	0.00E+00
Transport, freight, sea, transoceanic ship (GLO)   processing   Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocation, out-off by classification - unit	kg NOxeq	7.31E-02	0.00E+00	1.89E-03	3.07E-03	8.01E-04	3.82E-02	5.88E-03	2.52E-02
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor (GLO)   machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor   Cut-off, U	"	kg NOxeq	4.94E-02	0.00E+00	1.63E-11	3.44E-02	1.24E-02	1.14E-03	1.48E-03	9.42E-08
Acetone, liquid (RoW)   production   Cut-off, U	"	kg NOxeq	2.93E-02	0.00E+00	2.93E-02	3.61E-07	9.29E-08	1.81E-07	1.11E-07	1.75E-08
Transport, freight train (RoW)   diesel   Cut-off, U	"	kg NOxeq	2.92E-02	0.00E+00	1.86E-03	2.02E-03	9.14E-04	8.01E-03	4.88E-03	1.18E-02
4-methyl-2-pentanone (RoW)   production   Cut-off, U	"	kg NOxeq	2.89E-02	0.00E+00	2.89E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Blasting (RoW)   processing   Cut-off, U	"	kg NOxeq	2.55E-02	0.00E+00	4.05E-04	2.98E-03	6.04E-04	1.55E-02	2.38E-03	3.61E-03
Electricity, high voltage, for internal use in coal mining (CN)   electricity production, hard coal, at coal mine power plant   Cut-off, U	"	kg NOxeq	2.51E-02	0.00E+00	4.51E-04	2.58E-03	6.61E-04	1.71E-02	2.78E-03	1.54E-03
Dodecanol (GLO)   dodecanol production, ziegler process   Cut-off, U	"	kg NOxeq	2.04E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.04E-02
Electricity, high voltage (CN-NM)   electricity production, hard coal   Cut-off, U	"	kg NOxeq	2.01E-02	0.00E+00	7.65E-04	9.89E-04	4.20E-04	8.21E-03	7.46E-03	2.28E-03
Diesel, burned in building machine (GLO)   processing   Cut-off, U	"	kg NOxeq	1.60E-02	0.00E+00	1.53E-04	2.50E-03	2.45E-04	6.65E-03	1.05E-03	5.40E-03
Transport, freight train (CN)   diesel   Cut-off, U	"	kg NOxeq	1.58E-02	0.00E+00	2.86E-04	1.61E-03	4.18E-04	1.08E-02	1.76E-03	9.75E-04
Electricity, high voltage (CN-SD)   electricity production, hard coal   Cut-off, U	"	kg NOxeq	1.51E-02	0.00E+00	5.73E-04	7.41E-04	3.15E-04	6.15E-03	5.59E-03	1.70E-03
Electricity, high voltage (CN-JS)   electricity production, hard coal   Cut-off, U	"	kg NOxeq	1.50E-02	0.00E+00	5.70E-04	7.38E-04	3.13E-04	6.12E-03	5.56E-03	1.69E-03
Sulfuric acid (RER)   production   Cut-off, U	"	kg NOxeq	1.39E-02	0.00E+00	2.56E-07	1.42E-06	2.38E-07	4.82E-07	2.03E-06	1.39E-02
Electricity, high voltage (ZA)   electricity production, hard coal, conventional   Cut-off, U	"	kg NOxeq	1.35E-02	0.00E+00	5.12E-04	7.55E-04	2.90E-04	5.40E-03	5.00E-03	1.55E-03
Ethylene, average (RoW)   production   Cut-off, U	"	kg NOxeq	1.31E-02	0.00E+00	1.44E-07	9.32E-06	3.17E-06	1.52E-06	9.84E-07	1.31E-02
Blasting (RER)   processing   Cut-off, U	"	kg NOxeq	1.27E-02	0.00E+00	2.00E-04	1.47E-03	2.98E-04	7.66E-03	1.18E-03	1.85E-03
Electricity, high voltage (RoW)   electricity production, oil   Cut-off, U	"	kg NOxeq	1.22E-02	0.00E+00	4.68E-04	5.57E-04	2.55E-04	4.74E-03	4.59E-03	1.63E-03
Electricity, high voltage (CN-SX)   electricity production, hard coal   Cut-off, U	"	kg NOxeq	1.14E-02	0.00E+00	4.35E-04	5.63E-04	2.39E-04	4.67E-03	4.25E-03	1.29E-03
Electricity, high voltage (CN-HE)   electricity production, hard coal   Cut-off, U	"	kg NOxeq	1.12E-02	0.00E+00	4.25E-04	5.50E-04	2.34E-04	4.57E-03	4.15E-03	1.28E-03

## Anexo 27. Resultados de contribución de procesos a la categoría deterioró de ozono en la estratosfera de BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados de contribuciones a procesos y de las etapas de la BRF a la categoría deterioro de ozono a la estratosfera se muestran en la figura A27 y tabla A27.



**Figura A27. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría escasez de recursos fósiles. Unidades en kg de petróleo bruto e. (Poggi-Varaldo, 2019)**

Las aportaciones de procesos particulares a la clasificación de impacto Escasez de recursos fósiles se presenta en la figura A27 por otro lado, los impactos detallados por procesos se recopilan en la tabla A27

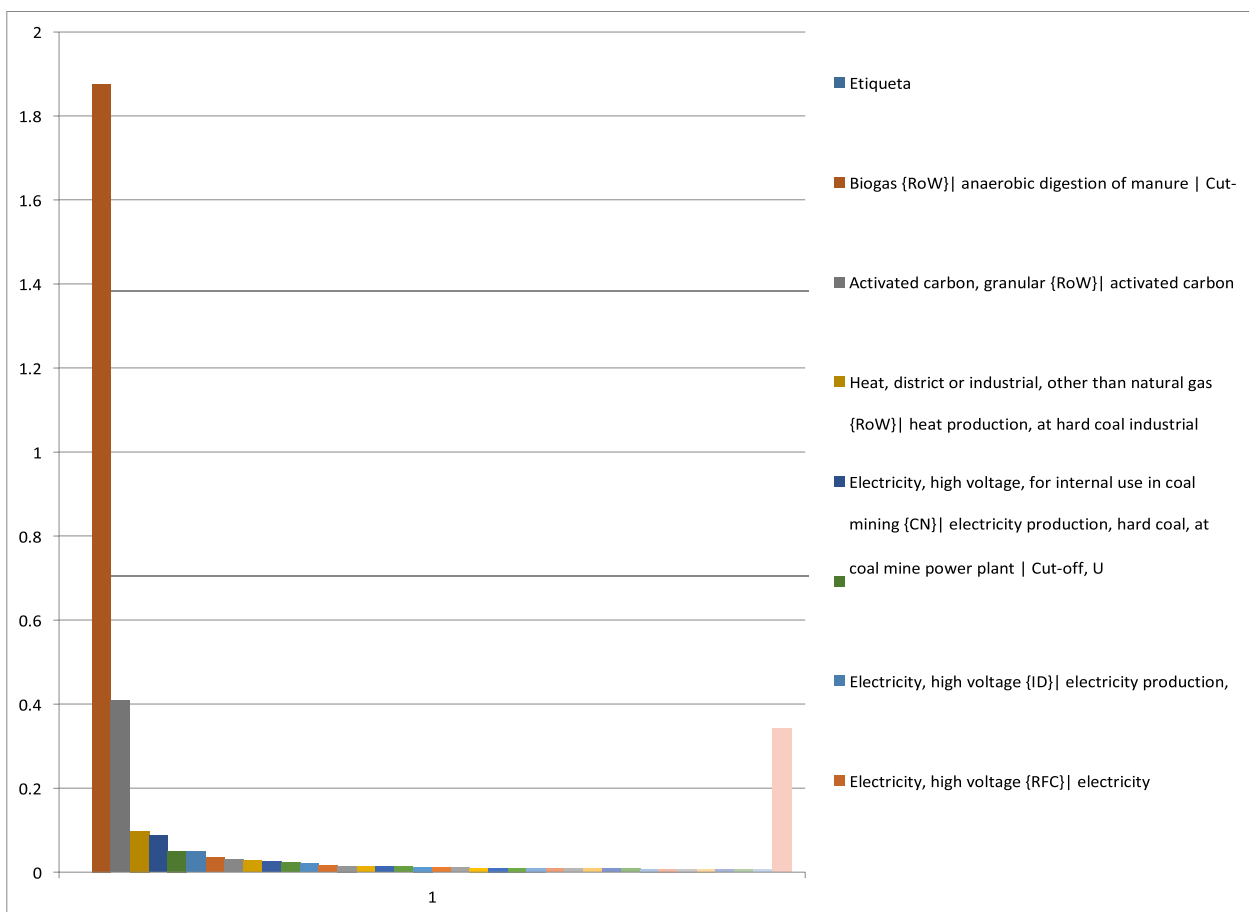
**Tabla A27. Contribuciones de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la clasificación Escasez de recursos fósiles. Kg de petróleo bruto e (Poggi-Varaldo, 2019)**

