



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD
INSTITUTO DE ECOLOGÍA
CONTEXTOS URBANOS

**EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES Y SOCIALES DE LA
SUSTITUCIÓN DEL COQUE DE PETRÓLEO POR PELLETS DE RESIDUOS
FORESTOINDUSTRIALES EN LA INDUSTRIA CEMENTERA**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:
LIC. EN C.T. ESTEFANÍA CÁRDENAS FUENTES

TUTOR
DR. CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, ESCUELA NACIONAL DE
ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DRA. MÓNICA SANTILLÁN VERA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA ECONÓMICAS
DR. ALEJANDRO DE JESÚS PADILLA RIVERA
UNIVERSITY OF CALGARY, SCHOOL OF ARCHITECTURE, PLANNING AND
LANDSCAPE

REVISORES
DR. RICARDO MUSULE LAGUNES
UNIVERSIDAD VERACRUZANA, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FORESTALES
DR. ANTONIO RODOLFO LLORET CARRILLO
INSTITUTO TECNOLÓGICO AUTÓNOMO DE MÉXICO
CENTRO ITAM DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, MARZO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**Coordinación de Estudios de Posgrado
Ciencias de la Sostenibilidad
Oficio: CGEP/PCS/108/2023
Asunto: Asignación de Jurado**

**M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente**

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su sesión 87 del 17 de enero del presente año, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, de la alumna **Cárdenas Fuentes Estefanía** con número de cuenta **310030098**, con la tesis titulada “Evaluación de los impactos ambientales y sociales de la sustitución del coque de petróleo por pellets de residuos forestoindustriales en la industria cementera”, bajo la dirección del Dr. Carlos Alberto García Bustamante.

PRESIDENTE: DR. RICARDO MUSULE LAGUNES
VOCAL: DR. ANTONIO RODOLFO LLORET CARRILLO
SECRETARIO: DR. ALEJANDRO DE JESÚS PADILLA RIVERA
VOCAL: DRA. MÓNICA SANTILLAN VERA
VOCAL: DR. CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE

Sin más por el momento me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE,

**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 28 de abril de 2023.**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Alonso'.

**Dr. Alonso Aguilar Ibarra
Coordinador
Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM**

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme una formación académica de alto nivel y gratuita a lo largo de los 9 años que he tenido el privilegio de ser parte del alumnado.

Al Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad por ampliar mi perspectiva sobre el quehacer de la ciencia, por mostrarme una Academia en la que se reconocen otros saberes y se incentiva la co-creación de conocimiento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme la beca que permitió que me sustentara económicamente y, así, pudiera dedicarme de tiempo completo a mis estudios de posgrado.

Al Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado por el apoyo económico que me permitió fortalecer mi formación de posgrado con el Diplomado en Derecho Ambiental impartido por la Facultad de Derecho de la UNAM.

Al Dr. Carlos García por aceptarme como tesista y confiar en mi capacidad para desarrollar este proyecto, por proveerme de las herramientas teóricas y prácticas necesarias para realizar la evaluación de ACV ambiental, por orientarme, cuestionarme y tener paciencia con mis tiempos a lo largo de todo el proyecto.

A la Dra. Mónica Santillán por tener la mejor disposición desde el primer día para asesorarme y evaluar minuciosamente cada uno de los detalles del proyecto, ya fuese en cada examen tutorial o revisión del manuscrito. Gracias por su tiempo destinado para reunirnos a discutir los alcances y métodos que abarcaría la tesis.

Al Dr. Alejandro Padilla por sus enseñanzas teóricas y prácticas sobre el ACV aplicado a la sostenibilidad y los métodos de evaluación de impacto social, por toda la bibliografía compartida y las horas destinadas a las reuniones para definir el método que se utilizaría.

Al Dr. Ricardo Musule por haber asesorado este trabajo desde el principio, por compartirme los datos utilizados sobre la empresa Maderas y Materiales San Mateo, y por aportarme su orientación para la toma de decisiones que requirió cada fase del proyecto.

Al Dr. Antonio Lloret por sus enseñanzas sobre la sostenibilidad empresarial, tema que terminó por completar la visión que tenía sobre la dirección que deseaba darle a la tesis y que, sin sus recomendaciones, hubiera resultado incompleta.

Al profesorado del posgrado que, pese a los obstáculos y retos ocasionados por la pandemia, adecuaron sus estrategias de enseñanza sin que esto mermara la calidad de las clases ni su pasión por transmitir el conocimiento. Gracias por la empatía y el tiempo invertido para mantenernos enfocados e inspirarnos incluso en los tiempos más inciertos que ha vivido la humanidad contemporánea. Especialmente, a las Dras. Perla Fernández, Rosalía Ibarra, Patricia Güereca y Alice Poma por su dedicación a la investigación y docencia, son una inspiración para las mujeres en la Academia.

A mis compañeros del posgrado por compartir sus diversas perspectivas, las cuales me permitieron aprender de otros contextos y ampliar mi criterio, ya fuese en las clases o en las reuniones casuales. Me da esperanza saber que allá afuera existen profesionistas tan capaces y apasionados trabajando por la sostenibilidad.

A mi familia por ser mis pilares, por proveerme del cariño y todos los privilegios posibles para poder cumplir este sueño.

Al Dr. Omar Arellano por orientarme respecto a la selección del posgrado que fuese más acorde a mis intereses y valores.

A Adán, Adi, Danny, Fer, Joan, Julietita, y Mali por sostenerme, aconsejarme y apoyarme a lo largo de este ciclo. A Kathe y Jae porque, además de las razones anteriores, hicieron del posgrado una experiencia única y me inspiran al ser mujeres decididas, valientes y apasionadas. Por último, pero no por eso menos importante, a Joel por ser un amigo entrañable y el mejor asesor honorario que pude tener en esta tesis, la cual no estaría terminada sin su paciencia y disposición para dedicarle el tiempo necesario a contestar mis dudas, revisar mis modelaciones y discutir todo lo relacionado con el mundo del ACV.

“En la naturaleza no hay premios ni castigos, hay consecuencias.”

Robert Green Ingersoll

Contenido

Índice de Tablas	8
Índice de Figuras	8
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	13
I. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1. Planteamiento del problema	16
1.2. Justificación.....	18
1.3. Importancia en el marco de las Ciencias de la Sostenibilidad.....	19
1.4. Pregunta de investigación	19
1.5. Hipótesis	19
1.6. Objetivos	19
II. MARCO REFERENCIAL.....	21
2.1. Sostenibilidad energética en la industria cementera	21
2.1.1. Riesgos climáticos	21
2.1.2. Iniciativa de Sustentabilidad del Cemento.....	22
2.1.3. Mitigación de impactos y creación de valor mediante la gestión de la energía	23
2.1.4. Alternativas energéticas a partir de la simbiosis industrial.....	23
III. MARCO TEÓRICO	25
3.1. Bioenergía.....	25
3.1.1. Definición.....	25
3.1.2. Fuentes de biomasa	25
3.1.3. Clasificación de los biocombustibles	26
3.1.4. Estadísticas	26
3.1.5. Estimaciones	26
3.1.6. Bioenergía a partir de residuos forestoindustriales.....	27
3.2. Bioenergía y sostenibilidad.....	31
3.2.1. Desarrollo sostenible, sostenibilidad energética y bioenergía sostenible.....	31
3.2.2. Impactos de la bioenergía insostenible	32
3.2.3. Evaluación de la sostenibilidad para bioenergía.....	34
3.3. Características de la metodología Análisis de Ciclo de Vida.....	41
3.3.1. Definición de objetivos y alcance	43
3.3.2. Análisis de inventario	43
3.3.3. Evaluación de impactos	43
3.3.4. Interpretación.....	44

3.3.5. Expansión del sistema y asignación.....	44
IV. CRITERIO AMBIENTAL	45
4.1 Metodología	45
4.1.1. Definición del objetivo y el alcance.....	45
4.1.2. Análisis de inventario	49
4.1.3. Evaluación de impactos	53
4.1.4. Asignación de impactos	53
4.2 Resultados y discusión	53
V. CRITERIO SOCIAL	74
5.1. Metodología.....	74
5.2 Resultados y discusión.....	76
VI. RIESGOS CLIMÁTICOS Y OPORTUNIDADES	87
6.1. Metodología.....	87
6.2. Resultados y discusión.....	87
VII. CONSIDERACIONES FINALES	96
VIII Perspectivas.....	101
8.1. De la transparencia de las empresas.....	101
8.2. De los marcos regulatorios para proyectos de bioenergía	101
8.3. De la presente investigación.....	101
IX. CONCLUSIONES	103
X. REFERENCIAS	105

Índice de Tablas

Tabla 1. Extracto de criterios propuestos por cada dimensión de la sostenibilidad de acuerdo con (UABio, 2016).....	35
Tabla 2. Serie de indicadores de GBEP	37
Tabla 3. Serie de indicadores de Dale y colaboradores	38
Tabla 4. Serie de indicadores de UNEP/SETAC incluyendo indicadores GRI	39
Tabla 5. Características de las categorías de impacto	48
Tabla 6. Análisis de inventario Escenario base respecto a la unidad funcional.	51
Tabla 7. Análisis de inventario Escenario alternativo respecto a la unidad funcional.....	52
Tabla 8. Comparación de resultados entre el sistema base y alternativo	68
Tabla 9. Resultados del análisis de contribución por proceso unitario del sistema base ..	69
Tabla 10. Resultados del análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo	70
Tabla 11. Comparación resultados con lo reportado en investigaciones similares.	72
Tabla 12. Indicadores sociales reportados en la prueba piloto.	75
Tabla 13. Número de empleados por empresa	76
Tabla 14. Riesgos climáticos reportados por CEMEX. Tabla modificada con información de (CEMEX, 2021).....	91
Tabla 15. Análisis de contribución por uso de coque de petróleo vs pellets de madera ...	92
Tabla 16. Oportunidades relacionadas al clima reportadas por CEMEX. Tabla modificada con información de (CEMEX, 2021).....	93
Tabla 17. Oportunidades identificadas en relación con los riesgos climáticos.....	93

Índice de Figuras

Figura 1. Generación de residuos forestoindustriales por estado (t/a) durante 2012. Elaboración propia con información del Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos 2020. Los estados que no cuentan con información fueron excluidos de esta gráfica.....	28
Figura 2. Generación de residuos forestoindustriales por estado (t/a) durante 2012. Elaboración propia con información del Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos 2020. Los estados que no cuentan con información fueron excluidos de esta gráfica.....	33
Figura 3. Representación esquemática del ACV (Caínzos et al., 2002)	41
Figura 4. Representación esquemática de la metodología ACV (Puig et al., 1999).....	42
Figura 5. Escenario base (coque de petróleo).....	46
Figura 6. Escenario alternativo (pellets de madera)	47
Figura 7. Comparación de escenarios respecto al Cambio climático	54
Figura 8. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto al Cambio climático	54
Figura 9. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto al Cambio climático	55
Figura 10. Comparación de escenarios respecto al Agotamiento de la capa de ozono....	55
Figura 11. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto al Agotamiento de la capa de ozono.....	56

Figura 12. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto al Agotamiento de la capa de ozono	56
Figura 13. Comparación de escenarios respecto al Ozono troposférico.....	57
Figura 14. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto al Ozono troposférico.....	58
Figura 15. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto al Ozono troposférico.....	58
Figura 16. Comparación de escenarios respecto al Material particulado.....	59
Figura 17. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto al Material particulado.....	59
Figura 18. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto al Material particulado	60
Figura 19. Comparación de escenarios respecto a la Acidificación terrestre.....	60
Figura 20. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto a la Acidificación.....	61
Figura 21. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto a la Acidificación	61
Figura 22. Comparación de escenarios respecto a la Eutroficación	62
Figura 23. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto a la Eutroficación	63
Figura 24. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto a la Eutroficación	63
Figura 25. Comparación de escenarios respecto a la Ecotoxicidad	64
Figura 26. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto a la Ecotoxicidad	64
Figura 27. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto a la Ecotoxicidad.....	65
Figura 28. Comparación de escenarios respecto a la Toxicidad humana.....	65
Figura 29. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto a la Toxicidad humana.....	66
Figura 30. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto a la Toxicidad humana	66
Figura 31. Comparación de escenarios respecto al Agotamiento de recursos fósiles	67
Figura 32. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto al Agotamiento de recursos fósiles	67
Figura 33. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto al Agotamiento de recursos fósiles	68

RESUMEN

En la actualidad, el cambio climático es uno de los problemas más apremiantes que enfrenta la humanidad debido a los impactos ambientales, sociales y económicos que puede ocasionar. La evidencia científica ha demostrado que la actividad antrópica que contribuye principalmente a la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es la quema de combustibles fósiles. Particularmente, la industria cementera es una emisora relevante de GEI debido a que presenta un proceso energéticamente intensivo durante la fundición de los minerales para la producción de clínker. Esta situación ha provocado que esta industria presente riesgos climáticos de transición, es decir, políticos, legales, comerciales y reputacionales, enmarcados en las tendencias de descarbonización de la economía que son impulsadas por la Organización de las Naciones Unidas y que, por consiguiente, han decantado en las agendas ambientales nacionales. Por consiguiente, las empresas cementeras se encuentran en la búsqueda de combustibles que sirvan como alternativa para sustituir el uso de combustible fósil con el fin de descarbonizar sus operaciones. A la par, como resultado de las operaciones de la industria maderera se generan residuos forestoindustriales que, de no ser dispuestos de manera adecuada, generan impactos al ambiente y la sociedad. Esto ha derivado en la búsqueda de alternativas para su aprovechamiento, como lo es su transformación en biocombustible en forma de pellets. Los pellets podrían ser utilizados por las empresas cementeras para sustituir el uso de coque de petróleo, sin embargo, para conocimiento de la autora hasta el momento no se ha realizado un análisis de los impactos ambientales y sociales que esta acción podría ocasionar, tomando en consideración el contexto mexicano.

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar los impactos ambientales y sociales de la sustitución del coque de petróleo por pellets de residuos forestoindustriales en la industria cementera, con enfoque de ciclo de vida. La evaluación estuvo conformada por tres fases: ACV ambiental, Social, e Integración y comparación. Para la primera fase se realizó un ACV ambiental en el cual se comparó el escenario base, caracterizado por el uso de coque de petróleo en el proceso de producción de clínker, y el escenario alternativo, el cual representa una propuesta de simbiosis industrial entre la empresa maderera (Maderas y Materiales San Mateo, MMSM) que vende pellets de residuos forestoindustriales a la empresa cementera (CEMEX) con el fin de sustituir el uso del coque. Las siguientes nueve categorías de impacto fueron evaluadas: Acidificación, Cambio climático, Agotamiento de recursos abióticos (recursos fósiles), Eutrofización, Ecotoxicidad, Toxicidad humana, Agotamiento de la capa de ozono, Material particulado, y Ozono troposférico. Para evaluar

el aspecto social se evaluó bajo el indicador del número de empleos generado en la fase de producción del combustible, tomando como referencia los datos proveídos por parte de MMSM y lo reportado por PEMEX en su reporte de sostenibilidad. Para la tercera fase, a partir de la revisión de literatura sobre las fases de producción y consumo de cada combustible, se identificaron temas que presentaran relación con la sostenibilidad y que permitieran ampliar el panorama de las implicaciones presentes en el ciclo de vida de ambos combustibles.

Los hallazgos de la presente investigación fueron que la sustitución de coque de petróleo por pellets de residuos forestoindustriales presenta ventajas en su desempeño ambiental puesto que se obtuvieron mejores resultados en cinco de las nueve categorías de impacto evaluadas. Las categorías en las que se obtuvo un mejor desempeño fueron: Cambio climático, Ozono troposférico, Acidificación terrestre, Ecotoxicidad, y Toxicidad humana. Adicionalmente, se encontró que el proceso unitario que tuvo mayor contribución fue la Fundición para el escenario base, mientras que para el sistema alternativo fue la Transformación de la madera. En el ámbito social, tomando la generación de empleo como único indicador, se encontró que el coque de petróleo presenta un mejor desempeño. Por último, tras la revisión de la literatura se identificaron factores políticos, legales, mercantiles y reputacionales asociados a la producción y consumo de ambos combustibles. Los principales impactos directos e indirectos en la fase de producción de coque de petróleo son: la ocurrencia de accidentes; la contaminación ambiental; afectaciones a los ecosistemas y biodiversidad; afectaciones a la salud, modos y medios de vida de las comunidades (incluyendo comunidades indígenas), las afectaciones a otras actividades económicas; prevalencia de corrupción y sobornos; y exposición de los trabajadores a territorios inseguros. Los principales impactos directos e indirectos en la fase de producción de pellets de madera son: riesgo de generación de atmósferas asfixiantes y explosivas, combustión espontánea, emisión de gases tóxicos que pueden derivar en daños a la salud (irritación de ojos y del sistema respiratorio, y, en casos agudos, la muerte). En cuanto a la fase de consumo, el consumo de pellets de madera tendría los siguientes impactos: contribuiría a la reducción de los riesgos climáticos de transición de la empresa cementera ya que demostraría un compromiso ante las iniciativas internacionales y gremiales; contribuiría a la descarbonización de sus operaciones; mejoraría su desempeño en materia de sostenibilidad, con lo cual se anticiparía a las tendencias en los cambios políticos y legales nacionales e internacionales que posiblemente se presenten en el futuro; propiciaría el cumplimiento de las cláusulas contractuales comerciales; mejoraría el perfil de la

empresa ante sus inversionistas y su relación con las comunidades en donde presenta operaciones. Mientras tanto, los impactos del consumo de coque de petróleo serían los siguientes: ocasionaría el aumento de los riesgos climáticos de transición de la empresa cementera ya que incumpliría sus compromisos ante las iniciativas internacionales y gremiales; contribuiría al mantenimiento de emisiones de GEI de sus operaciones; mermaría su desempeño en materia de sostenibilidad, lo cual dificultaría la posibilidad de hacer frente a los cambios políticos y legales nacionales e internacionales que posiblemente se presenten en el futuro; propiciaría el incumplimiento de las cláusulas contractuales comerciales; empeoraría el perfil de la empresa ante sus inversionistas y su relación con las comunidades en donde presenta operaciones.

En conclusión, los resultados de esta investigación muestran que el uso de pellets de residuos forestoindustriales por parte de la empresa cementera limita los impactos negativos en comparación con el uso de coque de petróleo. Así mismo, la articulación de esfuerzos enfocados a la sostenibilidad empresarial permite que se formen relaciones de simbiosis industrial que permitirían mejorar el desempeño ambiental y social de ambas y propiciar el desarrollo de la economía circular industrial en México puesto que la cementera obtiene una fuente de energía renovable mientras que la maderera logra gestionar sus residuos forestoindustriales de manera responsable y genera ganancias a partir de la venta de los pellets. Este trabajo representa una de las escasas investigaciones que abordan la evaluación de impactos ambientales y sociales de proyectos energéticos con enfoque de ciclo de vida y dentro del marco de las Ciencias de la Sostenibilidad a nivel nacional.

ABSTRACT

Currently, climate change is one of the most urgent problems that the humanity faces due to the environmental, social, and economic impacts it can cause. Scientific evidence has shown that the human activity that mainly contributes to the emission of Greenhouse Gases (GHG) is the burning of fossil fuels. In particular, the cement industry is a relevant GHG emitter because it presents an energy-intensive process during the smelting of minerals to produce clinker. This situation has caused this industry to present climate transition risks, that is, political, legal, commercial, and reputational risks, influenced by the decarbonization trends of the economy that are promoted by the United Nations. Consequently, cement companies are searching for fuels that serve as an alternative to replace the use of fossil fuel to decarbonize their operations. At the same time, because of the operations of the lumber industry, wood residues are generated and, if not adequately disposed, can generate impacts on the environment and society. This has led to the search for alternatives for their reuse, such as their transformation into biofuel in the form of pellets. Such pellets could be used by cement companies to replace the use of petroleum coke, however, to date there has been no analysis of the environmental and social impacts that it could cause, considering the Mexican context.

That said, this research aimed to assess the environmental and social impacts of substituting petroleum coke for pellets from industrial wood residues in the cement industry, with a life cycle approach. The evaluation consisted of three phases: Environmental LCA, Social, and Integration and comparison. For the first phase, an environmental LCA was carried out in which the base scenario, characterized by the use of petroleum coke in the clinker production process, was compared to the alternative scenario, which represents a proposal for industrial symbiosis between the wood company (Maderas y Materiales San Mateo, MMSM) that sells pellets made from wood residues to the cement company (CEMEX) to replace the use of coke. The impact categories evaluated were the following: Acidification, Climate change, Depletion of abiotic resources (fossil resources), Eutrophication, Ecotoxicity, Human toxicity, Depletion of the ozone layer, Particulate matter, and Tropospheric ozone. To evaluate the social aspect, it was evaluated under the indicator of the number of jobs generated in the fuel production phase, taking as reference the MMSM data and what was reported by PEMEX. For the third phase, from the literature review on the phases of production and consumption of each fuel, issues that will present a relationship with sustainability were identified, which will allow broadening the panorama of the implications present in the life cycle of both fuels.

The findings of the present investigation were that the substitution of petroleum coke for industrial forest residue pellets presents a better environmental performance since better results were obtained in five of the nine impact categories evaluated. The categories in which the best performance was obtained were Climate change, Tropospheric ozone, Terrestrial acidification, Ecotoxicity, and Human toxicity. In addition, it was found that the unitary process that had the greatest contribution was the Smelter for the base scenario, while for the alternative it was the Transformation of the wood. In the social field, taking the generation of employment as the only indicator, it was found that petroleum coke presents a better performance. Finally, after reviewing the literature, political, legal, mercantile, and reputational factors associated with the production and consumption of both fuels were identified. The main direct and indirect impacts in the petroleum coke production phase are the occurrence of accidents; environmental pollution; effects on ecosystems and biodiversity; effects on the health, ways and means of life of the communities (including indigenous communities), effects on other economic activities; prevalence of corruption and bribery; and exposure of workers to unsafe territories. The main direct and indirect impacts in the production phase of wood pellets are risk of generating suffocating and explosive atmospheres, spontaneous combustion, emission of toxic gases that can cause damage to health (irritation of the eyes and the respiratory system, and, in acute cases, death). Regarding the consumption phase, the consumption of pellets would have the following impacts: it would contribute to the reduction of cement company's climate transition risks since it would demonstrate a commitment to international and union initiatives; it would contribute to the decarbonization of its operations; it would improve its performance in terms of sustainability, thereby anticipating trends in political and legal changes at home and abroad that are likely to occur in the future; it would favor the fulfillment of the commercial contractual clauses; It would improve the company's profile before its investors and its relationship with the communities where it operates. Meanwhile, the impacts of petroleum coke consumption would be the following: it would increase the cement company's climate transition risks, since it would fail to comply with its commitments to international and union initiatives; it would contribute to the maintenance of GHG emissions from its operations; it would reduce its performance in terms of sustainability, which would go against compliance with national and international political and legal changes that may arise in the future; would lead to non-compliance with commercial contractual clauses; it would worsen the company's profile before its investors and its relationship with the communities where it operates.

In conclusion, the use of pellets from forest-industrial residues by the cement company has more positive impacts than the use of petroleum coke. Likewise, the articulation of efforts focused on business sustainability allows the formation of industrial symbiosis relationships that would improve the environmental and social performance of both and promote the development of the industrial circular economy in Mexico. This work represents one of the few investigations that address the evaluation of environmental and social impacts of energy projects with a life cycle approach and within the framework of Sustainability Sciences at the national level.

I. INTRODUCCIÓN

La presente sección tiene por objetivo introducir al lector a los puntos críticos que sirvieron como punto de partida y guiaron esta investigación. Se empezará con el Planteamiento del problema, en donde se resumirá cuál es el fenómeno que está generando los impactos, a quién está impactando y cómo lo está haciendo. Posteriormente, se abordará la justificación del desarrollo de esta investigación como aporte al estudio de la problemática. Lo anterior dará pie a la sección en la cual se plantea la importancia del estudio de la problemática en el contexto de las Ciencias de la Sostenibilidad. Finalmente, y de manera consecutiva, se presentarán la pregunta de investigación, la hipótesis, y los objetivos de la presente investigación.

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, el cambio climático es uno de los problemas más apremiantes (Castrejón et al., 2018). Como lo ha informado el Panel Intergubernamental del Cambio Climático, la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente de dióxido de carbono (CO₂), en la atmósfera han alcanzado niveles sin precedentes como resultado de las actividades antrópicas (IPCC, 2019). Específicamente, se ha observado que el CO₂ es el principal forzador radiativo y que su concentración en la atmósfera ha tenido un incremento del 40% en comparación con la época preindustrial (IPCC, 2019). Como consecuencia de la alta concentración de GEI en la atmósfera, se ocasionan cambios en el sistema climático global que, en la actualidad, ya han sido detectados como: incremento en la temperatura media de la atmósfera y del océano, disminución de la criósfera, aumento del nivel del mar, y alteraciones en los patrones de precipitaciones (IPCC, 2019).

En México, las características geográficas y condiciones sociales del país lo convierten en altamente vulnerable ante los efectos del cambio climático. Actualmente, se cuenta con evidencia de dichos efectos a nivel nacional como los siguientes: aumento de las temperaturas terrestres y marinas, crecimiento del número de fenómenos hidrometeorológicos extremos, aumento del nivel del mar, sequías graves, pérdidas humanas, y altos costos económicos y sociales (INECC-SEMARNAT, 2018a).

La evidencia científica ha demostrado que la actividad antrópica que contribuye principalmente a la emisión de GEI es la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2019). La producción de cemento es un proceso energéticamente intensivo debido a la temperatura que debe alcanzarse en los hornos de fundición, aproximadamente 1450 °C (Güereca et al., 2015), los cuales son calentados a partir de la quema de combustibles fósiles.

Específicamente, el 35% de sus emisiones de CO₂ se deben al consumo de combustible fósil para la generación de energía térmica (Wilson & Chang, 2003). Así, la producción de cemento es responsable de entre el 5 y 7% de emisiones de CO₂ a nivel mundial (Fry, 2013).

A nivel nacional, en el año 2015, el uso de combustibles fósiles para la producción de cemento contribuyó con alrededor de 14,666 Gg de CO₂e (INECC-SEMARNAT, 2018b). Al mismo tiempo, México es la 12^a nación productora de cemento y cuenta con el tercer productor más grande de cemento a nivel mundial, CEMEX (Fry, 2013; Stafford et al., 2015). Además, cabe resaltar que, de acuerdo con las proyecciones de la industria de la construcción, se espera que la demanda mundial de cemento aumente entre 43 y 72% para el 2050 (Fry, 2013). Por estas razones, la industria del cemento es un sector importante para las estrategias de reducción de gases de efecto invernadero (Fry, 2013; Worrell et al., 2001).

Lo anterior ha impulsado la búsqueda de alternativas para disminuir las emisiones de GEI a la par de satisfacer la demanda global de recursos energéticos (Bartle & Abadi, 2010). Como resultado, se han desarrollado una gama de tecnologías que permiten la generación de energía a partir de fuentes renovables como la bioenergía (Cornelissen et al., 2012). Dado que el desarrollo económico ha estado fuertemente correlacionado con el incremento del uso energía y el aumento de las emisiones de GEI, las fuentes renovables de energía, como la bioenergía, pueden ayudar a desacoplar esa tendencia, contribuyendo al desarrollo sostenible (Baležentis et al., 2019). Además de su potencial para mitigar las emisiones de GEI, estas alternativas pueden proveer otros beneficios como desarrollo social y económico, acceso a la energía, seguridad energética y la reducción de impactos negativos sobre el ambiente y la salud (Baležentis et al., 2019; IEA Bioenergy, 2010; IPCC, 2012). Respecto al desarrollo social se ha señalado que las plantas de energía a partir de fuentes renovables pueden tener un impacto positivo en el empleo y representar un menor riesgo de desastres debido a su menor tasa de fatalidades en comparación con instalaciones de combustibles fósiles (IPCC, 2012). Por lo tanto, las energías renovables pueden apoyar al logro de algunos de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) y el cumplimiento del Acuerdo de París (Ibarra, 2017; Ibarra Sarlat, 2018).

La bioenergía juega un papel importante en la generación de energía a nivel mundial debido a que globalmente es la fuente renovable de energía más utilizada, no obstante, cabe señalar que se trata, principalmente, de bioenergía en su forma tradicional (p. ej. leña)

(Fernández et al., 2015). También, presenta beneficios como evitar la emisión de GEI que serían liberados como resultado de la degradación de los residuos, como aquellos generados por los residuos forestoindustriales producidos en la industria maderera (Elghali et al., 2007). A la par, puede impulsar el desarrollo rural y favorecer la gestión agrícola y forestal (Díaz-Chavez et al., 2015; Fernández et al., 2015). Otra ventaja que presenta es la amplia gama de aplicaciones como, por ejemplo, su uso en el sector industrial para sustituir a los combustibles fósiles en los procesos térmicos (IEA Bioenergy, 2009, 2010; IPCC, 2012; IRENA et al., 2017).