Proceso	Unidad	Total	_BRF-ETAPA EXTRACCION	BRF-ETAPA ETAPA H	_BRF- M	_BRF-ETAPA NN	SACARIFI- CACION	_BRF- ETAPA Z
El total de todos los procesos	kg oil e	202.98	16.91	18.11		86.85	24.03	51.83
				5.27				
Procesos remanentes	kg oil e	20.19	1.44	2.15	0.60	4.85	3.43	7.70
Hard coal {CN}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg oil e	42.10	0.76	4.30	1.11	28.73	4.63	2.58
Natural gas, high pressure {RU}  natural gas production   Cut-off, U	kg oil e	11.84	0.42	0.27	0.06	4.44	1.02	5.63
Hard coal, run-of-mine {IN}  hard coal mine operation   Cut-off, U	kg oil e	10.87	0.23	1.01	0.28	6.92	1.67	0.76
Hard coal {RoW}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg oil e	10.04	0.10	0.12	0.06	8.80	0.43	0.53
Hard coal {RNA}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg oil e	9.96	0.16	0.39	0.31	7.33	1.22	0.57
Hard coal {AU}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg oil e	8.48	0.13	0.98	0.24	6.05	0.57	0.52
Acetone, liquid {RoW}  production   Cut-off, U	kg oil e	7.92	7.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Petroleum {RoW}  petroleum and gas production, on-shore   Cut-off, U	kg oil e	7.07	0.18	1.98	0.66	1.08	0.70	2.47
Ethylene, average {RoW}  production   Cut-off, U	kg oil e	7.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.02
Petroleum {RME}  production, onshore   Cut-off, U	kg oil e	6.62	0.16	1.86	0.62	1.01	0.65	2.32
Hard coal {ID}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg oil e	6.48	0.10	0.72	0.18	4.68	0.43	0.37
Natural gas, unprocessed, at extraction {GLO}  production   Cut-off, U	kg oil e	5.97	0.15	0.35	0.03	1.30	0.75	3.39
Natural gas, high pressure {RoW}  natural gas production   Cut-off, U	kg oil e	5.75	0.16	0.39	0.04	1.47	0.84	2.84
Lignite {RoW}  mine operation   Cut-off, U	kg oil e	4.94	0.17	0.43	0.18	1.84	1.71	0.62
Natural gas, high pressure {US}  natural gas production   Cut-off, U	kg oil e	4.91	0.14	0.14	0.04	1.20	0.94	2.45
Hard coal {RU}  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	kg oil e	4.88	0.07	0.65	0.16	3.35	0.27	0.37
Natural gas, high pressure {DZ}  natural gas production   Cut-off, U	kg oil e	4.40	0.16	0.17	0.06	1.62	1.05	1.34
Propylene {RoW}  production   Cut-off, U	kg oil e	4.01	3.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
Petroleum {RoW}  petroleum and gas production, off-shore   Cut-off, U	kg oil e	3.51	0.09	0.99	0.33	0.54	0.35	1.23
Ethylene, average {RER}  production   Cut-off, U	kg oil e	3.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.51
Natural gas, high pressure {RoW}  petroleum and gas production, on-shore   Cut-off, U	kg oil e	3.07	0.07	0.26	0.02	0.57	0.44	1.71
Petroleum {RU}  production, onshore   Cut-off, U	kg oil e	2.89	0.07	0.81	0.27	0.44	0.29	1.01
Hydrogen, liquid {RoW}  hydrogen cracking, APME   Cut-off, U	kg oil e	2.60	0.24	0.00	0.00	0.01	2.23	0.12
Natural gas, high pressure {US}  petroleum and gas production, on-shore   Cut-off, U	kg oil e	2.01	0.06	0.06	0.02	0.49	0.38	1.00
Natural gas, high pressure {NO}  petroleum and gas production, off-shore   Cut-off, U	kg oil e	1.94	0.06	0.06	0.01	0.13	0.03	1.65

En la Tabla A27 es evidente que los procesos Z y NN son predominantes para esta categoría. De igual manera, los procesos con mayor contribución en el proceso NN son “Hard coal {CN}| hard coal mine operation and hard coal preparation | 22 Cut-off, U” y “Hard coal {RoW}| hard coal mine operation and hard coal preparation | Cut-off, U”, secundado por otros ligados a la minería de carbón, próximos en magnitud al segundo proceso. Los procesos con mayor aportación en la etapa Z son “Ethylene, average {RoW}| production | Cut-off, U” y “Natural gas, high pressure {RU}| natural gas production | Cut-off, U”.

## Anexo 28. Resultados de contribución de procesos a la categoría deterioró de ozono en la estratosfera de BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados de contribuciones a procesos y de las etapas de la BRF a la categoría de partículas finas 2.5  $\mu\text{m}$  o menos se muestran en la figura A28 y tabla A28.



**Figura A28. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría de Partículas finas de 2.5  $\mu\text{m}$  o menos (Poggi-Varaldo, 2019)**

Se muestra en figura A28 y en la tabla A28 que el principal proceso que contribuye a esta categoría es el relacionado con el proceso de biogás.

**Tabla A28. Contribuciones generales de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría Partículas finas de 2.5 µm o menos: valores tabulados en kg de partículas 2.5 µm (Poggi-Valardo, 2019)**

Proc eso	_BRF- ETAPA EXTRACC ION	BRF- ETAPA H	_BRF- ETAPA M	_BRF- ETA PA NN	_BRF- ETAPA SACARIFI CA- CI ON	BRF- ETAPA Z
El total de todos los procesos	4.51E-02	7.65E-01	1.22E+00	8.01E-01	2.06E-01	2.76E-01
Procesos remanentes	1.45E-02	3.18E-02	1.09E-02	9.24E-02	7.79E-02	1.15E-01
Biogas {RoW}  anaerobic digestion of manure   Cut-off, U	6.53E-05	5.92E-01	1.17E+00	1.16E-01	5.86E-04	6.95E-04
Activated carbon, granular {RoW}  activated carbon production, granular from hard coal   Cut-off, U	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.08E-01	0.00E+00	0.00E+00
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U	3.33E-03	6.75E-02	1.20E-04	2.23E-03	1.81E-03	2.33E-02
Electricity, high voltage, for internal use in coal mining {CN}  electricity production, hard coal, at coal mine power plant   Cut-off, U	1.57E-03	8.90E-03	2.30E-03	5.95E-02	9.58E-03	5.34E-03
Sulfuric acid {RER}  production   Cut-off, U	9.29E-07	5.16E-06	8.63E-07	1.75E-06	7.34E-06	5.02E-02
Electricity, high voltage {ID}  electricity production, lignite   Cut-off, U	1.77E-03	2.61E-03	1.05E-03	2.09E-02	1.70E-02	5.26E-03
Electricity, high voltage {RFC}  electricity production, lignite   Cut-off, U	1.35E-03	1.59E-03	7.14E-04	1.36E-02	1.33E-02	4.86E-03
Electricity, high voltage {SERC}  electricity production, lignite   Cut-off, U	1.17E-03	1.38E-03	6.19E-04	1.18E-02	1.15E-02	4.20E-03
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}  processing   Cut-off, U	7.37E-04	1.20E-03	3.12E-04	1.41E-02	2.29E-03	9.83E-03
Sulfuric acid {RoW}  production   Cut-off, U	7.46E-04	6.76E-06	1.30E-06	2.10E-04	3.32E-04	2.33E-02
Sodium bicarbonate {RoW}  soda production, solvay process   Cut-off, U	0.00E+00	2.30E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW}  heat production, anthracite, at stove 5-15kW   Cut-off, U	2.12E-05	6.34E-03	1.24E-02	1.24E-03	1.12E-05	7.49E-05
Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, 1kV - 60kV EU-27 S System - Copied from ELCD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.58E-02	0.00E+00
Acetone, liquid {RoW}  production   Cut-off, U	1.48E-02	1.82E-07	4.68E-08	9.13E-08	5.58E-08	8.83E-07
	5.31E-04	7.52E-04	3.10E-04	5.85E-03	5.13E-03	1.62E-03

## Anexo 29. Resultados de contribución de procesos a la categoría de radiación ionizante de BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados de contribuciones a procesos y de las etapas de la BRF a la categoría de radiación ionizante se muestran en la figura A29 y tabla A29.

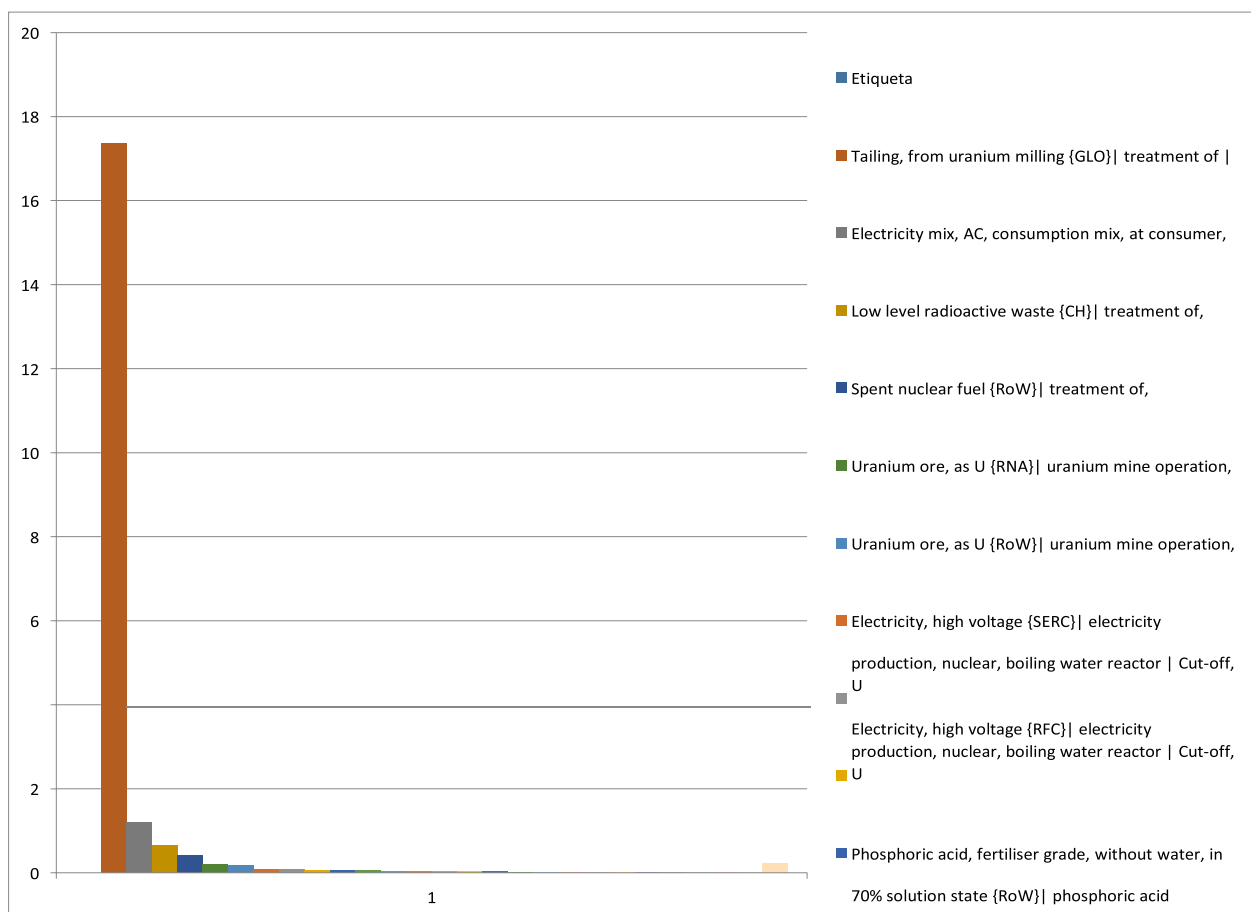


Figura A29. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría de radiación ionizante (Poggi-Varaldo, 2019)

**Tabla A29. Contribuciones generales de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría de radiación ionizante: valores tabulados en kBq Co-60 al aire**

Proceso	_BRF-ETAPA EXTRACCIÓN	_BRF-ETAPA H	_BRF-ETAPA M	_BRF-ETAPA NN	_BRF-ETAPA SACARIFICACIÓN	_BRF-ETAPA Z
El total de todos los procesos	0.651	1.753	0.591	6.506	7.302	4.078
Procesos remanentes	0.007	0.022	0.008	0.073	0.069	0.053
Tailing, from uranium milling (GLO)  treatment of   Cut-off, U	0.580	1.464	0.497	5.818	5.508	3.496
Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, 1kV - 60kV EU-27 S System - Copied from ELCD	0.000	0.000	0.000	0.000	1.190	0.000
Low level radioactive waste (CH)  treatment of, plasma torchincineration   Cut-off, U	0.017	0.155	0.051	0.123	0.093	0.211
Spent nuclear fuel (RoW)  treatment of, reprocessing   Cut-off, U	0.015	0.030	0.011	0.147	0.140	0.074
Uranium ore, as U (RNA)  uranium mine operation, underground   Cut-off, U	0.007	0.017	0.006	0.068	0.064	0.041
Uranium ore, as U (RoW)  uranium mine operation, underground   Cut-off, U	0.006	0.016	0.005	0.064	0.061	0.038
Electricity, high voltage (SERC)  electricity production, nuclear, boiling water reactor   Cut-off, U	0.003	0.003	0.002	0.029	0.029	0.010
Electricity, high voltage (RFC)  electricity production, nuclear, boiling water reactor   Cut-off, U	0.003	0.003	0.002	0.029	0.028	0.010





**Tabla A30. Contribuciones generales de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría Eutroficación marina: valores tabulados en kg N e (Poggi-Valardo, 2019)**

Proceso	Total	ETAPA EXTRACCION	ETAPA H	ETAPA M	ETAPA NN	ETAPA SACARIFICACION	ETAPA Z
El total de todos los procesos	6.75E-02	3.28E-04	2.04E-03	6.26E-04	1.11E-02	3.30E-03	5.01E-02
Procesos remanentes	5.72E-03	3.55E-05	5.80E-04	1.60E-04	3.42E-04	5.71E-04	4.03E-03
Coconut, dehusked {PH}  coconut production, dehusked   Cut-off, U	1.17E-02	6.95E-10	2.06E-07	2.10E-09	5.40E-09	4.47E-09	1.17E-02
Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	1.06E-02	1.70E-04	9.89E-04	2.83E-04	7.57E-03	9.46E-04	6.71E-04
Alfalfa-grass silage {RoW}  alfalfa/grass silage production   Cut-off, U	9.94E-03	4.37E-21	7.36E-21	1.86E-21	6.74E-20	6.65E-21	9.94E-03
Coconut, dehusked {ID}  coconut production, dehusked   Cut-off, U	8.61E-03	5.12E-10	1.52E-07	1.55E-09	3.98E-09	3.30E-09	8.61E-03
Coconut, dehusked {RoW}  coconut production, dehusked   Cut-off, U	4.66E-03	2.77E-10	8.22E-08	8.38E-10	2.16E-09	1.79E-09	4.66E-03
Spoil from lignite mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	3.61E-03	1.21E-04	3.54E-04	1.42E-04	1.25E-03	1.16E-03	5.90E-04
Hay {RoW}  production   Cut-off, U	3.16E-03	1.39E-21	2.34E-21	5.91E-22	2.14E-20	2.11E-21	3.16E-03
Wastewater from potato starch production {RoW}  treatment of, capacity 1.1E10/year   Cut-off, U	1.79E-03	1.18E-10	1.17E-08	1.75E-10	4.51E-09	7.78E-10	1.79E-03
Wastewater, from residence {RoW}  treatment of, capacity 1.1E10/year   Cut-off, U	1.76E-03	3.96E-10	1.79E-08	1.95E-09	1.76E-03	1.81E-09	4.51E-06
Soybean {BR}  production   Cut-off, U	1.23E-03	1.35E-08	4.91E-07	4.54E-08	1.59E-07	3.39E-08	1.23E-03
Maize silage {RoW}  production   Cut-off, U	1.05E-03	4.63E-22	7.81E-22	1.97E-22	7.15E-21	7.05E-22	1.05E-03
Wastewater, average {RoW}  treatment of, capacity 1E9l/year   Cut-off, U	9.67E-04	1.66E-06	1.16E-04	4.04E-05	1.67E-04	6.31E-04	1.19E-05
Oat grain {RoW}  oat production   Cut-off, U	9.45E-04	4.16E-22	7.01E-22	1.77E-22	6.41E-21	6.33E-22	9.45E-04
Coconut, dehusked {IN}  coconut production, dehusked   Cut-off, U	8.71E-04	5.18E-11	1.54E-08	1.56E-10	4.03E-10	3.33E-10	8.71E-04
Soybean {AR}  soybean production   Cut-off, U	8.69E-04	9.49E-09	3.46E-07	3.20E-08	1.12E-07	2.39E-08	8.69E-04

### Anexo 31. Resultados de contribución de procesos a la categoría de consumo de agua de BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados de contribuciones a procesos y de las etapas de la BRF a la categoría de consumo de agua se muestran en la figura A31 y tabla A31.