Algunas industrias, como la cementera, ya contemplan dentro de sus modelos de sostenibilidad o de responsabilidad social la gestión de emisiones y de energía a través el uso de combustibles diferentes a los combustibles fósiles (Vera-Martínez, 2017). Por esta razón, en algunos casos, la industria cementera utiliza los residuos generados por otras industrias para producir la energía térmica en sus hornos, mientras que las otras industrias se benefician de la gestión sostenible de sus residuos, es decir, que se trata de una relación de simbiosis industrial (Ammenberg et al., 2015). Para la presente investigación se evaluará comparativamente un escenario en el cual la industria cementera utiliza el coque de petróleo como combustible en su horno, frente a un escenario hipotético en el cual existe una simbiosis industrial entre una industria maderera, cuyos residuos forestoindustriales son convertidos en pellets de madera, y una industria cementera que utiliza los pellets para sustituir el coque de petróleo. Esto con el fin de comprobar los impactos ambientales y sociales de la sustitución del coque de petróleo por pellets de madera para la generación de energía térmica en la industria cementera.

1.2. Justificación

Dado que la bioenergía implica interacciones complejas entre los sistemas ambientales y sociales, han surgido preocupaciones respecto a distintos aspectos como: salud, pobreza, biodiversidad, gestión del agua, etc. Sobre todo, la preocupación más grande ha sido la seguridad alimentaria en el caso de biocombustibles provenientes de cultivos energéticos debido a la competencia entre el uso de suelo y agua para la generación de alimentos y de biocombustibles, y los conflictos sociales y económicos que pueden surgir (IEA Bioenergy, 2010; IPCC, 2012; Jeihanipour & Bashiri, 2015). Si bien es cierto que los biocombustibles producidos a partir de residuos no presentan dicho problema, debe comprobarse su sostenibilidad (Jeihanipour & Bashiri, 2015). Por estas razones, es necesario que los proyectos energéticos de este tipo sean evaluados integralmente, tomando en cuenta los

aspectos socioeconómicos y ambientales para conocer su potencial de mitigación, así como su contribución al desarrollo sostenible, además de sus riesgos y costos (IPCC, 2012). Esto para que pueda existir un uso mayor y sostenible de la bioenergía, habilitado a partir del diseño, implementación y monitoreo adecuado de los marcos teóricos de la sostenibilidad que permitan minimizar los impactos negativos y maximizar los beneficios respecto a cuestiones sociales, económicas y ambientales (IPCC, 2012).

1.3. Importancia en el marco de las Ciencias de la Sostenibilidad

Como se mencionó anteriormente, los sistemas bioenergéticos se encuentran interrelacionados de manera compleja con los sistemas ambiental, social, económico y tecnológico. Además, la simbiosis que se planteará en esta investigación entre la industria maderera y la cementera propicia la articulación de otros temas importantes en la construcción de escenarios de sostenibilidad como el cambio climático, la gestión de residuos, la sostenibilidad industrial y, a mayor escala, la economía circular. Tomando en cuenta lo anterior y dada la formación del científico en sostenibilidad, es imperante su aportación a través del análisis interdisciplinario de las problemáticas de la naturaleza antes expuesta, con el fin de generar información útil que contribuya a la generación de acciones y de políticas públicas que permitan la transición nacional hacia el uso de energía sostenible y formas de producción más responsables.

1.4. Pregunta de investigación

¿Cuáles serían los impactos ambientales potenciales y sociales de la sustitución de coque de petróleo por pellets de residuos forestoindustriales en la industria cementera?

1.5. Hipótesis

El uso de pellets de madera fabricados a partir de residuos forestoindustriales por parte de la industria cementera tendrá un mejor desempeño ambiental y social en comparación con el sistema convencional, es decir, uso de coque de petróleo.

1.6. Objetivos

Objetivo general:

- Evaluar los impactos ambientales y sociales de la sustitución de coque de petróleo por pellets de residuos forestoindustriales en la industria cementera, con enfoque de ciclo de vida ubicada en México en el año 2023.

Objetivos específicos:

1. Realizar una evaluación comparativa de los impactos ambientales del uso de pellets en la industria cementera frente al coque de petróleo a través de un ACV ambiental.
2. Recopilar y comparar la información sobre indicadores sociales recomendados para evaluar sistemas de bioenergía con el fin de definir el indicador más adecuado para el caso de la sustitución del uso de coque de petróleo por pellets, así como su aplicación.
3. Evaluar la contribución a los riesgos climáticos y oportunidades que presenta el uso de pellets frente al coque de petróleo en la industria cementera.

II. MARCO REFERENCIAL

Esta sección tiene por objetivo presentar los referentes que han influenciado el desarrollo de las iniciativas de energía sostenible en la industria cementera. Se iniciará abordando el origen de la sostenibilidad energética en la industria cementera, partiendo de los riesgos climáticos y la creación de la Iniciativa de Sustentabilidad del Cemento. Posteriormente se explicará la relación entre la mitigación de impactos y la creación de valor para la empresa mediante la gestión de la energía. Por último, se presentarán algunas alternativas energéticas que surgen a partir de la simbiosis industrial.

2.1. Sostenibilidad energética en la industria cementera

En esta sección se presentan algunos antecedentes de la sostenibilidad energética en la industria cementera. En primer lugar, se toma como punto de partida los riesgos climáticos a los cuales se enfrenta esta industria, con especial interés en los riesgos climáticos de transición. En segundo lugar, se explican el origen y fin de la Iniciativa de Sustentabilidad del Cemento. Por último, se aborda el tema de la gestión de la energía como área de oportunidad para la mitigación del cambio climático y creación de valor para esta industria.

2.1.1. Riesgos climáticos

Tomando como base que a partir de iniciativas impulsadas por el sector privado internacional y por las Naciones Unidas a través del Pacto Global, los Principios para la Inversión Responsable, y los Principios Rectores sobre las Empresas y los Derechos Humanos, los agentes de interés como clientes e inversores presentan un creciente interés por la sostenibilidad empresarial/corporativa, también conocida como Responsabilidad social empresarial/corporativa (RSE/RSC) o como el desempeño en índices de Ambiente, Sociedad y Gobernanza (ASG o ESG, por sus siglas en inglés) (Balsara et al., 2021; Birindelli et al., 2022; Er Kara et al., 2021; Fahmy, 2022; Friederich et al., 2021; Huang & Lin, 2022; In et al., 2022; Kanagaretnam et al., 2022; Reboledo & Otero, 2021; Ren et al., 2022; Sobehart, 2022; Zhong & Peng, 2022). Esto ha impulsado que las empresas replanteen sus estrategias de producción con el fin de mejorar su desempeño ante los estándares impuestos para la evaluación de la gestión de la sostenibilidad (UNEP FI, 2021).

Como punto de partida, es atinado recordar que el cambio climático presenta una amplia gama de riesgos tanto para las firmas como para las comunidades de las cuales dependen. De acuerdo con su naturaleza estos riesgos se clasifican en físicos y de transición. Los riesgos físicos son provocados por los cambios directos en el ambiente mientras que los riesgos de transición surgen como resultado de la respuesta colectiva al cambio climático.

Estos últimos pueden ser de tipo político y legales, de mercado, de tecnología, y de reputación (Banco de México - UNEP Inquiry, 2020; TCFD, 2017, 2022; UNEP FI, 2021; Wei & Marshall, 2018). Si bien el término “riesgo climático” se encuentra en auge en el ámbito empresarial, es de especial interés en el caso del sector cementero para sus estrategias de sostenibilidad empresarial, específicamente para aquellas relacionadas a la sostenibilidad energética de sus operaciones (UN Climate Change, 2017).

Los riesgos de transición para la industria, empezando por los de tipo político y legales, son los siguientes: restricciones sobre la emisión de GEI, restricciones sobre el uso de combustibles fósiles y mayores requerimientos de eficiencia energética. Los riesgos de tecnología se presentan como el desarrollo de nuevos materiales de construcción que sean más competitivos y sostenibles. Como riesgos de mercado se encuentran la demanda de los consumidores por productos sostenibles. Respecto a los riesgos reputacionales, se encuentran afectaciones a las oportunidades de negocio por no cumplir con un perfil de industria sostenible (Battelle, 2002; UN Climate Change, 2017).

A pesar de los diversos riesgos climáticos a los que se enfrenta la industria, también presenta una gama de oportunidades derivadas de los esfuerzos para la mitigación del cambio climático. Entre las oportunidades se encuentran la eficiencia de recursos y el uso de fuentes de energía bajas en GEI. Al tomar acción sobre las áreas de oportunidad se podrán reducir algunos de los riesgos. Bajo ese tenor, a continuación, describiré la iniciativa que formuló la industria para hacer frente a sus riesgos (UN Climate Change, 2017).

2.1.2. Iniciativa de Sustentabilidad del Cemento

Ante el conocimiento de los impactos ambientales y los riesgos climáticos del sector, la industria cementera se ha organizado para actuar en favor de la mitigación de sus impactos. Así, en 1990, tras la Cumbre de la Tierra, se reunieron los principales productores de cemento a nivel mundial para identificar los aspectos esenciales de la sustentabilidad del sector y, a partir de esto, diseñar hojas de ruta para mejorar su desempeño. Como resultado se formó la Iniciativa de Sustentabilidad del Cemento (CSI, por sus siglas en inglés) entre las empresas cementeras y el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés) para facilitar el desarrollo sostenible del sector y promover su autorregulación (Battelle, 2002; UN Climate Change, 2017; Vera-Martínez, 2017; Zaragoza, 2010). De esta manera, se definió que la visión al 2020 sería que “Las empresas cementeras han integrado el desarrollo sostenible en sus operaciones globales, son conocidas como líderes en ecología industrial e innovadoras en la gestión del dióxido

de carbono, son consideradas como empleadores atractivos y han establecido relaciones de confianza con las comunidades en las que operan” (Battelle, 2002, p. 20).

2.1.3. Mitigación de impactos y creación de valor mediante la gestión de la energía

Para alcanzar tal visión, se fijaron ocho áreas de acción, de las cuales dos de ellas son pertinentes para el tema que aborda esta investigación y que son: “Protección del clima” y “Productividad de los recursos”. La primera con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mientras que la segunda tiene como objetivo la conservación de los recursos naturales al usar menos energía y reciclar residuos. Adicionalmente, se recomienda que, para contribuir a la productividad de los recursos, se deben tomar acciones para utilizar combustibles alternativos con el fin de sustituir los combustibles fósiles, así como para comprender mejor sus beneficios y costos. Inclusive, se hace mención de que se debe propiciar la ecología industrial para trabajar con otras industrias con el fin de encontrar oportunidades para el intercambio económico de productos de desecho. No obstante, en orden para que suceda lo anterior, se deben llevar a cabo investigaciones para conocer la compatibilidad del uso de varios tipos de residuos; la factibilidad y efectividad para trabajar con determinados proveedores; y generar información para comparar los impactos ambientales, sociales y económicos de las distintas alternativas en todo el ciclo de vida de la producción del cemento (Battelle, 2002).

Específicamente, en el sector cementero se ha identificado que, al implementar planes de sustentabilidad energética a partir de combustibles alternativos se crea valor por las razones que se describirán a continuación. Para empezar, evita la disposición final de residuos en rellenos sanitarios o vertederos clandestinos, así como sus impactos asociados. En consecuencia, se presenta como una opción para el tratamiento seguro de los residuos, aprovechando al máximo la energía contenida en ellos. También, se ahorran combustibles fósiles, los cuales son recursos no renovables y se disminuyen las emisiones de GEI derivadas de su quema (Zaragoza, 2010). Además, este tipo de prácticas pueden contribuir a reducir los costos operativos debido a que disminuye el consumo de combustibles fósiles, cuyos precios son volátiles. Por último, provee una mejor reputación respecto a la responsabilidad social de la industria (Battelle, 2002).

2.1.4. Alternativas energéticas a partir de la simbiosis industrial

Con el fin de reducir las emisiones de GEI provenientes del uso de combustible fósil para la generación de energía térmica, la industria cementera ha identificado la necesidad de establecer relaciones comerciales con proveedores estratégicos para lograr sus objetivos

ambientales. A partir de la Ecología industrial y la Economía circular se ha identificado que una manera de reducir los impactos ambientales de las industrias es establecer articulaciones de simbiosis industrial, es decir, relaciones entre las industrias para obtener beneficios mutuos a partir del intercambio de residuos, co-productos y/o energía. Adicionalmente, la eficiencia que esto produce en la gestión de recursos deriva en beneficios económicos y cerrar los ciclos de materiales-energía-residuos-emisiones, como lo pretenden la Ecología Industrial y la Economía circular (Sokka et al., 2011).

Debido a las razones mencionadas, alrededor del mundo la industria cementera ha impulsado la implementación de simbiosis con industrias de distintos giros para conseguir alternativas que permitan sustituir el uso de combustibles fósiles en sus hornos de fundición. Las estrategias evaluadas y utilizadas para conseguir la sustitución del combustible fósil han sido el co-procesamiento de residuos como, por ejemplo: residuos urbanos, residuos industriales (madera, de la construcción, residuos plásticos, harina de carne y huesos, lodo de aguas residuales, biomasa de residuos agrícolas y forestales, llantas; y el uso de pellets de madera, entre otros) (Hossain et al., 2019; Kara, 2012; Mokrzycki & Uliasz-Bochenczyk, 2003; Reza et al., 2013; Stafford et al., 2015). Los Países Bajos son la nación con el mayor porcentaje de sustitución de combustible con un 83%, seguido de países como Austria, Alemania y Noruega con un 60% (Stafford et al., 2015). No obstante, los países en desarrollo son responsables del 80% de la producción global de cemento, especialmente Brasil, México y Argentina puesto que ocupan los lugares 5to, 12do, y 18vo, respectivamente, dentro de los principales países productores (Stafford et al., 2015). En Latinoamérica, las estadísticas de sustitución muestran que, en 2019, en México la empresa CEMEX alcanzó un porcentaje de sustitución del 8%, mientras que, en 2012, en Brasil la empresa Intercement alcanzó un 9% (Stafford et al., 2015).

III. MARCO TEÓRICO

Esta sección tiene por objetivo presentar la información más relevante sobre la bioenergía y estará dividida en tres temas principales: generalidades de la bioenergía, la bioenergía y la sostenibilidad, y la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Para ello, se iniciará definiendo qué es la bioenergía, cuáles son las fuentes de biomasa y cómo se clasifican los biocombustibles, se revisarán las estadísticas y estimaciones relacionadas con la bioenergía, además de la información más relevante sobre la bioenergía generada a partir de residuos forestoindustriales. Después, se presentarán las definiciones de desarrollo sostenible, sostenibilidad energética y bioenergía sostenible que servirán como base para esta investigación. También se desarrollarán los temas de los impactos de la bioenergía y la evaluación de la sostenibilidad de la bioenergía. Por último, se explicará la metodología del ACV y sus fases, es decir, la definición de objetivos y alcance, el análisis de inventario, la expansión del sistema y asignación, la evaluación de impactos y la interpretación de resultados.