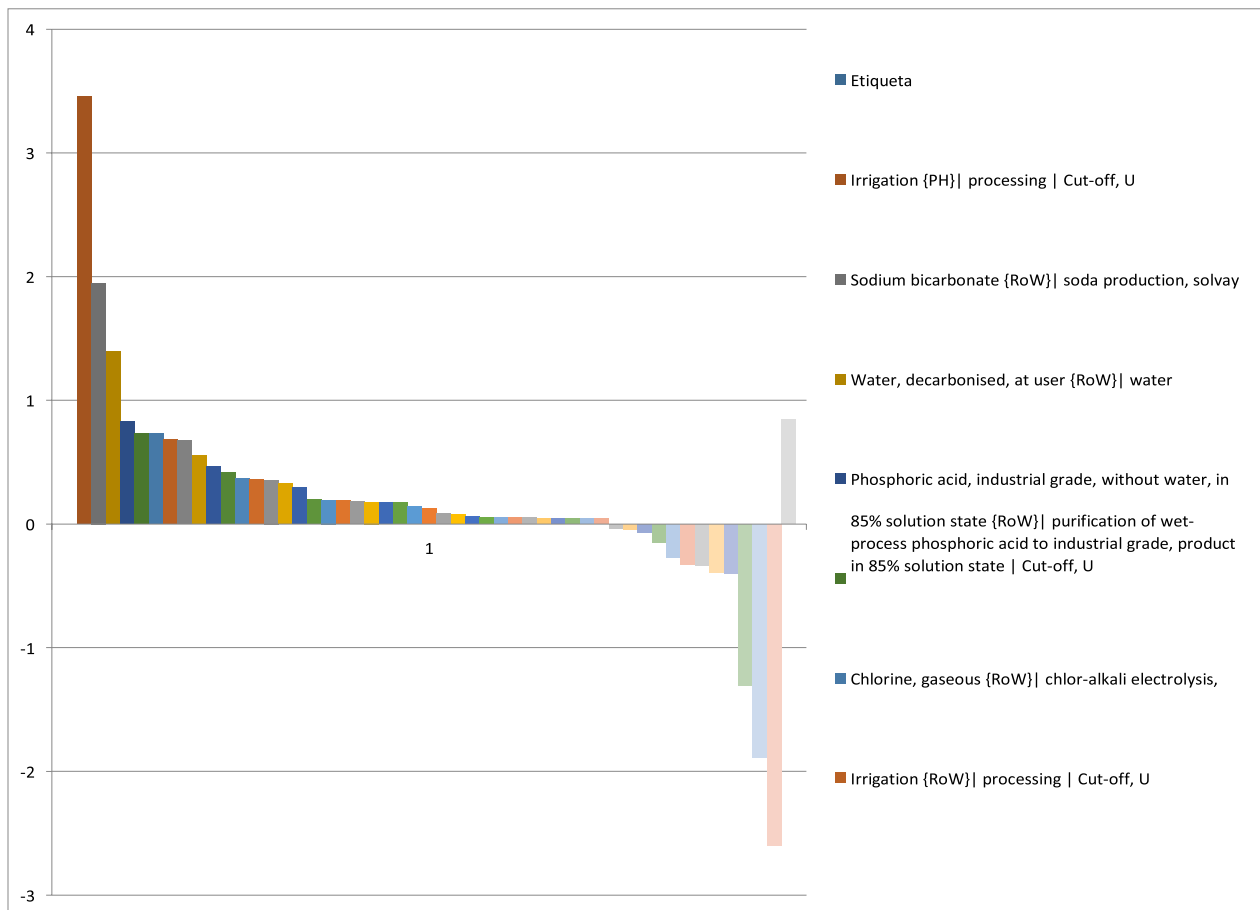


Figura A31. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría de consumo de agua (Poggi-Varaldo, 2019)

Proceso	Proyecto	Unidad	Total	BRF Simético	_BRF-ETAPA EXTRACCION	_BRF-ETAPA H	_BRF-ETAPA M	_BRF-ETAPA NN	_BRF-ETAPA SACARIFICACION	_BRF-ETAPA Z
El total de todos los procesos		m3	8.8203	0	0.9687	2.0513	0.4414	0.0091	1.5242	3.8278
Procesos remanentes		m3	0.8485	0	0.0896	0.0488	-0.0005	0.1278	0.1625	0.4185
	Ecointervent 3 - allocation, cut-off by classification - unit									
Irrigation (FH) processing   Cut-off, U	"	m3	3.4584	0	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	3.4583
Sodium bicarbonate (RoW) soda production, solvay process   Cut-off, U	"	m3	1.9476	0	0.0000	1.9476	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Water, decarbonised, at user (RoW) water production and supply, decarbonised   Cut-off, U	"	m3	1.3974	0	0.0154	0.0308	0.5822	0.5771	0.1199	0.0719
Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state (RoW) purification of wet-process phosphoric acid to industrial grade, product in 85% solution state   Cut-off, U	"	m3	0.8280	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8280
Sulfuric acid (RER) production   Cut-off, U	"	m3	0.7307	0	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	0.7305
Chlorine, gaseous (RoW) chlor-alkali electrolysis, membrane cell   Cut-off, Irrigation (RoW) processing   Cut-off, U	"	m3	0.7291	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.1877	0.5411	0.0002
Phosphoric acid, fertilizer grade, without water, in 70% solution state (RoW) phosphoric acid production, dihydrate process   Cut-off, U	"	m3	0.8829	0	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.8828
Water, decarbonised, at user (RER) water production and supply, decarbonised   Cut-off, U	"	m3	0.8725	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8724
_Acetic acid modif2 HP, without water, in 98% solution state (RoW) acetic acid production, product in 98% solution state   Cut-off, U	"	m3	0.5555	0	0.0081	0.0123	0.2314	0.2294	0.0476	0.0286
	HMSZNN Ecointervent 3 - allocation, cut-off by classification - unit	m3	0.4679	0	0.4679	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Irrigation (CN) processing   Cut-off, U	"	m3	0.4204	0	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.4203
Chlorine, gaseous (RoW) chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell   Cut-off, U	"	m3	0.3681	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0021	0.3638	0.0001
Sulfuric acid (RoW) production   Cut-off, U	"	m3	0.3572	0	0.0198	0.0001	0.0000	0.0030	0.0048	0.3394
Urea, as N (RoW) production   Cut-off, U	"	m3	0.3563	0	0.0001	0.0015	0.0000	0.0001	0.0000	0.3546
Phosphoric acid, fertilizer grade, without water, in 70% solution state (US) phosphoric acid production, dihydrate process   Cut-off, U	"	m3	0.3284	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3284
Irrigation (US) processing   Cut-off, U	"	m3	0.2919	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2919
Hard coal (CN) hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut- off, U	"	m3	0.1955	0	0.0035	0.0200	0.0052	0.1335	0.0215	0.0120
Ammonia, liquid (RoW) ammonia production, steam reforming, liquid   Cut- off, U	"	m3	0.1930	0	0.0001	0.0055	0.0001	0.0012	0.0008	0.1853
Sodium chloride, powder (RoW) production   Cut-off, U	"	m3	0.1896	0	0.0003	0.0000	0.0000	0.0407	0.1458	0.0027
Soda ash, light, crystalline, heptahydrate (RoW) soda production, solvay process   Cut-off, U	"	m3	0.1843	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0019	0.0088	0.1796
4-methyl-2-pentanone (RoW) production   Cut-off, U	"	m3	0.1781	0	0.1781	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state (RER) purification of wet-process phosphoric acid to industrial grade, product in 85% solution state   Cut-off, U	"	m3	0.1744	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1744
Acetone, liquid (RoW) production   Cut-off, U	"	m3	0.1725	0	0.1725	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Electricity, high voltage (BR) electricity production, hydro, reservoir, tropical region   Cut-off, U	"	m3	0.1429	0	0.0056	0.0088	0.0030	0.0580	0.0550	0.0165
Irrigation (IN) processing   Cut-off, U	"	m3	0.1295	0	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.1264
Electricity, high voltage (RU) heat and power co-generation, hard coal   Cut-off, U	"	m3	0.0940	0	0.0031	0.0044	0.0018	0.0346	0.0304	0.0096
Calcium chloride (RoW) soda production, solvay process   Cut-off, U	"	m3	0.0795	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0019	0.0069	0.0697
Ethylene, average (RoW) production   Cut-off, U	"	m3	0.0669	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0669
Electricity, high voltage (CA-CN) electricity production, nuclear, pressure water reactor, heavy water moderated   Cut-off, U	"	m3	0.0550	0	0.0021	0.0025	0.0011	0.0217	0.0210	0.0064
Soda ash, light, crystalline, heptahydrate (RER) soda production, solvay process   Cut-off, U	"	m3	0.0531	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0020	0.0506
Lime (RoW) production, milled, loose   Cut-off, U	"	m3	0.0512	0	0.0000	0.0433	0.0000	0.0003	0.0005	0.0071
Oxygen, liquid (RoW) air separation, cryogenic   Cut-off, U	"	m3	0.0501	0	0.0033	0.0000	0.0000	-0.0004	0.0000	0.0472
Electricity, high voltage (RoW) heat and power co-generation, hard coal   Cut-off, U	"	m3	0.0477	0	0.0019	0.0022	0.0010	0.0190	0.0183	0.0054
Hydrogen, liquid (RoW) hydrogen cracking, APME   Cut-off, U	"	m3	0.0469	0	0.0043	0.0000	0.0000	0.0002	0.0403	0.0021
Phosphate rock, as P2O5, beneficiated, wet (RoW) phosphate rock beneficiation, wet   Cut-off, U	"	m3	0.0434	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0434
Irrigation (BR) processing   Cut-off, U	"	m3	0.0432	0	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0431
Sodium chloride, powder (RER) production   Cut-off, U	"	m3	0.0399	0	0.0001	0.0000	0.0000	0.0088	0.0307	0.0006
_Heat, district or industrial, natural gas modif1 HP (RoW) heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical   Cut-off, U	"	m3	-0.0386	0	0.0000	0.0000	-0.0355	-0.0031	0.0000	0.0000
	HMSZNN Ecointervent 3 - allocation, cut-off by classification - unit	m3	-0.0452	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0452
Maize grain (RoW) production   Cut-off, U	"	m3	-0.0700	0	0.0000	-0.0602	0.0000	-0.0001	-0.0005	-0.0092
Sodium chloride, brine solution (RoW) production   Cut-off, U	"	m3	-0.0700	0	0.0000	-0.0602	0.0000	-0.0001	-0.0005	-0.0092

Tabla A31. Contribuciones generales de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría Eutroficación marina: valores tabulados en m<sup>3</sup> (Poggi-Varaldo, 2019)

### Anexo 32. Resultados de contribución de procesos a la categoría de escasez de recursos naturales de BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados de contribuciones a procesos y de las etapas de la BRF a la categoría de escasez de recursos naturales se muestran en la figura A32 y tabla A32.

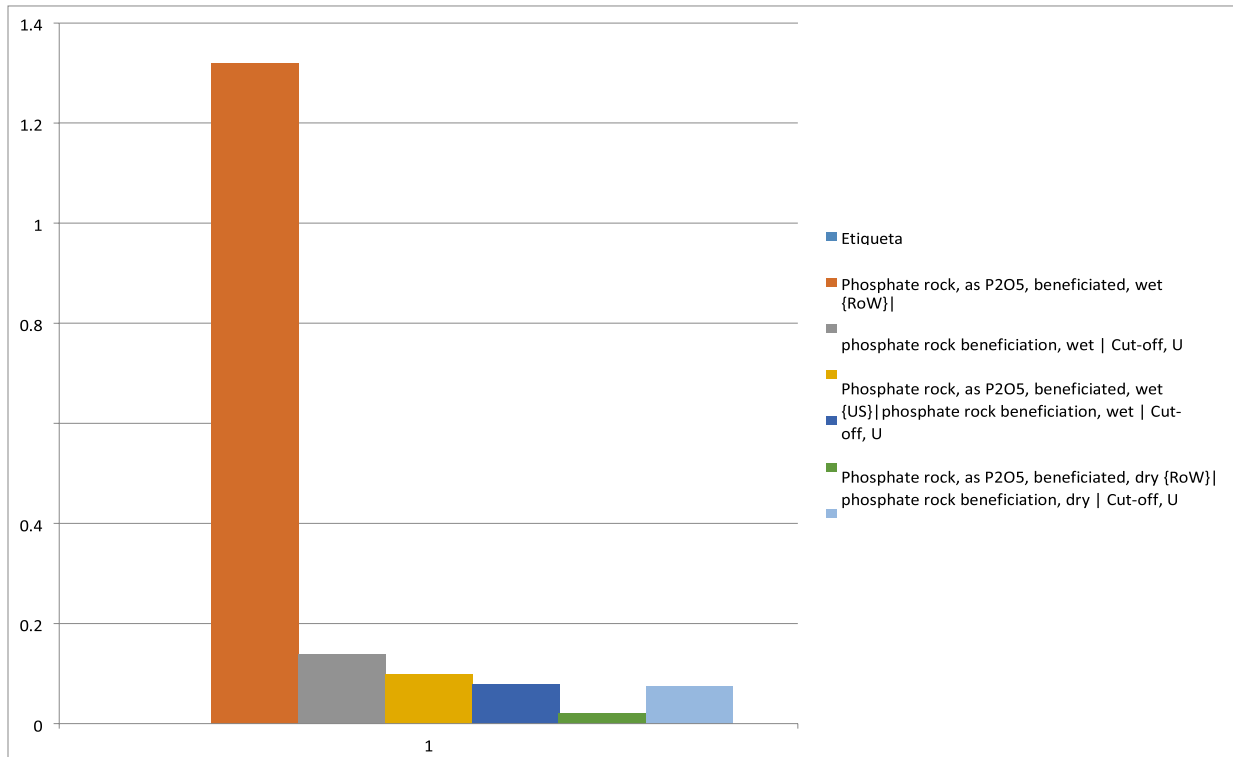


Figura A32. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría de escasez de recursos naturales (Poggi-Varaldo, 2019)

Tabla A32. Contribuciones generales de las etapas de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría escasez de recursos naturales: valores tabulados en kg de Cu e (Poggi-Varaldo, 2019)

Proceso	Unidad	Total	ETAPA EXTRACCION	ETAPA H	ETAPA M	ETAPA NN	ETAPA SACARIFICACION
El total de todos los procesos	kg Cu e	1.7837	0.0039	0.0165	0.0009	0.0171	0.0112
Procesos remanentes	kg Cu e	0.1221	0.0032	0.0164	0.0009	0.0169	0.0109
Phosphate rock, as P2O5, beneficiated, wet {RoW}   phosphate rock beneficiation, wet   Cut-off, U	kg Cu e	1.3208	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Phosphate rock, as P2O5, beneficiated, wet {US}   phosphate rock beneficiation, wet   Cut-off, U	kg Cu e	0.1386	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Phosphate rock, as P2O5, beneficiated, dry {RoW}   phosphate rock beneficiation, dry   Cut-off, U	kg Cu e	0.0995	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ammonium sulfate, as N {GLO}   nickel mine operation, sulfidic ore   Cut-off, U	kg Cu e	0.0799	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Zinc concentrate {GLO}   zinc-lead mine operation   Cut-off, U	kg Cu e	0.0228	0.0007	0.0000	0.0000	0.0002	0.0003

### Anexo 33. Resultados de contribución de procesos a la categoría de uso de suelo BRF H-M-Z-S-NN

Los resultados de contribuciones a procesos y de las etapas de la BRF a la categoría de uso de suelo se muestran en la figura A33 y tabla A33.