3.1. Bioenergía

Se iniciará abordando la definición de bioenergía, seguido de las fuentes de biomasa y la clasificación de los biocombustibles. Posteriormente, se expondrán las estadísticas de la generación de energía a partir de la bioenergía y las estimaciones de lo que podría generarse en el futuro.

3.1.1. Definición

La bioenergía es toda aquella energía derivada de los biocombustibles, los cuales son material combustible derivado de la biomasa (FAO, n.d.-a; UNEP, 2009). Por su parte, la biomasa se define como la materia orgánica originada en un proceso biológico utilizable como fuente de energía. La biomasa es un recurso renovable de gran interés en la actualidad y es la fuente renovable de energía más utilizada en el mundo (Fernández et al., 2015).

3.1.2. Fuentes de biomasa

Según el origen de la biomasa, esta se puede clasificar en fuentes primarias o secundarias. Las fuentes primarias son aquellas en las que la biomasa se obtiene específicamente para fines energéticos (p. ej. cultivos energéticos). Mientras tanto, las fuentes secundarias son los residuos generados en explotaciones agrícolas, forestales, ganaderas, así como los residuos de origen orgánico generados por las industrias (Tauro et al., 2016) y asentamientos humanos (Fernández et al., 2015).

3.1.3. Clasificación de los biocombustibles

De acuerdo con su estado físico, los biocombustibles pueden clasificarse en líquidos (p. ej. bioetanol y biodiésel), gaseosos (p.ej. biogás) o sólidos (p. ej. pellets) (Ganduglia et al., 2009). Esta diversidad de tipo de biocombustibles permite que sus aplicaciones sean diversas (FAO, n.d.-a), Así, pueden ser utilizados para la calefacción a partir de biocombustible sólido, la generación de electricidad a partir de biocombustible gaseoso o para el sector del transporte a través del uso de combustible líquido (FAO, n.d.-a; IEA Bioenergy, 2009), por mencionar algunos ejemplos.

Por otra parte, los biocombustibles también se clasifican en tres categorías: primera, segunda, y tercera generación. Los biocombustibles de primera generación son aquellos obtenidos a partir de cultivos en tierra que también tienen usos alimentarios (p. ej. maíz, caña de azúcar, trigo, aceite de palma). Los pertenecientes a la segunda generación son aquellos que son obtenidos de fuentes diferentes a los cultivos destinados a la alimentación, principalmente se trata de residuos agrícolas, forestales, madera, entre otros. Los combustibles de tercera generación, son aquellos que no provienen de cultivos en suelo, es decir, cultivos de algas (UNEP, 2009).

3.1.4. Estadísticas

De acuerdo con lo publicado por la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) durante el año 2018 a nivel mundial se generaron 1,327.13 Mtoe a partir de bioenergía, lo cual representaba el 10.2% de la energía primaria consumida a nivel mundial al año (IEA Bioenergy, 2020). El tipo de biomasa a partir de la cual se obtenía la energía provenía principalmente de madera, residuos agrícolas y municipales (IEA Bioenergy, 2020).

3.1.5. Estimaciones

Para el año 2050, se estima que el potencial de la biomasa para la generación de energía puede alcanzar 1500 EJ/año, sin tomar en cuenta restricciones relacionadas con aspectos de sostenibilidad. Los aspectos de sostenibilidad a los que se hace referencia son de índole ambiental (p. ej. cambio de uso de suelo) y social (cultivo para biocombustibles vs cultivo para alimentación). Si se toman en cuenta dichos aspectos, entonces la estimación del potencial de la generación de bioenergía es de entre 200 y 500 EJ/año. Por otro lado, se proyecta que para el mismo año la demanda energética será de entre 600 y 1000 EJ, para lo cual se estima que la biomasa podrá contribuir entre un cuarto y un tercio a la futura matriz energética global (IEA Bioenergy, 2009). En cuanto a la bioenergía proveniente de

la biomasa forestal, sin restricciones de sostenibilidad la generación de energía se estima entre 30 y 150 EJ/año. Sin embargo, tomando en cuenta las restricciones de sostenibilidad, la energía generada a partir de residuos forestales, de agrícolas y residuos orgánicos municipales se estima, en promedio, en 100 EJ/año para 2050 (IEA Bioenergy, 2009). En un estudio diferente, para 2050, se reportó una estimación de producción de energía de alrededor de 28 EJ proveniente de biomasa forestal residual, de los cuales el 39% (11 EJ) sería producido exclusivamente a partir de residuos forestoindustriales (Eisentraut, 2010; Smeets & Faaij, 2007).

3.1.6. Bioenergía a partir de residuos forestoindustriales

En esta sección, se presentará la información más relevante asociada a la bioenergía producida a partir de residuos forestoindustriales. Se abordará la definición de residuos forestoindustriales; estadísticas sobre su generación y distribución a nivel nacional; y los impactos ambientales, sociales y económicos que ocasionan. Se procederá a describir los distintos tipos de biocombustibles que pueden producirse a partir de este tipo de residuos y, para finalizar, se detallará sobre los pellets de madera.

3.1.6.1. Residuos forestoindustriales

Los residuos forestoindustriales son aquellos que son generados como resultado de las actividades llevadas a cabo en las industrias de la transformación de la madera (Beaumont-Roveda, 1994; Vallesi et al., 2012). En general, se estima que, tras la fase de elaboración, sólo el 50% del árbol original se transforma en madera mientras que el resto se convierte en residuos (FAO, 2019), si bien cabe mencionar que dicho porcentaje puede ser mayor o menor en función de la tecnología que sea utilizada. De acuerdo con estadísticas de México, en 2012 la generación de residuos de aserríos fue de 728,846 t/a y, como se puede observar en la Figura 1, los principales estados generadores fueron Durango, Chihuahua y Oaxaca (SEMARNAT, 2020).

La acumulación de residuos en las industrias madereras puede obstaculizar el desarrollo del proceso productivo y convertirse en un problema. Como resultado, en algunas ocasiones los residuos son vendidos o regalados, pero en otros casos son enviados a rellenos sanitarios, a vertederos y/o son incinerados de manera incontrolada (Beaumont-Roveda, 1994). Los impactos ambientales de la acumulación de residuos forestoindustriales representan un riesgo de incendio y de propagación de plagas y enfermedades. Por otro lado, el dióxido de carbono contenido en la materia orgánica es liberado a la atmósfera como resultado de la descomposición de ésta, además de otros gases contaminantes

emitidos como resultado de la pirólisis de baja temperatura provocadas por las altas temperaturas en las pilas de residuos (Álvarez-Godoy et al., 2001). También la lixiviación producida en las pilas de residuos es fuente de contaminación de cuerpos de agua (Beaumont-Roveda, 1994). A mayor escala, tales impactos causan la degradación del ecosistema y la pérdida de servicios ambientales (Adu et al., 2014; INECC, n.d.).

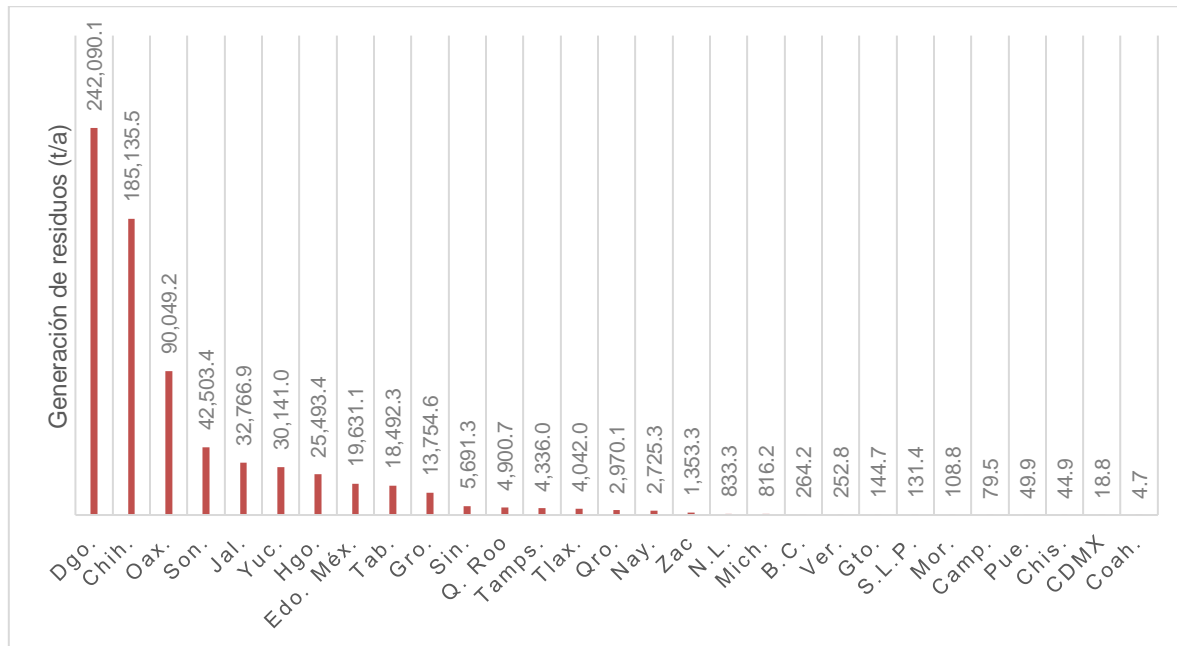


Figura 1. Generación de residuos forestoindustriales por estado (t/a) durante 2012. Elaboración propia con información del Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos 2020. Los estados que no cuentan con información fueron excluidos de esta gráfica

Los impactos ambientales causados por la deficiente gestión de residuos forestoindustriales, a su vez, provocan afectaciones sociales y económicas asociadas al aprovechamiento de los recursos forestales. Los impactos sociales se deben a la pérdida de recursos naturales que se obtienen del bosque como hongos, frutos, plantas, animales, fibras, material para construcción, agua, combustible, etc. (CONAFOR, 2015). Adicionalmente, se tienen impactos a la salud por la proliferación de hongos (Álvarez-Godoy et al., 2001). En cuanto a las afectaciones económicas, éstas se ven reflejadas en pérdida de empleos y ganancias debido a la pérdida de los recursos naturales que pueden ser utilizados como materias primas en procesos productivos (CONAFOR, 2015). En conclusión, la gestión inadecuada de residuos forestoindustriales incrementa el riesgo de ocurrencia de diversos impactos ambientales, sociales y económicos.

3.1.6.2. Biocombustibles a partir de residuos forestoindustriales

El aprovechamiento de la bioenergía presente en la biomasa de la madera, también conocida como dendroenergía, es una alternativa para valorizar los residuos forestoindustriales. Incluso, se ha indicado que esta alternativa podría ser especialmente beneficiosa para los países en desarrollo, debido que esta alternativa representa una oportunidad para impulsar el desarrollo del sector forestal; contribuir a reducir las importaciones de combustible; y proveer beneficios macroeconómicos. Paralelamente, permitiría aumentar la autosuficiencia energética a través del aprovechamiento de fuentes locales y proporcionar beneficios microeconómicos, con lo cual contribuiría a la reducción de la pobreza (Trossero, 2002). A nivel nacional, la Secretaría de Energía reportó, a través del Atlas Nacional de Biomasa, que el potencial energético a partir de estos residuos es de 13,897 TJ/a (SEMARNAT, 2020; SENER, 2013).

El aprovechamiento energético de los residuos forestoindustriales puede llevarse a cabo de diversas maneras. Por un lado, los residuos pueden ser utilizados directamente como combustible para aplicaciones domésticas para generar calor o industriales para generar calor y electricidad. Sin embargo, el uso directo de los residuos tiene la desventaja de que estos presentan una baja densidad energética. Por otro lado, los residuos pueden ser sometidos a procesos de conversión de la biomasa con el fin de producir biocombustibles con mayor densidad energética y favorecer características particulares (Koopmans & Koppejan, 1997; Murphy et al., 2007).

Las características de la madera permiten obtener biocombustible líquido, gaseoso y sólido. Como biocombustible líquido se obtiene bioetanol, a partir de la fermentación de la biomasa, y es utilizado para el sector del transporte. En cuanto a los biocombustibles gaseosos se puede obtener gas de síntesis, a través de los procesos de gasificación o pirólisis, o biogás a partir de la biodigestión. Estos biocombustibles pueden utilizarse para generar calor o calor y electricidad. En cuanto a los biocombustibles sólidos, se pueden obtener pellets o briquetas a través a procesos de densificación de la biomasa. Al igual que en el caso anterior, estos pueden ser usados para generar calor o calor y electricidad (cogeneración). Los biocombustibles gaseosos y sólidos pueden utilizarse como alternativa para la sustitución de los combustibles fósiles por parte del sector industrial (Canales et al., 2012; Jiménez, 2016; Patiño & Smith, 2008; Pu et al., 2017). Específicamente, se ha reportado que el biocombustible sólido podría ser utilizado inmediatamente para la generación de energía térmica en la industria (Tauro, 2018).

3.1.6.2.1. Pellets de madera

La pelletización es un proceso de densificación de la biomasa que surgió con el fin de mejorar algunas características de la biomasa para aplicaciones energéticas. Existen diferentes técnicas de pelletización, pero en general es un proceso de granulado por extrusión. En este proceso, la fricción genera calentamiento (70°C) que se utiliza para la aglomeración de las partículas (Canales et al., 2012; Rincón & Silva, 2015). Como resultado se obtienen los pellets con forma de cilindro y con altas densidades tanto energética como de carga (Canales et al., 2012).

Los pellets presentan varias ventajas en comparación con la combustión directa de los residuos. Por ejemplo, presentan una mayor densidad energética y mejores propiedades de combustión. También contienen un bajo contenido de humedad, lo cual los hace más resistentes ante la proliferación de microorganismos y la degradación causada por estos durante las etapas de manejo y almacenamiento. Asimismo, esta característica evita varias inconveniencias como la combustión incompleta del material, así como las emisiones y la baja eficiencia asociadas (Canales et al., 2012; Chen, 2009; Rincón & Silva, 2015).

Los pellets también presentan ventajas en comparación con combustibles fósiles. Entre las principales ventajas se encuentra su fácil producción y la característica de ser una fuente renovable de energía. Por esta razón, la utilización de pellets como biocombustible representa una oportunidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por el sector energético (Chen, 2009; Rincón & Silva, 2015).

Los pellets de madera han llamado la atención de las industrias debido a las ventajas energéticas y económicas que presentan. Tan sólo en 2011 se comerciaron un total de 4 millones de toneladas (Sikkema et al., 2011). Esta situación se ve beneficiada debido a su facilidad de transporte a través de largas distancias. Como resultado, el mercado de los pellets ha crecido en los últimos años y las tendencias estiman que entre los años 2015 y 2023 el mercado de pellets tendrá una tasa de crecimiento anual del 14.1% y alcanzará un valor de 20,073.1 millones de dólares (Fuel Oil News, 2015). Adicionalmente, se espera que aumente el mercado como resultado de la publicación de políticas, por parte de agencias ambientales, que incentiven el uso de pellets. Ejemplo de lo anterior es el mercado de pellets en la Unión Europea. Con base en las proyecciones del mercado, se ha indicado que todos los actores que forman parte de la cadena productiva se verán beneficiados del crecimiento de este mercado (Sikkema et al., 2011).