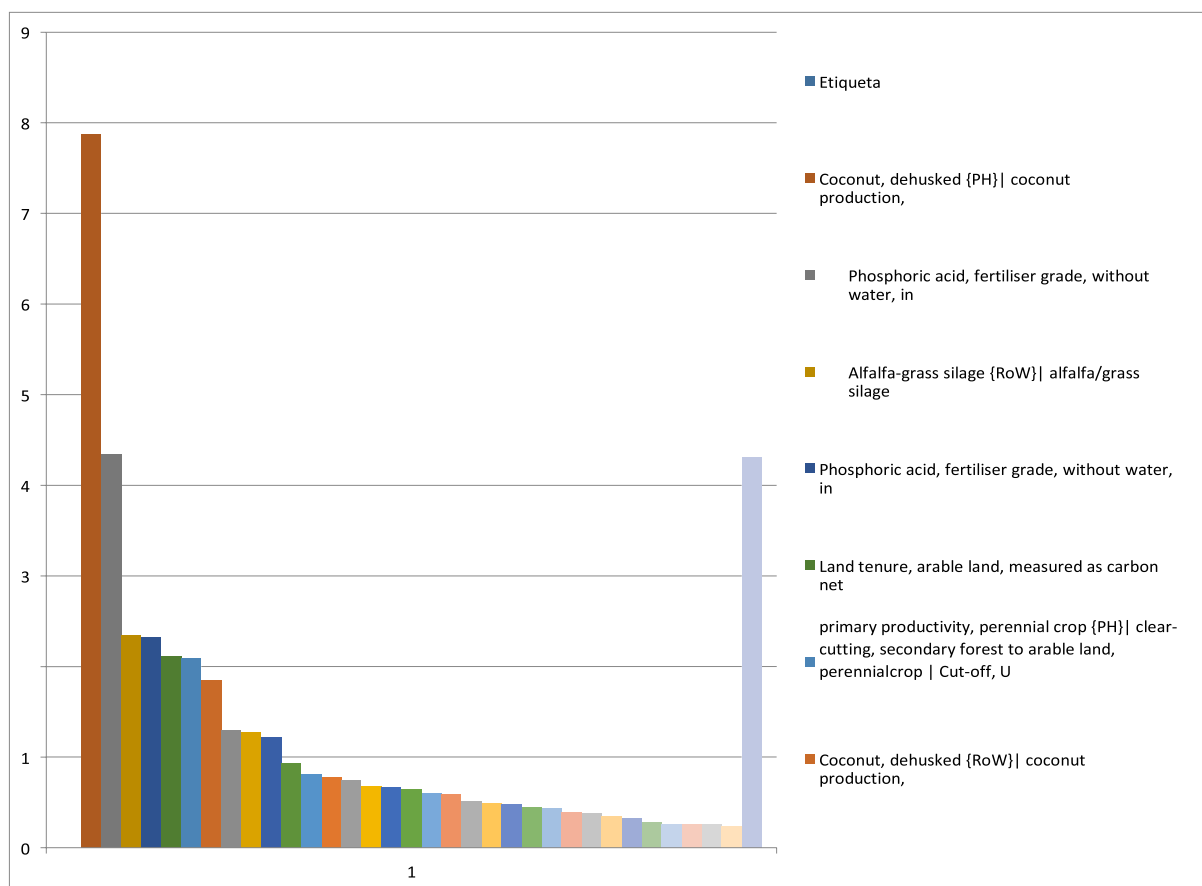


Figura A33. Contribuciones generales de los procesos de la BRF H-M-Z-S-NN a la categoría de uso de suelo (Poggi-Varaldo, 2019)

**Tabla A33. Contribuciones generales de las etapas de BRF H-M-Z-S-NN a la categoría de uso de suelo o tierra. Valores tabulados: m<sup>2</sup>×yr tierra de cultivo anual (Poggi-Varaldo, 2019)**

Proceso	Unidad	ETAPA EXTRACCION	ETAPA H	ETAPA M	ETAPA NN	ETAPA SACARIFICACION
El total de todos los procesos	m2a crop e	0.113	2.454	0.316	2.092	0.455
Procesos remanentes	m2a crop e	0.033	1.037	0.143	0.643	0.150
Coconut, dehusked (PH)  coconut production, dehusked   Cut-off, U	m2a crop e	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state (RoW)  phosphoric acid production, dihydrate process   Cut-off, U	m2a crop e	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Alfalfa-grass silage (RoW)  alfalfa/grass silage production   Cut-off, U	m2a crop e	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state (US)  phosphoric acid production, dihydrate process   Cut-off, U	m2a crop e	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Land tenure, arable land, measured as carbon net primary productivity, perennial crop (PH)  clear-cutting, secondary forest to arable land, perennial crop   Cut-off, U	m2a crop e	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Coconut, dehusked (ID)  coconut production, dehusked   Cut-off, U	m2a crop e	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Coconut, dehusked (RoW)  coconut production, dehusked   Cut-off, U	m2a crop e	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Land tenure, arable land, measured as carbon net primary productivity, annual crop (AR)  clear-cutting, secondary forest to arable land, annual crop   Cut-off, U	m2a crop e	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Hard coal (CN)  hard coal mine operation and hard coal preparation   Cut-off, U	m2a crop e	0.023	0.130	0.033	0.867	0.140
Coconut (PH) production   Cut-off, U	m2a crop e	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

## Anexo 34. Proxis Ecoinvent SimaPro

### 34.1 Proxi “Activated carbon, granular {RoW}| activated carbon production, granular from hard coal | Cut-off, U” (Ecoinvent, 2019)

	Amount	Units
	1.000	kg
Materials/fuels		
Electricity, medium voltage {AU}  market for   Cut-off, U	0.022	kWh
Electricity, medium voltage {NZ}  market for electricity, medium voltage   Cut-off, U	0.004	kWh
Electricity, medium voltage {RAF}  market group for   Cut-off, U	0.072	kWh
Electricity, medium voltage {RAS}  market group for   Cut-off, U	1.027	kWh
Electricity, medium voltage {RLA}  market group for   Cut-off, U	0.138	kWh
Electricity, medium voltage {RNA}  market group for   Cut-off, U	0.482	kWh
Electricity, medium voltage {RoW}  market for   Cut-off, U	0.000	kWh
Electricity, medium voltage {RU}  market for   Cut-off, U	0.097	kWh
<b>Total</b>	<b>1.842</b>	<b>kWh</b>
Hard coal {AU}  market for   Cut-off, U	0.192	kg
Hard coal {CN}  market for   Cut-off, U	1.335	kg
Hard coal {ID}  market for   Cut-off, U	0.189	kg
Hard coal {IN}  market for hard coal   Cut-off, U	0.313	kg
Hard coal {RLA}  market for   Cut-off, U	0.045	kg
Hard coal {RNA}  market for   Cut-off, U	0.281	kg
Hard coal {RoW}  market for   Cut-off, U	0.416	kg
Hard coal {RU}  market for   Cut-off, U	0.147	kg
Hard coal {ZA}  market for   Cut-off, U	0.082	kg
Heat, district or industrial, natural gas {CA-QC}  market for   Cut-off, U	0.228	MJ
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  market for heat, district or industrial, natural gas   Cut-off, U	13.072	MJ
Industrial furnace, coal, 1-10MW {GLO}  market for   Cut-off, U	3.21E-08	p
Water, completely softened, from decarbonised water, at user {GLO}  market for   Cut-off, U	12.434	kg
Emissions to air		
Aluminium	6.18E-04	kg
Antimony	9.13E-08	kg
Arsenic	1.46E-06	kg
Barium	7.28E-06	kg
Benzene	2.89E-05	kg
Benzo(a)pyrene	5.78E-10	kg
Beryllium	7.28E-08	kg
Boron	2.74E-05	kg
Bromine	5.48E-07	kg
Cadmium	9.13E-08	kg
Calcium	7.28E-05	kg
Carbon dioxide, fossil	5.289	kg
Carbon monoxide, fossil	0.006	kg



**34.2 Proxi “Activated carbon, granular {RoW}| activated carbon production, granular from hard coal | Cut-off, U” (Ecoinvent, 2019)**

<b>Emission</b>	<b>Amount</b>	<b>Units</b>
Selenium	5.48E-07	kg
Silicon	9.13E-04	kg
Sodium	3.65E-05	kg
Strontium	1.10E-05	kg
Sulfur dioxide	2.89E-02	kg
Thallium	9.13E-08	kg
Thorium	1.10E-07	kg
Thorium-228	3.18E-04	kBq
Thorium-232	2.02E-04	kBq
Tin	3.65E-08	kg
Titanium	2.19E-05	kg
Toluene	5.78E-06	kg
Uranium	1.46E-07	kg
Uranium-238	5.78E-04	kBq
Vanadium	2.19E-06	kg
Water/m3	1.87E-03	m3
Xylene	5.78E-06	kg
Zinc	1.83E-07	kg
Emissions to water		
Water, RoW	0.011	m3
Waste to treatment		
Hard coal ash {RoW}  market for hard coal ash   Cut-off, U	0.168	kg

**34.3 Proxi purificación de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> “H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> purification residue {RoW}| treatment of H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> purification residue, residual material landfill | Cut-off, U” (Ecoinvent, 2019)**

Waste treatment			
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> purification residue {RoW}  treatment of H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> purification residue, residual material landfill   Cut-off, U	1	kg	Todos los tipos de residuo
Avoided products			
Resources			
Materials/fuels			
Cement, unspecified {Europe without Switzerland}  market for cement, unspecified   Cut-off, U	0.03754	kg	Reg. normal
Cement, unspecified {RoW}  market for cement, unspecified   Cut-off, U	0.36246	kg	Reg. normal
Process-specific burdens, residual material landfill {Europe without Switzerland}  market for process-specific burdens, residual material landfill   Cut-off, U	0.282874	kg	Reg. normal
Process-specific burdens, residual material landfill {RoW}  market for process-specific burdens, residual material landfill   Cut-off, U	0.717126	kg	Reg. normal
Residual material landfill {GLO}  market for   Cut-off, U	2.08E-09	p	Reg. normal
Emissions to water			
Aluminium	river	1.39E-06	kg
Aluminium	groundwater, long-term	0.00083	kg
Arsenic	groundwater, long-term	4.89E-14	kg
Arsenic	river	4.89E-05	kg