3.2. Bioenergía y sostenibilidad

Esta sección tiene por objetivo presentar el nexo entre la bioenergía y la sostenibilidad. Primero, se presentarán las definiciones de desarrollo sostenible, sostenibilidad energética y bioenergía sostenible. Posteriormente, se expondrán los impactos que se han reportado sobre proyectos de bioenergía en los cuales no se ha considerado la sostenibilidad. Luego, se abordará el tema de la evaluación de la sostenibilidad para proyectos de bioenergía. Y, por último, se mostrarán algunos marcos que han sido desarrollados para evaluar la sostenibilidad de proyectos de bioenergía.

3.2.1. Desarrollo sostenible, sostenibilidad energética y bioenergía sostenible

Para los fines de esta investigación se adoptará la definición de desarrollo sostenible presentada en el Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, en el cual se menciona que es un desarrollo en el que se asegura la satisfacción de las necesidades del presente sin comprometer la posibilidad de que las generaciones futuras satisfagan las suyas (ONU, 1987). Este concepto “se refiere a la integración de las metas de una calidad de vida elevada, la salud y prosperidad con justicia social y el mantenimiento de la capacidad de la Tierra para conservar la vida en toda su diversidad” (ISO, 2010, p. 4). Por su parte, la sostenibilidad está conformada por la interrelación de los aspectos ambiental, social y económico (Adams, 2006).

En el contexto de la energía, se ha descrito a la sostenibilidad energética como “fuentes de energía que no se agotan sustancialmente con el uso regular, no contaminan ni crean otros peligros para el ambiente en gran escala, no implican injusticia social o peligros para la salud de las personas” (Vallesi et al., 2012, p. 48). En el contexto de la bioenergía se define a la sostenibilidad como “una producción y utilización de biomasa sin dañar la naturaleza y manteniendo la capacidad de la naturaleza para producir biomasa de forma permanente camino en el futuro.” (Vallesi et al., 2012, p. 48).

De manera más extensa, se puede tomar como referencia la definición de bioenergía sostenible de Dale y colaboradores (2015). Primero se hace referencia al ámbito ambiental de la siguiente manera: “Desde el punto de vista ambiental, la sostenibilidad de la bioenergía se refiere a la interacción de las propiedades biofísicas y ecológicas (como las condiciones del suelo, la calidad y cantidad de aguas superficiales y subterráneas, la calidad del aire, la biodiversidad, las emisiones de GEI y la productividad) con factores de estrés ambiental, incluidas las actividades humanas a varias escalas. La sostenibilidad ambiental puede implicar un uso eficiente de los recursos naturales, como el agua y la

energía, y la eliminación o mitigación adecuada de los residuos. Las decisiones sobre las prácticas de manejo de la bioenergía y la combinación de materias primas deben considerar la variabilidad de las ecorregiones donde se produce la bioenergía.” (Dale et al., 2015, p. 436). En cuanto al criterio económico se menciona que “Económicamente, la sustentabilidad de la bioenergía abarca los costos relativos asociados con el ciclo de vida de una cadena de suministro completa y todos sus elementos. La sostenibilidad económica significa que los costos de cultivo, procesamiento, distribución y uso final para los compradores de bioenergía son económicamente competitivos con los de otras fuentes de energía y que se facilita la equidad social al tiempo que se evita la imposición de cargas injustas en cualquier lugar, región o demografía en particular grupo. Para los productores, los riesgos, costos y beneficios deben percibirse como competitivos o ventajosos en relación con las alternativas de uso de la tierra y energía. La sostenibilidad económica tiende a mejorar cuando se reduce el capital prestado, el flujo de efectivo es adecuado para cubrir los gastos operativos a tiempo y las ganancias aumentan.” (Dale et al., 2015, p. 436) Por último, se aborda el criterio social “Desde el punto de vista sociopolítico, la sostenibilidad de la bioenergía implica un acceso equitativo a los recursos energéticos y ecológicos y garantiza que la producción de bioenergía no priva a las personas del acceso a los alimentos básicos y cultivos de fibra ni perturba los medios de vida (por ejemplo, empleo, ingresos o seguridad), el respeto de los derechos de los trabajadores y condiciones de trabajo equitativos, con la seguridad como objetivo principal.” (Dale et al., 2015, p. 436).

3.2.2. Impactos de la bioenergía insostenible

La bioenergía presenta oportunidades diversas para contribuir al desarrollo sostenible. Por ejemplo, se ha señalado que puede contribuir a alcanzar la seguridad energética, cumplir los compromisos para la reducción de emisiones de GEI y los objetivos de desarrollo económico y social (Dehue et al., 2011; Díaz-Chavez et al., 2015; FAO, n.d.-b; Symons, 2012; UNEP, 2012; Vallesi et al., 2012). No obstante, si los proyectos de bioenergía no se gestionan apropiadamente pueden ocasionar impactos negativos en el ambiente y en la sociedad (Dehue et al., 2011; Vallesi et al., 2012).

Entre los riesgos de la bioenergía se encuentra la degradación del suelo, los cuerpos acuáticos y los ecosistemas (Ambuj & Katha, 2007; Vallesi et al., 2012). Principalmente, algunas de las preocupaciones corresponden a cambios indirectos en el uso de la tierra, impactos negativos en la biodiversidad, emisiones de GEI, uso del agua, competencia entre usos del suelo, y la posible influencia sobre los precios de los alimentos. Por otro lado, con

más frecuencia han surgido preocupaciones respecto a las condiciones de trabajo, la remuneración de los trabajadores y los posibles impactos sobre las comunidades circundantes, los cuales son aspectos que pueden resultar determinantes en la aceptación social de los proyectos (Elghali et al., 2007; Ramirez-Contreras & Faaij, 2018; Vallesi et al., 2012). Mientras tanto, desde el ámbito económico han surgido cuestionamientos sobre el costo operativo y de inversión, además de la internalización de externalidades causadas por los proyectos (Vallesi et al., 2012).

También han surgido preocupaciones sobre la sostenibilidad de la bioenergía producida a partir de biomasa forestal. Entre las preocupaciones se encuentran: la liberación de CO₂, la deforestación o sobreexplotación de los bosques, cambio de uso de suelo, las prácticas insostenibles de forestería, y problemas asociados a la justicia ambiental y gobernanza (Böttcher et al., 2013; Gamborg et al., 2014; Hitcher et al., 2016; Hudson, 2019; IEA Bioenergy, 2020; Schulze et al., 2012). No obstante, tales concepciones han sido aclaradas por la IEA y otros autores, como se muestra a continuación:

- Liberación de CO₂: el CO₂ emitido por la combustión de la biomasa forestal es de tipo biogénico, es decir, que es parte del ciclo corto del carbono, también conocido como ciclo biogénico del carbono, en el cual el CO₂ que es emitido a la atmósfera posteriormente es incorporado en la biosfera a través del crecimiento de nueva biomasa. Esto se diferencia de lo ocurrido en el caso del combustible fósil puesto que el CO₂ de este origen estuvo contenido durante millones de años y es liberado a la atmósfera de forma lineal, es decir, fuera del ciclo biogénico del carbono y ocasionando su acumulación (Figura 2) (Giuntoli et al., 2021; IEA Bioenergy, 2020).

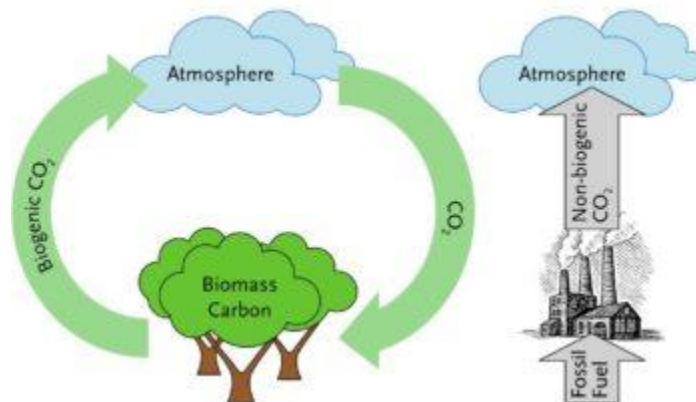


Figura 2. Generación de residuos forestoindustriales por estado (t/a) durante 2012. Elaboración propia con información del Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos 2020. Los estados que no cuentan con información fueron excluidos de esta gráfica

- Deforestación de los bosques, cambio de uso de suelo y prácticas insostenibles de forestería: muchos países cuentan con regulaciones que establecen que el manejo forestal debe llevarse a cabo de forma sostenible. Inclusive, existe regulación de la Unión Europea en la cual se condiciona que la biomasa destinada a generación de biocombustibles debe ser producida de forma sostenible. A través de dichas medidas se pretende mantener un balance entre la tala y la siembra de nuevos árboles con el fin de evitar la deforestación (Gamborg et al., 2014; Giuntoli et al., 2021; IEA Bioenergy, 2020).
- Preocupaciones de justicia ambiental y gobernanza: la gobernanza es parte fundamental de la sostenibilidad y la justicia ambiental con el fin de evitar o mitigar las afectaciones ocasionadas por el cambio climático y la minimización de posibles impactos negativos que puedan derivar del manejo forestal (Gamborg et al., 2014; Hudson, 2019; IEA Bioenergy, 2020). Sin embargo, no podemos omitir que la gobernanza de la sostenibilidad de la bioenergía es un problema perverso (wicked problem) debido al nivel de incertidumbre del sistema y, por lo tanto, no existe una forma única de analizar y resolver los conflictos asociados a esta (Giuntoli et al., 2021).

Cabe señalar que los aspectos que no están relacionados con la liberación de CO₂ no han tenido un papel protagónico en las discusiones en torno a los biocombustibles sólidos, lo anterior es debido a que la biomasa que se utiliza para la producción de pellets de madera proviene principalmente de residuos (Gamborg et al., 2014).

2.2.3. Evaluación de la sostenibilidad para bioenergía

Así, ha aumentado el interés sobre si los proyectos de bioenergía pueden ser sostenibles desde las distintas esferas del desarrollo sostenible (social, económico, ambiental). Esto debido a la falta de datos confiables sobre los impactos socioeconómicos de la producción y conversión de la biomasa (Díaz-Chavez et al., 2015). Como resultado, surge la necesidad de evaluar la sostenibilidad de los proyectos de bioenergía con un abordaje integral sobre las distintas operaciones que conllevan los proyectos de bioenergía y los riesgos que implican. Para lograrlo, es necesario tomar en cuenta los factores técnicos, económicos, ambientales y sociales (IEA Bioenergy, 2010; Vallesi et al., 2012). De tal manera, se podrá dotar a los tomadores de decisiones con información útil sobre los impactos que puede originar la bioenergía (Hayashi et al., 2014).

Es crucial que la bioenergía sea sostenible social, económica y ambientalmente para que logre contribuir al desarrollo sostenible (FAO, n.d.-a; GBEP, n.d.; IEA Bioenergy, 2009). Para determinar la sostenibilidad de los proyectos de bioenergía es necesario la evaluación de criterios ambientales, sociales y económicos, sin embargo, hasta la fecha no existe un consenso global que estandarice, a través de regulaciones obligatorias, el uso de criterios específicos (Buchholz et al., 2009; Commission, 2010; UABio, 2016). En la Tabla 1, se enlistan algunos ejemplos criterios que han sido propuestos:

Tabla 1. Extracto de criterios propuestos por cada dimensión de la sostenibilidad de acuerdo con (UABio, 2016)

Ambiental	Social	Economía
Protección del suelo	Participación	Sostenibilidad microeconómica
Gestión del agua	Cumplimiento de las leyes	Sostenibilidad macroeconómica
Protección de los ecosistemas	Seguridad alimentaria	Generación de empleo
Capacidad adaptativa a riesgos ambientales y cambio climático	Derechos de propiedad y uso	Estabilidad económica
Protección de especies	Respeto a los derechos humanos	
Cambio de uso de suelo	Cohesión social	
Balance energético	Respeto a las minorías	

Debido a la multidimensionalidad de la sostenibilidad, su medición no puede realizarse de forma directa y, por lo tanto, requiere de indicadores que permitan evaluar el desempeño referente a los criterios de cada una de las dimensiones que la conforman (IEA Bioenergy, 2009; Vallesi et al., 2012). Por lo tanto, es necesario el uso de indicadores que reflejen la viabilidad económica del mercado; el desempeño ambiental; y la aceptación social del proyecto (Elghali et al., 2007; IEA Bioenergy, 2010). Al tratarse de criterios de naturaleza distinta, es recomendable la inclusión de datos cuantitativos, así como cualitativos ya que estos permiten describir los impactos sociales y ambientales de los proyectos (Vallesi et al., 2012).

3.2.3.1. Marcos teóricos para la evaluación de la sostenibilidad de la bioenergía

En respuesta a la imperante necesidad de evaluar la sostenibilidad de proyectos de bioenergía, se han desarrollado diferentes marcos de referencia. Cabe señalar que dichos marcos no buscan determinar la sostenibilidad de un proyecto por sí mismo sino indicar cuál es la práctica más sostenible dentro de una gama de opciones. Para los fines de este trabajo, a continuación, describiré aquellos marcos que tienen una influencia directa sobre la metodología que será abordada posteriormente.

En 2011 la Global Bioenergy Partnership (GBEP, por sus siglas en inglés) desarrolló el consenso gubernamental internacional para definir la serie de 24 indicadores para evaluar la sostenibilidad de la producción y uso de la bioenergía (GBEP, 2020). Se presentan 8 indicadores por cada criterio de la sostenibilidad, los cuales se muestran en la Tabla 2. Los indicadores fueron seleccionados con base en la ciencia, practicidad y relevancia para la sostenibilidad. Estos se enfocan en la escala nacional/regional, el ciclo de vida de la bioenergía, y las dimensiones de la sostenibilidad (Hayashi et al., 2014; Ramirez-Contreras & Faaij, 2018).

Por su parte, Dale y colaboradores desarrollaron un marco que presenta una serie de indicadores que abarcan las dimensiones de la sostenibilidad (Tabla 3), pero se pretende que los indicadores específicos a utilizar sean seleccionados por los investigadores en función del contexto particular que se desee evaluar. En especial, se hace énfasis en considerar las condiciones locales y los agentes de interés involucrados. Otra característica fundamental que pretende este marco es que las mediciones de sostenibilidad puedan realizarse a lo largo de la cadena de suministro (Dale et al., 2013, 2015, 2018).

Mientras tanto, desde el ámbito empresarial surgió en 1997 la Iniciativa del Reporte Global, en inglés Global Reporting Initiative (GRI) como resultado de la convocatoria de la Coalición de Economías Responsables del Medio Ambiente (CERES) y el Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas (PNUMA). El GRI ha desarrollado la “Guía para la elaboración de un informe de sostenibilidad” como el primer mecanismo de rendición de cuentas para garantizar que las empresas cumplan con los principios de conducta ambiental responsable, el cual se amplió para incluir temas sociales, económicos y de gobernanza. Para la elaboración del reporte de sostenibilidad, la GRI ha desarrollado su propia serie de indicadores. A pesar de no estar enfocado exclusivamente en el ámbito de la bioenergía, es posible aplicar sus indicadores para la evaluación de la sostenibilidad de empresas de bioenergía y sus consumidores (GRI, n.d.). Cabe destacar que los indicadores para evaluar el criterio social han sido retomados por la Iniciativa de Ciclo de Vida de UNEP/SETAC, Life Cycle Initiative en inglés, como parte de su metodología para la evaluación del ciclo de vida social (S-LCA) (Lyfe Cycle Initiative, 2013). Dada la extensa cantidad de indicadores de la GRI y de la metodología S-LCA, en la Tabla 4 se muestra un extracto de los indicadores sociales que se incluyen en las Hojas Metodológicas de UNEP/SETAC para S-LCA. Cabe mencionar que para este caso los indicadores presentan

la posibilidad de evaluar distintos grupos de interés como, por ejemplo, la comunidad, los empleados, la sociedad, entre otros.

Tabla 2. Serie de indicadores de GBEP

Ambiental	Social	Economía
Indicador	Indicador	Indicador
Emisiones de GEI del ciclo de vida	Asignación y tenencia de la tierra para nueva producción de bioenergía	Productividad
Calidad del suelo	Precio y oferta de una canasta alimentaria nacional	Balance energético neto
Niveles de aprovechamiento de los recursos madereros	Cambio en ingresos	Valor agregado bruto
Emisiones de contaminantes atmosféricos no GEI	Empleos en el sector de la bioenergía	Cambio en el consumo de combustibles fósiles y uso tradicional de biomasa
Uso del agua y eficiencia	Cambio en tiempo no pagado invertido por mujeres	Formación y recalificación de la población activa
Calidad del agua	Bioenergía usada para ampliar el acceso a servicios modernos	Diversidad energética
Diversidad biológica en el paisaje	Cambio en la mortalidad y tasas de enfermedades atribuibles a humos en espacios cerrados	Infraestructura y logística para la distribución de bioenergía
Uso de suelo y cambio de uso de suelo relacionado a la producción de materia prima bioenergética	Incidencia de lesiones, enfermedades y muertes	Capacidad y flexibilidad del uso de bioenergía

Tabla 3. Serie de indicadores de Dale y colaboradores

Ambiental		Social		Economía	
Categoría	Indicador	Categoría	Indicador	Categoría	Indicador
Calidad del suelo	Carbón orgánico total	Bienestar social	Empleo	Rentabilidad	Retorno de la inversión
	Nitrógeno total		Ingreso familiar		Valor presente neto
	Fósforo extraíble		Días laborales perdidos por lesiones		Comercio
	Densidad aparente				
Calidad y cantidad de agua	Concentración de nitrato en arroyos	Seguridad energética	Seguridad alimentaria		
	Concentración de fósforo total en arroyos		Seguridad energética -		
	Concentración de sedimento suspendido en arroyos	Comercio exterior	Volatilidad del precio del combustible		
	Concentración de herbicidas en arroyos		Términos de intercambio		
	Flujo máximo de tormenta	Conservación de recursos	Volumen de comercio		
	Flujo mínimo de base		Agotamiento de recursos energéticos no renovables		
	Uso consuntivo del agua		Retorno de la inversión en energía fósil		
Emisiones de GEI	Emisiones de CO ₂ e	Aceptación social	Opinión pública		
Biodiversidad	Presencia de taxones de especial preocupación		Transparencia		
	Área del hábitat de los taxones de especial preocupación		Participación efectiva de agentes de interés		
Productividad	Productividad primaria neta superficial		Riesgo de catástrofe		

Tabla 4. Serie de indicadores de UNEP/SETAC incluyendo indicadores GRI

Social		
Categoría de agente de interés	Subcategoría	Indicador
Trabajador	Libertad de asociación y negociación colectiva	General: Evidencia de restricciones sobre la libertad de asociación y negociación colectiva
		Específico: Operaciones identificadas en las que el derecho a ejercer la libertad de asociación y negociación colectiva puede estar en riesgo significativo, y acciones tomadas para apoyar estos derechos
	Trabajo infantil	General: Porcentaje de niños trabajando por país y sector
		Específico: Operaciones identificadas por tener un riesgo significativo de incidentes de trabajo infantil, y medidas tomadas para contribuir a la eliminación del trabajo infantil
	Salario justo	General: salario mínimo por país
		Específico: Pago regular y documentado de los trabajadores
	Jornada laboral	General: Horas de trabajo excesivas
		Específico: Comunicación clara de los arreglos sobre las horas de trabajo y horas extra
	Trabajo forzado	General: Porcentaje de trabajo forzado por región
		Específico: Operaciones identificadas por tener un riesgo significativo por accidentes de trabajo forzado o compulsivo, y medidas tomadas para contribuir a la eliminación de trabajo forzado o compulsivo
	Equidad de oportunidades/ Discriminación	General: Tasa de participación de las mujeres en la fuerza laboral por país
		Específico: Relación entre el salario base de hombres y mujeres por categoría de empleado
	Salud y seguridad	General: Tasa de accidentes ocupacionales por país
		Específico: Programas de educación, capacitación, asesoramiento, prevención y control de riesgos establecidos para ayudar a los miembros de la fuerza laboral, sus familias o miembros de la comunidad con respecto a enfermedades graves.
Beneficios sociales/ Seguridad social	General: Gasto en seguridad social por país y ramas de la seguridad social (p. Ej., Atención médica, enfermedad, maternidad)	
	Específico: Beneficios proporcionados a los empleados de tiempo completo que no se proporcionan a los empleados temporales o de medio tiempo, por operaciones principales	

Categoría de agente de interés	Subcategoría	Indicador
Comunidad local	Acceso a recursos materiales	General: Niveles de uso industrial del agua
		Específico: La organización cuenta con un sistema de gestión ambiental certificado
	Acceso a recursos inmateriales	General: Niveles de transferencia de tecnología
		Específico: Presencia/solidez de iniciativas de educación comunitaria
	Deslocalización y migración	General: Migrantes internacionales como porcentaje de la población
		Específico: Número de individuos que se reestablecen que pueden ser atribuidos a la organización
	Herencia cultural	General: Herencia cultural bajo necesidad urgente de salvaguarda
		Específico: Solidez de las políticas vigentes para proteger el patrimonio cultural
	Respeto por los derechos indígenas	General: Cuestiones de derechos humanos enfrentadas por gente indígena
		Específico: Respuesta a cargos de discriminación contra miembros indígenas de la comunidad
	Involucramiento de la comunidad	General: Libertad de reunión pacífica y asociación
		Específico: Apoyo organizacional para iniciativas comunitarias (horas de voluntariado o financiero)
	Empleo local	General: Estadísticas de desempleo por país
		Específico: Porcentaje de mano de obra contratada localmente
Condiciones de vida seguras y saludables	General: Carga de enfermedad por país	
	Específico: Esfuerzo de gestión para minimizar el uso de sustancias peligrosas	

3.3. Características de la metodología Análisis de Ciclo de Vida

A partir del reconocimiento de la importancia de los posibles impactos ambientales asociados a los productos, ha aumentado el interés en el desarrollo de métodos para comprender mejor y reducir dichos impactos. Como resultado surgió el Análisis de Ciclo de Vida, la cual ha sido reconocida como una de las metodologías más adecuadas para evaluar el desempeño ambiental de un producto o un servicio (Aranda & Zabalza, 2010). En este punto cabe aclarar que el ciclo de vida de un producto es entendido como la secuencia de actividades asociadas a un producto que van desde la producción de las materias primas, la manufactura, la distribución, el uso hasta la disposición, incluyendo todo el transporte, que interviene en cada paso o causado por la existencia del producto (Caínzos et al., 2002). Dicho lo anterior, el ACV es una investigación y evaluación de los impactos ambientales potenciales (negativos y positivos) causados por un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida a partir de información sobre los recursos consumidos por unidad funcional definida, por ejemplo, por cantidad de producto o residuos que se generan (Figura 3) (Aranda & Zabalza, 2010; Caínzos et al., 2002; Gómez & Gómez, 2013). Una de las funciones de esta metodología es poder comparar un amplio rango de impactos ambientales y sociales que pueden estar asociados a los productos y servicios con el fin de poder escoger aquella opción o producto que sea menos perjudicial (Caínzos et al., 2002).

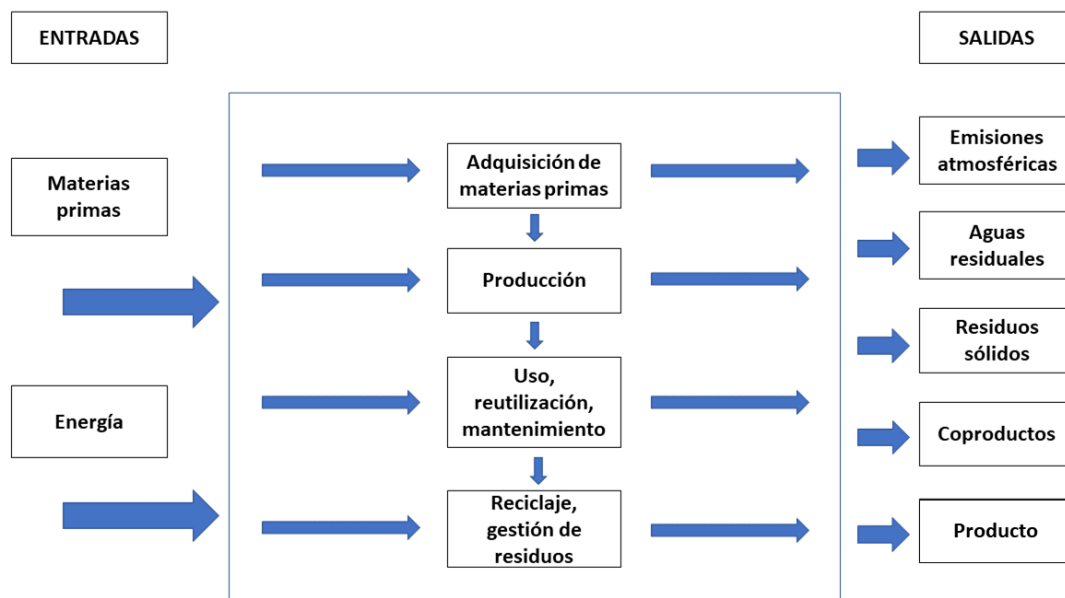


Figura 3. Representación esquemática del ACV (Caínzos et al., 2002)

A partir de la evolución del ACV a lo largo del tiempo, han surgido características que han propiciado su aplicación alrededor del mundo y en sectores distintos. Para empezar, esta metodología se encuentra homologada en las normas ISO 14040:2007 (Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia) e ISO 14044:2007 (Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. Requisitos del ciclo de vida). Por otro lado, el ACV presenta beneficios como los siguientes: permite identificar oportunidades de mejora del desempeño ambiental de productos; aporta información para los tomadores de decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales y no gubernamentales; y genera oportunidades de marketing (Aranda & Zabalza, 2010). Además, la aplicaciones del ACV se han diversificado y aplicado en diversos sectores, entre las que se encuentran por ejemplo: las actividades forestales, opciones de reciclaje y alternativas de sustitución de combustibles fósiles (Elías et al., 2012; Klein et al., 2015). Aunado a lo anterior, las aplicaciones pueden estar orientadas al desarrollo y mejora del producto, la planeación estratégica, la formulación de políticas públicas, el marketing, etc. Así, el ACV se ha convertido en una importante herramienta de gestión medioambiental para alcanzar la ecoeficiencia (Aranda & Zabalza, 2010).

De acuerdo con lo establecido en las normas ISO mencionadas anteriormente, el marco metodológico del ACV está conformado por cuatro fases: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto, e interpretación (Figura 4). Cabe mencionar que las fases son parte de un proceso iterativo en el cual los resultados son evaluados y refinados. En las siguientes secciones, describiré las características de cada una de las fases.

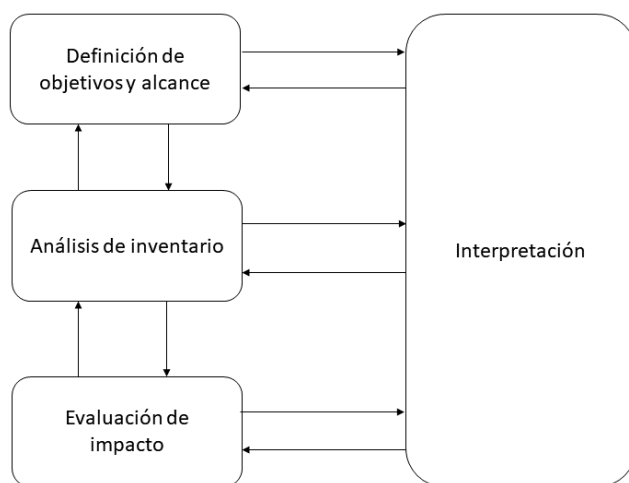


Figura 4. Representación esquemática de la metodología ACV (Puig et al., 1999)

3.3.1. Definición de objetivos y alcance

En la primera fase se inicia por definir el objetivo del ACV a partir del contexto que se desea abordar y con base en este se define el enfoque. La definición de enfoque se realiza en función a:

- Definición de la unidad funcional: es una descripción de la función o servicio para el cual se realiza la evaluación. También es la base para determinar el flujo de producto al cual se escala la recolección de información en la fase del análisis de inventario.
- Definición del sistema: se deciden cuales actividades y procesos forman parte del ciclo de vida del producto que es estudiado.
- Selección de los parámetros de evaluación: se eligen cuáles impactos desean evaluarse (p.ej. el calentamiento global, la acidificación, el deterioro de la capa de ozono, etc.) (Romero, 2012).
- Selección de los límites geográficos y temporales
- Definición de la perspectiva: decidir si debe tratarse de un estudio consecuencial que evalúe los impactos que pueden esperarse como una consecuencia de elegir una alternativa u otra, o un estudio atribucional que evalúe los impactos que están particularmente asociados con la actividad estudiada (Hauschild, 2018).