Cadmium	groundwater, long-term	4.82E-07	kg
Cadmium	river	8.05E-10	kg
Calcium	river	4.13E-05	kg
Calcium	groundwater, long-term	0.02476	kg
Chromium VI	groundwater, long-term	0.000292	kg
Chromium VI	river	9.24E-05	kg
Copper	river	1.21E-08	kg
Copper	groundwater, long-term	7.28E-06	kg
Fluoride	river	0.002612	kg
Fluoride	groundwater, long-term	0.045578	kg
Iron	groundwater, long-term	2.8E-05	kg
Iron	river	4.68E-08	kg
Lead	river	1.21E-10	kg
Lead	groundwater, long-term	7.26E-08	kg
Magnesium	groundwater, long-term	0.001032	kg
Magnesium	river	1.72E-06	kg
Manganese	groundwater, long-term	5.2E-07	kg
Manganese	river	8.69E-10	kg

Mercury	river	3.74E-11	kg
Nickel	river	1.44E-07	kg
Nickel	groundwater, long-term	8.62E-05	kg
Phosphate	river	1.75E-05	kg
Phosphate	groundwater, long-term	0.010512	kg
Silicon	groundwater, long-term	0.028582	kg
Silicon	river	6.44E-05	kg
Sulfate	river	0.062028	kg
Sulfate	groundwater, long-term	0.51611	kg
Vanadium	groundwater, long-term	0.000698	kg
Vanadium	river	2.23E-06	kg
Zinc	river	2.72E-08	kg
Zinc	groundwater, long-term	1.63E-05	kg
Emissions to soil			
Final waste flows			
Non material emissions			
Social issues			
Economic issues			

#### 34.4. Proxi "Sodium phosphate {RoW}| production | Cut-off, U" (Ecoinvent, 2019)

Products			
----------	--	--	--

Sodium phosphate {RoW}  production   Cut-off, U	1	kg	100
Resources			
Water, unspecified natural origin, RoW	in water	0.000931	m3
Materials/fuels			
Chemical factory, organics {GLO}  market for   Cut-off, U	4E-10	p	Reg. normal
Heat, district or industrial, natural gas {CA-QC}  market for   Cut-off, U	0.00419097	MJ	Reg. normal
Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  market for heat, district or industrial, natural gas   Cut-off, U	0.24080903	MJ	Reg. normal
Heat, district or industrial, other than natural gas {CA-QC}  market for   Cut-off, U	0.00017533	MJ	Reg. normal
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  market for   Cut-off, U	0.39282467	MJ	Reg. normal
Nitrogen, liquid {RoW}  market for   Cut-off, U	0.019	kg	Reg. normal
Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO}  market for   Cut-off, U	0.99	kg	Reg. normal
Soda ash, light, crystalline, heptahydrate {GLO}  market for   Cut-off, U	0.737	kg	Reg. normal
Electricity/heat			
Emissions to air			
Carbon dioxide, fossil	high. pop.	0.967	kg
Nitrogen, atmospheric		0.019	kg
Water/m3			
		0.00019086	m3
Emissions to water			
Water, RoW		0.00074015	m3

### 34.5 Proxi producción de ácido fosfórico 85% (Ecoinvent, 2019)

Products			
Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {RER}  purification of wet-process phosphoric acid to industrial grade, product in 85% solution state   Cut-off, U	1	kg	100
Avoided products			
Resources			
Water, cooling, unspecified natural origin, RER	in water	0.12275	m3
Water, well, RER	in water	0.004311	m3
Materials/fuels			
Chemical factory, organics {RER}  construction   Cut-off, U	4.7E-10	p	Reg. normal
Heat, district or industrial, natural gas {RER}  market group for   Cut-off, U	0.372	MJ	Reg. normal
Heat, district or industrial, other than natural gas {RER}  market group for   Cut-off, U	0.372	MJ	Reg. normal
Isopropanol {RER}  market for isopropanol   Cut-off, U	0.007	kg	Reg. normal
Phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state {GLO}  market for   Cut-off, U	1.02	kg	Reg. normal
Quicklime, milled, loose {CH}  market for quicklime, milled, loose   Cut-off, U	0.108	kg	Reg. normal
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO}  market for   Cut-off, U	0.026	kg	Reg. normal
Sulfuric acid {RER}  market for sulfuric acid   Cut-off, U	0.129	kg	Reg. normal
Water, deionised, from tap water, at user {CH}  market for water, deionised, from tap water, at user   Cut-off, U	0.00111607	kg	Reg. normal
Water, deionised, from tap water, at user {Europe without Switzerland}  market for water, deionised, from tap water, at user   Cut-off, U	1.08888393	kg	Reg. normal

Electricity/heat			
Emissions to air			
Water/m3		0.04940197	m3
Emissions to water			
Fluoride		0.0014	kg
Sodium		0.0017	kg
Water, RER		0.07874904	m3
Waste to treatment			
H3PO4 purification residue {GLO}   market for   Cut-off, U			
Spent solvent mixture {CH}   market for spent solvent mixture   Cut-off, U			
Spent solvent mixture {Europe without Switzerland}   market for spent solvent mixture   Cut-off, U			

**34.6 Proxi Tratamiento de residuos de minería de carbón proxi “Spoil from hard coal mining {GLO}| treatment of, in surface landfill | Cut-off, U” (Ecoinvent, 2019)**

Waste treatment	Amount	Units
Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	1.00E+00	kg
Emissions to water		
Aluminium	1.42E-07	kg
Aluminium	8.51E-05	kg
Antimony	1.13E-10	kg
Antimony	6.36E-08	kg
Arsenic	1.08E-09	kg
Arsenic	6.24E-07	kg
Barium	6.04E-09	kg
Barium	3.62E-06	kg
Beryllium	4.38E-10	kg
Beryllium	2.62E-07	kg
Cadmium	1.07E-07	kg
Cadmium	1.78E-10	kg
Calcium	3.17E-03	kg
Calcium	5.64E-05	kg
Chloride	4.30E-04	kg
Chloride	1.47E-05	kg
Chromium VI	2.28E-09	kg
Chromium VI	1.34E-06	kg
Cobalt	7.05E-09	kg
Cobalt	3.47E-06	kg
Copper	1.80E-06	kg
Copper	3.70E-09	kg
Fluoride	1.71E-06	kg
Fluoride	1.49E-07	kg
Iron	4.72E-07	kg
Iron	2.83E-04	kg
Lead	1.05E-10	kg
Lead	6.27E-08	kg
Magnesium	1.76E-03	kg
Magnesium	2.25E-05	kg
Manganese	1.41E-04	kg
Manganese	1.07E-06	kg
Mercury	1.20E-10	kg
Mercury	4.85E-08	kg
Molybdenum	1.58E-09	kg



**34.6 Proxi Tratamiento de residuos de minería de carbón proxi “Spoil from hard coal mining {GLO}| treatment of, in surface landfill | Cut-off, U” (Ecoinvent, 2019) (cont.)**

Waste	Amount	Units
Molybdenum	8.26E-07	kg
Nickel	1.60E-05	kg
Nickel	3.97E-08	kg
Nitrate	1.86E-04	kg
Nitrate	2.77E-06	kg
Phosphate	5.51E-04	kg
Phosphate	7.89E-05	kg
Potassium	2.23E-06	kg
Potassium	1.20E-03	kg
Scandium	3.38E-07	kg
Scandium	5.87E-10	kg
Selenium	5.56E-07	kg
Selenium	1.71E-09	kg
Silicon	2.83E-06	kg
Silicon	1.69E-03	kg
Silver	3.04E-09	kg
Silver	4.99E-10	kg
Sodium	1.92E-03	kg
Sodium	6.34E-06	kg
Strontium	6.13E-05	kg
Strontium	5.94E-07	kg
Sulfate	1.42E-02	kg
Sulfate	2.92E-04	kg
Thallium	2.53E-11	kg
Thallium	1.52E-08	kg
Tin	3.43E-11	kg
Tin	2.05E-08	kg
Titanium	2.65E-09	kg
Titanium	1.59E-06	kg
Tungsten	2.10E-08	kg
Tungsten	5.35E-11	kg
Vanadium	6.99E-07	kg
Vanadium	1.18E-09	kg
Zinc	3.17E-08	kg
Zinc	1.90E-05	kg

**34.7 “Spoil from hard coal mining {GLO}| treatment of, in surface landfill | Cut-off, U”  
Impacto a ecotoxicidad al agua dulce, y agua marina, etapa NN(Ecoinvent, 2019)**