3.3.2. Análisis de inventario

En esta fase se lleva a cabo la recolección de información sobre los flujos en términos de entradas (p.ej. materias primas) y las salidas (p. ej. residuos y emisiones) del sistema de producción. En este análisis se incluyen todos los procesos que fueron identificados y seleccionados en la delimitación del sistema realizado en la fase anterior. Los flujos son escalados de acuerdo con el flujo de referencia del producto definido como la unidad funcional. Como producto de esta fase se obtiene el inventario del ciclo de vida, el cual está conformado por un listado de los flujos de materia y energía del sistema de producción relacionado a la función descrita en la unidad funcional (Hauschild, 2018).

3.3.3. Evaluación de impactos

A partir de la información incluida en el inventario de ciclo de vida, durante la evaluación de impactos los datos sobre los flujos físicos e intervenciones en el sistema del producto son traducidas en impactos al ambiente usando conocimiento y modelos de las ciencias

ambientales. La evaluación de impactos debe estar conformada al menos por los siguientes elementos:

- Selección de las categorías de impacto que sean representativas de los parámetros que fueron elegidos en la definición del enfoque.
- Clasificación de los flujos del inventario asignándolos a las categorías de impacto de acuerdo con su contribución al impacto.
- Caracterización de los impactos potenciales de los flujos mediante modelos ambientales (Hauschild, 2018).

3.3.4. Interpretación

Los resultados del estudio son interpretados con el fin de responder la pregunta formulada como parte de la definición del objetivo. En la interpretación se toman en consideración los resultados del análisis de inventario y la caracterización de los elementos de la evaluación de impactos (Hauschild, 2018).

3.3.5. Expansión del sistema y asignación

Cuando el sistema a evaluar presenta multifuncionalidades, es decir, que se generan diversos productos de manera paralela, existen diferentes opciones para cuantificar los flujos de materia y energía. La opción más sencilla es dividir los procesos principales en subprocesos, sin embargo, esto no es posible en todos los casos. Otras opciones son, en orden de predilección de acuerdo con la jerarquía de la ISO 14044, la expansión del sistema y la asignación. La expansión del sistema es matemáticamente equivalente a la dotación de créditos por la evitación de impactos generados durante la producción. Cuando no sea posible llevar a cabo la expansión del sistema debe realizarse la asignación. Esta debe desarrollarse de acuerdo con las relaciones físicas causales entre los distintos productos, reflejando la manera en la que las cantidades de entradas y salidas son afectadas por cambios en la cantidad de productos obtenidos por el proceso o sistema. La asignación debe ser, preferentemente, de tipo másica, es decir, basada en los balances de masa del sistema, pero cuando esto no es posible, puede ser de tipo económica, la cual se basa en la proporción de los costos de los distintos productos fabricados. De esta manera, al producto de mayor costo se le asignarán los impactos equivalentes a su proporción en comparación con el costo del resto de productos fabricados (Bjorn et al., 2018).

IV. CRITERIO AMBIENTAL

4.1 Metodología

En la evaluación que se realizará en la presente investigación se comparará un escenario base en el cual la empresa cementera utiliza coque de petróleo como combustible para el horno de fundición de clínker, frente a un escenario alternativo hipotético en el que existe una simbiosis industrial entre una empresa maderera que produce pellets de madera a partir de sus residuos forestoindustriales y estos son utilizados por la empresa cementera para sustituir el uso del coque como combustible. La empresa maderera se encuentra en Durango, Durango y la empresa cementera en Torreón, Coahuila.

En esta sección se despliegan los detalles de la metodología del ACV ambiental en las siguientes secciones: definición del objetivo y el alcance, análisis de inventario, y evaluación de impactos.

4.1.1. Definición del objetivo y el alcance

El objetivo fue realizar un ACV comparativo para determinar los impactos ambientales potenciales del uso de pellets de madera frente al uso de coque de petróleo como combustible para la producción de clínker en la industria cementera. En este punto, cabe aclarar que el clínker es un producto intermedio en la producción del cemento. La función fue la generación de energía térmica en el horno de fundición para la producción de 1 t de clínker.

Respecto a la unidad funcional, en la literatura especializada sobre el uso de pellets de madera en aplicaciones térmicas industriales se reportan como las unidades funcionales más utilizadas las siguientes: 1 MJ (Ghafghazi et al., 2011; Wolf et al., 2016), 1 kWh (Hossain et al., 2016; Wolf et al., 2016), 1 GJ (Porsö & Hansson, 2014; Wang et al., 2017; Wolf et al., 2016), 1 m³ de pellets (Petersen Raymer, 2006; Valente et al., 2011; Wolf et al., 2016), 1 ton de pellets (Pa et al., 2011; Puettmann & Lippke, 2012; Sokka et al., 2011; Wolf et al., 2016). No obstante, en la literatura especializada en el uso de combustible alternativo en la industria cementera la unidad utilizada es la producción de 1 ton de clínker de cemento (Ammenberg et al., 2015; Boesch et al., 2009; Feiz et al., 2015a, 2015b; Georgiopoulou & Lyberatos, 2018; Güereca et al., 2015; Zhang & Mabee, 2016) o 1 ton de cemento (Hossain et al., 2017; Strazza et al., 2011). Dicho lo anterior, se decidió que la unidad funcional más adecuada para la presente investigación sería la producción de 1 ton de clínker de cemento

El alcance del estudio es de la cuna a la tumba tomando como punto de partida la extracción/refinación de la materia prima para la producción del combustible hasta su uso en el horno de fundición. Cabe mencionar que el alcance de la cuna a la tumba de esta investigación es relativo puesto que de ser absoluto debería iniciar desde la extracción de ambos combustibles y terminar en la disposición final de las cenizas tras la combustión. No obstante, los límites del sistema abarcan procesos que superan otros tipos de alcance como lo son de la puerta a la tumba o de la puerta a la puerta.

El escenario base es un sistema en el cual se utiliza coque de petróleo en la producción de clínker (Figura 5). De manera más específica, este escenario incluye las fases de refinación para la producción del coque de petróleo, la distribución de éste desde la refinería hasta la planta de cemento y la etapa de fundición del clínker de cemento en donde se utiliza el coque como combustible en el horno. Además, se incluyeron procesos “aguas arriba” del proceso de fabricación del clínker, es decir, la Minería para la extracción de minerales, el Transporte de los minerales a la planta de cemento, el Triturado de los mismos y la Fundición.

Mientras tanto, el escenario alternativo se caracterizó por el uso de pellets de madera, producidos a partir de residuos forestoindustriales, en la producción de clínker. Específicamente, en este escenario se incluyen las fases Forestal (derribo y limpieza de la madera en rollo, arrastre de la madera en rollo), el Transporte a la empresa Maderas y materiales San Mateo (MMSM), la Transformación de la madera (estibado, dimensionamiento y aserrado de la madera dimensionada), Pelletización de los residuos forestoindustriales, Distribución de los pellets, y el uso de los pellets en la etapa de Fundición para la producción de clínker (Figura 6). Al igual que en el escenario base, se incluyeron los procesos “aguas arriba” de la fabricación del clínker.

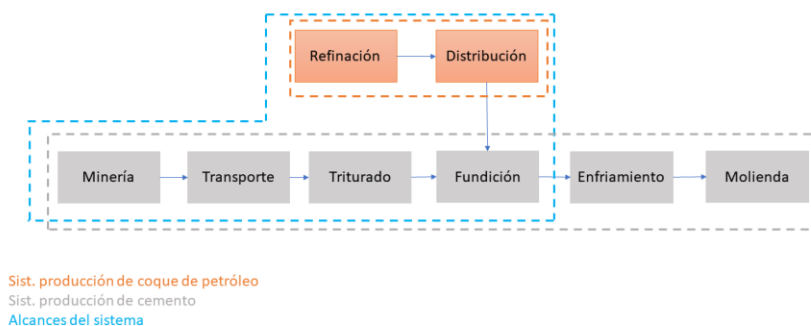


Figura 5. Escenario base (coque de petróleo)

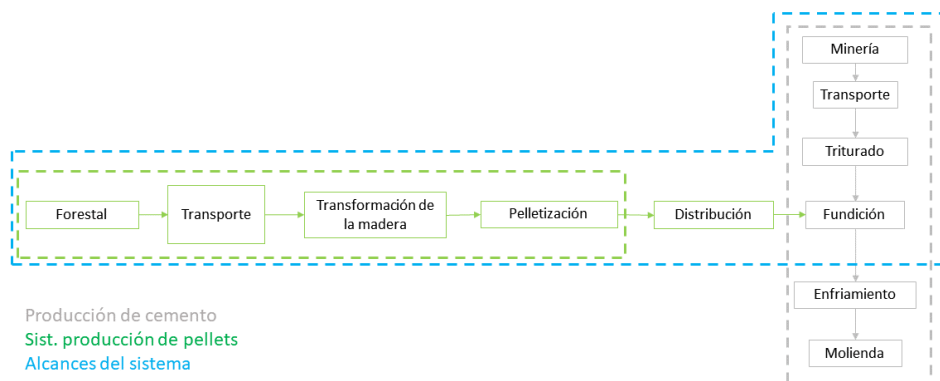


Figura 6. Escenario alternativo (pellets de madera)

Los impactos por evaluar en el ACV fueron, por un lado, los cuatro mínimos recomendados por (Wolf et al., 2016) para realizar ACV enfocados en dendroenergía (Cambio climático, Material particulado, Acidificación y Eutrofización) y otros cuatro que también suelen reportarse en la literatura de esta naturaleza como: Agotamiento de recursos abióticos, Ecotoxicidad, Toxicidad humana, y Agotamiento de la Capa de Ozono (Georgiopoulou & Lyberatos, 2018; Ghafghazi et al., 2011; Hossain et al., 2017; Sokka et al., 2011; Strazza et al., 2011). Adicionalmente, se decidió incluir la categoría de Material particulado puesto que en la literatura se ha reportado como uno de los impactos relevantes durante la manufactura y combustión de los pellets de madera (Musule et al., 2021; Padilla-Rivera et al., 2017; Saosee et al., 2020; Sgarbossa et al., 2020). Otra razón por la que se incluyó dicha categoría fue que la Ciudad de Torreón, sitio donde se ubica la planta de cemento que será utilizada para la presente modelación, presenta problemas de calidad del aire, principalmente por la concentración de material particulado, y se pretende comprobar si el uso de los pellets podría empeorar o mejorar dicha situación (INECC, 2020). Cabe mencionar que, tras evaluar los resultados obtenidos y tomando como base el Principio precautorio, se decidió que para las categorías de impacto que cuentan con más de una subcategoría se conservaría aquellas que mostrarán un mayor impacto (Cowell et al., 2002; Finnveden et al., 2009; Helia et al., 2004). Es decir, para la categoría de Eutrofización se utilizó la subcategoría de Agua dulce, mientras que para Ecotoxicidad se utilizó la subcategoría Terrestre, y para Toxicidad humana se utilizó la subcategoría de No cancerígena. En la Tabla 5 se presentan las características de cada categoría de impacto que fueron evaluadas.

Tabla 5. Características de las categorías de impacto

Categoría de impacto	Indicador	Descripción	Unidad
Acidificación	Potencial de Acidificación	Indicador del potencial de acidificación de suelos y agua debido a la liberación de gases como SO _x y NO _x (Hillege, n.d.).	kg SO ₂ -eq
Cambio Climático	Potencial de Cambio Climático	Indicador del potencial de Cambio Climático debido a la emisión de gases de efecto invernadero (Hillege, n.d.).	kg CO ₂ -eq
Agotamiento de recursos abióticos (recursos fósiles)	Potencial de Agotamiento de recursos abióticos	Indicador del agotamiento de reservas de combustibles fósiles (Hillege, n.d.).	kg aceite-eq
Eutrofización	Potencial de Eutrofización	Indicador del enriquecimiento de ecosistemas con elementos nutricionales, debido a la emisión de compuestos de nitrógeno o fósforo (Hillege, n.d.).	kg PO ₄ ³⁻ -eq
Ecotoxicidad	Potencial de Ecotoxicidad	Indicador del impacto en organismos debido a la emisión de sustancias tóxicas al ambiente (Hillege, n.d.).	1,4-DCB-eq
Toxicidad humana	Potencial de toxicidad humana	Indicador del impacto en la salud humana debido a la emisión de sustancias tóxicas al ambiente (Hillege, n.d.).	1,4-DCB-eq
Agotamiento de la capa de ozono	Potencial de Agotamiento de Capa de Ozono	Indicador de las emisiones a la atmósfera que causan la destrucción de la Capa de Ozono estratosférica (Hillege, n.d.).	kg CFC-11-eq
Material particulado	Incremento en partículas suspendidas de diferentes tamaños en el aire	Indicador de las partículas suspendidas extremadamente pequeñas originadas por procesos antropogénicos (Acero et al., 2016).	kg de material particulado
Ozono troposférico	Incremento en el ozono troposférico	Indicador de smog creado a partir del efecto de la luz solar, el calor, NO _x y compuestos orgánicos volátiles (Acero et al., 2016).	kg NO _x eq

El límite espacial es México, mientras que los temporales son los siguientes: para la producción de pellets es el año 2019 y para la producción de clínker de cemento a partir de coque de petróleo es el 2010, de acuerdo con los años de publicación de las fuentes de la información utilizada. Finalmente, la perspectiva será de tipo atribucional.

4.1.2. Análisis de inventario

Los datos del inventario fueron recabados a través de comunicación directa con la empresa MMSM para el escenario alternativo (García et al. Comunicación directa, 2020). En el caso del escenario base se utilizaron datos reportados por (Güereca et al., 2015) y cálculos propios. A continuación, se presentan los supuestos utilizados en general y los propios para cada escenario.

Supuestos generales:

- Se utilizará como fin de uso el horno de fundición de la planta de cemento de CEMEX en Torreón, Coahuila. Dicho horno permite el co-procesamiento de combustibles alternativos como se ha reportado en la literatura (Boesch et al., 2009; Güereca et al., 2015; Strazza et al., 2011).
- La cantera de donde se extrae el material pétreo para la producción de cemento se encuentra en el mismo predio que la planta de cemento.
- La distancia entre la cantera y la planta, las características del horno, y el mix eléctrico de la planta de cemento serán los mismos que lo reportado por (Güereca et al., 2015).

Supuestos utilizados para el escenario base:

- El horno de fundición es alimentado en su totalidad con coque de petróleo.
- El coque proviene en su totalidad de la refinería de Cadereyta, Nuevo León.
- El coque es transportado por tren de carga desde Cadereyta, N.L., hasta Torreón, Coahuila.
- Las emisiones de la combustión son las mismas que las reportadas por (Güereca et al., 2015).