<b>Waste treatment</b>	<b>Amount</b>	<b>Units</b>
Spoil from hard coal mining {GLO}  treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	1.00E+00	kg
Emissions to water		
Aluminium	1.42E-07	kg
Aluminium	8.51E-05	kg
Antimony	1.13E-10	kg
Antimony	6.36E-08	kg
Arsenic	1.08E-09	kg
Arsenic	6.24E-07	kg
Barium	6.04E-09	kg
Barium	3.62E-06	kg
Beryllium	4.38E-10	kg
Beryllium	2.62E-07	kg
Cadmium	1.07E-07	kg
Cadmium	1.78E-10	kg
Calcium	3.17E-03	kg
Calcium	5.64E-05	kg
Chloride	4.30E-04	kg
Chloride	1.47E-05	kg
Chromium VI	2.28E-09	kg
Chromium VI	1.34E-06	kg
Cobalt	7.05E-09	kg
Cobalt	3.47E-06	kg
Copper	1.80E-06	kg
Copper	3.70E-09	kg
Fluoride	1.71E-06	kg
Fluoride	1.49E-07	kg
Iron	4.72E-07	kg
Iron	2.83E-04	kg
Lead	1.05E-10	kg
Lead	6.27E-08	kg
Magnesium	1.76E-03	kg
Magnesium	2.25E-05	kg
Manganese	1.41E-04	kg
Manganese	1.07E-06	kg
Mercury	1.20E-10	kg
Mercury	4.85E-08	kg
Molybdenum	1.58E-09	kg

<b>Waste</b>	<b>Amount</b>	<b>Units</b>
Molybdenum	8.26E-07	kg
Nickel	1.60E-05	kg
Nickel	3.97E-08	kg
Nitrate	1.86E-04	kg
Nitrate	2.77E-06	kg
Phosphate	5.51E-04	kg
Phosphate	7.89E-05	kg
Potassium	2.23E-06	kg
Potassium	1.20E-03	kg
Scandium	3.38E-07	kg
Scandium	5.87E-10	kg
Selenium	5.56E-07	kg
Selenium	1.71E-09	kg
Silicon	2.83E-06	kg
Silicon	1.69E-03	kg
Silver	3.04E-09	kg
Silver	4.99E-10	kg
Sodium	1.92E-03	kg
Sodium	6.34E-06	kg
Strontium	6.13E-05	kg
Strontium	5.94E-07	kg
Sulfate	1.42E-02	kg
Sulfate	2.92E-04	kg
Thallium	2.53E-11	kg
Thallium	1.52E-08	kg
Tin	3.43E-11	kg
Tin	2.05E-08	kg
Titanium	2.65E-09	kg
Titanium	1.59E-06	kg
Tungsten	2.10E-08	kg
Tungsten	5.35E-11	kg
Vanadium	6.99E-07	kg
Vanadium	1.18E-09	kg
Zinc	3.17E-08	kg
Zinc	1.90E-05	kg

**34.8 Proxi “Spoil from lignite mining {GLO} treatment of, in surface landfill | Cut-off, U”  
Ecotoxicidad al agua dulce etapa Z (Ecoinvent, 2019)**

<b>Waste treatment</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>
Spoil from lignite mining {GLO} treatment of, in surface landfill   Cut-off, U	1.0	kg
Emissions to water		
Aluminium	7.08E-05	kg
Aluminium	1.18E-07	kg
Antimony	9.38E-11	kg
Antimony	5.35E-08	kg
Arsenic	8.96E-10	kg
Arsenic	5.22E-07	kg
Barium	3.01E-06	kg
Barium	5.03E-09	kg
Beryllium	3.65E-10	kg
Beryllium	2.18E-07	kg
Cadmium	8.88E-08	kg
Cadmium	1.48E-10	kg
Calcium	3.18E-03	kg
Calcium	4.69E-05	kg
Chloride	4.33E-04	kg
Chloride	1.23E-05	kg
Chromium VI	1.90E-09	kg
Chromium VI	1.12E-06	kg
Cobalt	3.47E-06	kg
Cobalt	5.87E-09	kg
Copper	1.80E-06	kg
Copper	3.08E-09	kg
Fluoride	1.25E-07	kg
Fluoride	1.74E-06	kg
Iron	2.36E-04	kg
Iron	3.93E-07	kg
Lead	5.22E-08	kg
Lead	8.72E-11	kg
Magnesium	1.76E-03	kg
Magnesium	1.87E-05	kg
Manganese	8.91E-07	kg
Manganese	1.41E-04	kg
Mercury	9.99E-11	kg
Mercury	4.85E-08	kg
Molybdenum	7.03E-07	kg
Molybdenum	1.32E-09	kg

**34.8 Proxi “Spoil from lignite mining {GLO} treatment of, in surface landfill | Cut-off, U”  
Ecotoxicidad al agua dulce etapa Z (Ecoinvent, 2019) (cont.)**

<b>Product</b>	<b>Amount</b>	<b>Units</b>
Nickel	1.60E-05	kg
Nickel	3.30E-08	kg
Nitrate	1.87E-04	kg
Nitrate	2.31E-06	kg
Phosphate	5.64E-04	kg
Phosphate	6.57E-05	kg
Potassium	1.86E-06	kg
Potassium	1.02E-03	kg
Scandium	2.83E-07	kg
Scandium	4.89E-10	kg
Selenium	5.08E-07	kg
Selenium	1.42E-09	kg
Silicon	1.41E-03	kg
Silicon	2.36E-06	kg
Silver	4.16E-10	kg
Silver	3.12E-09	kg
Sodium	1.77E-03	kg
Sodium	5.28E-06	kg
Strontium	6.14E-05	kg
Strontium	4.95E-07	kg
Sulfate	1.43E-02	kg
Sulfate	2.43E-04	kg
Thallium	2.11E-11	kg
Thallium	1.26E-08	kg
Tin	1.71E-08	kg
Tin	2.85E-11	kg
Titanium	1.32E-06	kg
Titanium	2.21E-09	kg
Tungsten	4.45E-11	kg
Tungsten	1.86E-08	kg
Vanadium	9.82E-10	kg
Vanadium	5.83E-07	kg
Zinc	2.64E-08	kg
Zinc	1.58E-05	kg

## Anexo 35. Publicaciones emanadas de la tesis

Yáñez-Vergara, A.G.; Sotelo-Navarro, P.X., Poggi-Varaldo, H.M., Calderón-Salinas, J.V., Sánchez-Pérez, R. & Matsumoto-Kuwabara, Y. (2022) Análisis de legislación de biorrefinerías en México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 38, 111–142. <https://doi.org/10.20937/RICA.54314>

*Rev. Int. Contam. Ambie.* 38 (Ambiente y Bioenergía), 111-142, 2022  
<https://doi.org/10.20937/RICA.54314>

### ANÁLISIS DE LEGISLACIÓN SOBRE BIORREFINERÍAS EN MÉXICO

Analysis of legislation on biorefineries in Mexico

Alejandra Gabriela YÁÑEZ-VERGARA<sup>1</sup>, Perla Xochilt SOTELO-NAVARRO<sup>1</sup>,  
 Héctor Mario POGGI-VARALDO<sup>1,2\*</sup>, José Víctor CALDERÓN-SALINAS<sup>1,3</sup>,  
 Rocío SÁNCHEZ-PÉREZ<sup>4</sup> y Yasuhiro MATSUMOTO-KUWABARA<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Programa Transdisciplinario en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional. Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, San Pedro Zacatenco, 07360 Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional, Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, San Pedro Zacatenco, 07360 Ciudad de México, México.

<sup>3</sup> Departamento de Bioquímica, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional, Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, San Pedro Zacatenco, 07360 Ciudad de México, México.

<sup>4</sup> Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto s/n, Ticomán, 07340 Ciudad de México, México.

<sup>5</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional, Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, San Pedro Zacatenco, 07360 Ciudad de México, México.

*(Recibido: marzo 2021; aceptado: junio 2021)*

Palabras clave: biorrefinación de residuos, leyes, políticas públicas, residuos orgánicos

#### RESUMEN

La biorrefinería (BRF) de residuos sólidos orgánicos (RSO) propone el aprovechamiento y transformación de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos para la obtención de bioenergías y productos de valor agregado. La investigación y desarrollo de BRF de RSO en el marco internacional ha demostrado tener ventajas potenciales y factuales en el marco del desarrollo sostenible. Además, existe evidencia internacional sobre los posibles beneficios de la legislación relacionada con BRF. En consecuencia, por propiedad transitiva, una legislación sobre BRF seguramente será una gran contribución al desarrollo sostenible en México. Este trabajo busca determinar el estado de la legislación sobre BRF en México mediante un análisis comparativo de las legislaciones de la Unión Europea (UE) y los Estados Unidos de América (EUA). Los resultados muestran que no hay legislación ni política que regule la tecnología de BRF en México y, en comparación con las legislaciones de EUA y la UE, México muestra un rezago. Sin embargo, en materia de bioenergías la legislación actual presenta un avance alentador, que puede servir de base para la generación de una legislación sobre BRF. Con la finalidad de alcanzar la independencia energética en México y reducir los gases de efecto invernadero, es necesario avanzar en la generación de políticas energéticas y de desarrollo sostenible que amparen el diseño y operación de BRF que aprovechen los RSO y tengan la capacidad de producir biocombustibles, bioenergías y bioproductos de valor agregado. De lo contrario, la incertidumbre legal retrasará el desarrollo de esta tecnología.

Key words: laws, organic waste, public politics, waste biorefining