Hechos utilizados para el escenario alternativo:

- La madera es extraída del bosque presente en el Ejido Ciénega de Caballos, Durango, en donde se lleva a cabo un manejo forestal sostenible. Este sitio se encuentra a 60 km de la empresa MMSM.

Supuestos utilizados para el escenario alternativo:

- Los pellets de madera son transportados en un camión de carga desde MMSM, en Durango, Durango, hasta la planta de cemento en Torreón, Coahuila.

- Las emisiones de combustión son las mismas que las reportadas por (Saleh & Abo-Elyazeed, 2017).

En las Tablas 6 y 7 se presentan los detalles de los datos recabados.

Tabla 6. Análisis de inventario Escenario base respecto a la unidad funcional.

Entradas				Salidas			
Flujo	Cantidad	Unidad	Referencia	Flujo	Cantidad	Unidad	Referencia
<i>Refinación del coque de petróleo</i>							
Crudo ligero	0.00088	m3	(Güereca et al., 2015)	Coque de petróleo	93	kg	(Güereca et al., 2015)
<i>Transporte del coque</i>							
Coque de petróleo	93	kg	(Güereca et al., 2015)	Coque de petróleo transportado	93	kg	(Güereca et al., 2015)
Transporte por tren	1151.8	tkm	Cálculo propio				
<i>Minería para cemento</i>							
Explosivos	0.0002	kg	(Güereca et al., 2015)	Caliza y arcilla	1.555	t	(Güereca et al., 2015)
Agua	0.0129	m3		Mineral de hierro	0.029	t	
Excavadora hidráulica	0.7522	m3					
<i>Transporte de material pétreo</i>							
Caliza y arcilla	1.555	t	(Güereca et al., 2015)	Caliza y arcilla transportada	1.555	t	(Güereca et al., 2015)
Mineral de hierro	0.029	t		Mineral de hierro transportado	0.029	t	
Transporte van	0.000031	tkm					
Transporte lorry	0.0129	tkm					
Transporte lorry	0.004	tkm					
<i>Triturado de material pétreo</i>							
Caliza y arcilla transportada	1.555	t	(Güereca et al., 2015)	Caliza y arcilla triturada	1.555	t	(Güereca et al., 2015)
Mineral de hierro transportado	0.029	t		Mineral de hierro triturado	0.029	t	
Transporte lorry	9.57	tkm					
Mix eléctrico	38.64	kWh					
Excavación cargador de dirección deslizante	0.7522	m3					
<i>Fundición</i>							
Electricidad	37.24	kWh	(Güereca et al., 2015)	TSP	1.90E-02	kg	(Güereca et al., 2015)
Coque transportado	93	t		SO2	5.05E-01	kg	
Caliza y arcilla triturado	1.555	t		Nox	1.40E+00	kg	
Mineral de hierro triturado	0.029	t		Co	5.67E-01	kg	
				THC	1.15E-01	kg	
				Cd	1.24E-06	kg	
				Hg	9.91E-04	kg	
				TI	1.45E-06	kg	
				DyFs	8.83E-13	kg	
				Sb	9.45E-05	kg	
				As	1.00E-05	kg	
				Ni	2.02E-05	kg	
				Pb	2.75E-04	kg	
				Cr	1.66E-04	kg	
				CO2	8.65E+02	kg	
			Clínker de cemento	1.00E+00	t		

Tabla 7. Análisis de inventario Escenario alternativo respecto a la unidad funcional

Entradas				Salidas				
Flujo	Cantidad	Unidad	Referencia	Flujo	Cantidad	Unidad	Referencia	
<i>Forestal</i>								
<i>Derribo y limpieza</i>								
Madera en rollo	32	m3	(Musule et al., 2022)	Madera en rollo cortada	32	m3	(Musule et al., 2022)	
Motosierra (gasolina)	9.5	L						
Motosierra (aceite de dos tiempos)	0.5	L						
<i>Arrastre de la madera en rollo</i>								
Madera en rollo cortada	32	m3	(Musule et al., 2022)	Madera en rollo a transportar	32	m3	(Musule et al., 2022)	
Grúa de arrastre	10	L						
<i>Transporte</i>								
Madera en rollo a transportar al aserradero	15.04	t	(Musule et al., 2022)	Madera en rollo base seca	15.04	t	(Musule et al., 2022)	
Distancia recorrida	60	km						
Camión tipo lanza de 32 t	962.4	tkm						
Camión tipo lanza de 32 t (diesel)	80	L						
<i>Transformación de la madera</i>								
<i>Estibado y dimensionamiento</i>								
Madera en rollo base seca	6.02	t	(Musule et al., 2022)					
Cargador frontal (diesel)	58.33	L						
Motosierra (gasolina)	0.57	L						
Motosierra (aceite de dos tiempos)	0.26	L						
<i>Aserrado de la madera en rollo dimensionada</i>								
Madera en rollo dimensionada, base seca	5.66	t	(Musule et al., 2022)					
Aserradero, máquina múltiple horizontal 1 y 2	273.8	kWh						
<i>Pelletización</i>								
<i>Pelletizado</i>								
Flujos de biomasa residual del aserradero, base seca	1.86	t	(Musule et al., 2022)	Pellets de madera a transportar	0.2	t	(Musule et al., 2022)	
Astilladora, ventilador horno y molino	387.82	kWh			CO2	1731.68		g/kg
Leña (secado), base seca	0.13	t			CO2	21.26		g/kg
					CH4	538.03		mg/kg
					NMHC	771.21		mg/kg
					PM2.5	3543.8		mg/kg
					EC	480.11		mg/kg
					OC	1612.47		mg/kg
<i>Distribución</i>								
Pellets de madera a transportar	0.2	kg	Cálculo propio	Pellets de madera a transportados	0.2	kg	Cálculo propio	
Camión tipo lanza de 32 t	254	tkm	Cálculo propio					
<i>Minería para cemento</i>								
Explosivos	0.0002	kg	Güereca et al., 2015	Caliza y arcilla	1.555	t	Güereca et al., 2015	
Agua	0.0129	m3			Mineral de hierro	0.029		t
Excavadora hidráulica	0.7522	m3						
<i>Transporte de material pétreo</i>								
Caliza y arcilla	1.555	t	Güereca et al., 2015	Caliza y arcilla transportada	1.555	t	Güereca et al., 2015	
Mineral de hierro	0.029	t			Mineral de hierro transportado	0.029		t
Transporte van	0.000031	tkm						
Transporte lorry	0.0129	tkm						
Transporte lorry	0.004	tkm						
<i>Triturado de material pétreo</i>								
Caliza y arcilla transportada	1.555	t	Güereca et al., 2015	Caliza y arcilla triturada	1.555	t	Güereca et al., 2015	
Mineral de hierro transportado	0.029	t			Mineral de hierro triturado	0.029		t
Transporte lorry	9.57	tkm						
Mix eléctrico	38.64	kWh						
Excavación cargador de dirección deslizante	0.7522	m3						
<i>Fundición</i>								
Electricidad	37.24	kWh	Güereca et al., 2015					
Pellets de madera transportados	0.20	kg	Cálculo propio					
Caliza y arcilla triturado	1.555	t	Güereca et al., 2015					
Mineral de hierro triturado	0.029	t						

4.1.3. Evaluación de impactos

Para realizar la evaluación de impactos se utilizó el software SimaPro, con la base de datos Ecoinvent 3.5. El método elegido fue ReCiPe Midpoint (E) puesto que cuenta con todas las categorías de impacto seleccionadas para el presente ACV y es útil para una escala global (Acero et al., 2016). Por otra parte, cabe mencionar que para el escenario alternativo se realizó una asignación del tipo másica del 30.9% a los impactos de las fases anteriores a la pelletización ya que, además de los pellets, la empresa produce otros productos de madera.

4.1.4. Asignación de impactos

Se decidió realizar una asignación másica como es recomendado en la literatura (Bjorn et al., 2018). La asignación aplicada a los impactos obtenidos en el escenario alternativo en las fases de Derribo y limpieza, Transporte, Estibado y dimensionamiento, y Aserrado de la madera dimensionada fue del 30%. Esto se debió a que el 30% de los productos generados en la empresa maderera son pellets de madera mientras que el 70% restante se trata de otro tipo de productos. También, se tomó la decisión de utilizar la asignación másica en vez de económica debido a que no se contó con la información suficiente. Cabe mencionar que los resultados de cada categoría de impacto se reportarán en términos absolutos mientras que los resultados de contribución se presentarán de forma absoluta y en porcentaje.

4.2 Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del ACV ambiental respecto a la unidad funcional, es decir, 1 t de clínker producida. Se presentarán los resultados por cada categoría de impacto y para cada escenario (Tabla 8). Además, se incluyen los resultados del análisis de contribución (Tablas 9 y 10).

Cambio climático

El escenario que tuvo mejor desempeño fue el alternativo puesto que genera 152.6 kg CO₂eq por ton de clínker producido, frente al escenario base que genera 946.3 kg CO₂ eq (Figura 7). Esto significa una diferencia de 84%, es decir, que la sustitución del combustible disminuiría la emisión de gases causantes del cambio climático (Tabla 8).

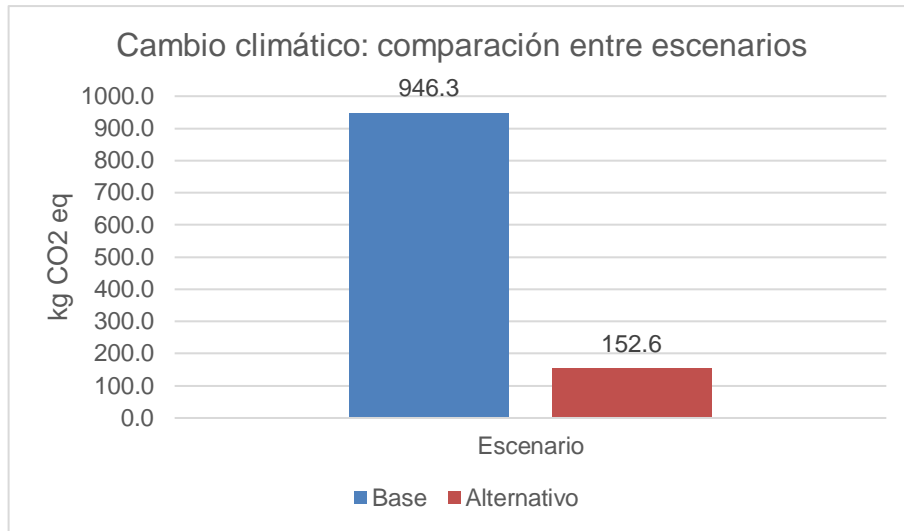


Figura 7. Comparación de escenarios respecto al Cambio climático

El proceso con la mayor contribución del escenario base fue la Fundición (95%), lo cual se debe a la fundición del coque (Figura 8). La emisión con mayor contribución al impacto total del escenario base fue el CO₂ (91%) debido a la liberación de este gas durante la combustión.

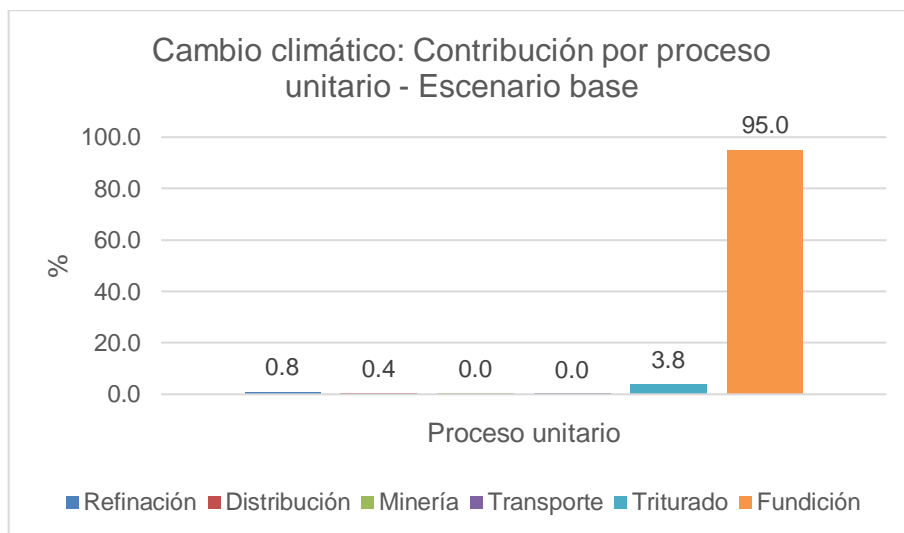


Figura 8. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto al Cambio climático

Mientras tanto, el proceso con la mayor contribución al escenario alternativo fue la Transformación de la madera (34%) (Figura 9), lo cual se debe al mix eléctrico mexicano. La emisión con mayor contribución al impacto total del escenario alternativo fue CO₂ (98%) debido a la generación de electricidad a partir de combustible fósil “aguas arriba”.

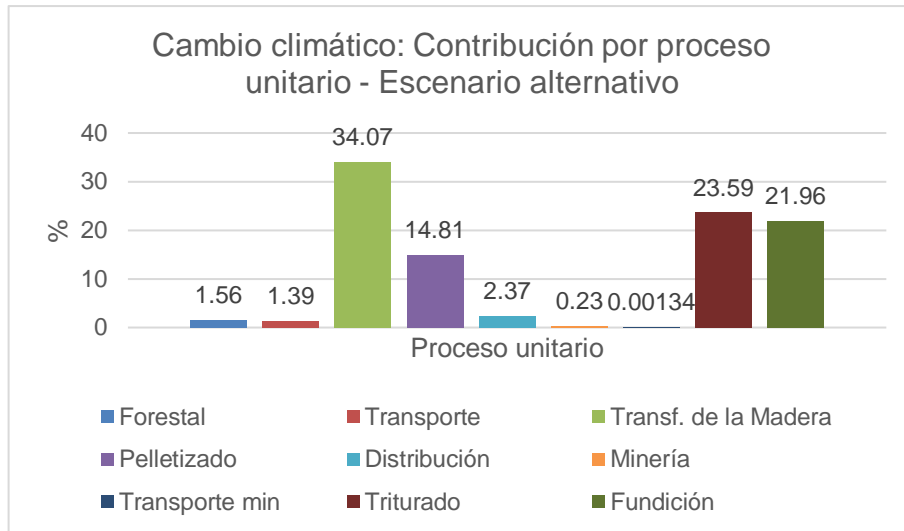


Figura 9. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto al Cambio climático

Agotamiento de la capa de ozono

El escenario de mejor desempeño es el escenario base, ya que produce $4,19E-05$ kg CFC11 eq, en comparación con el escenario alternativo que produce $1,83E-04$ kg CFC11 eq (Fig. 10). Esto significa una diferencia de -337%, es decir, reemplazar los combustibles aumentaría las emisiones de contaminantes que agotan la capa de ozono (Tabla 8).

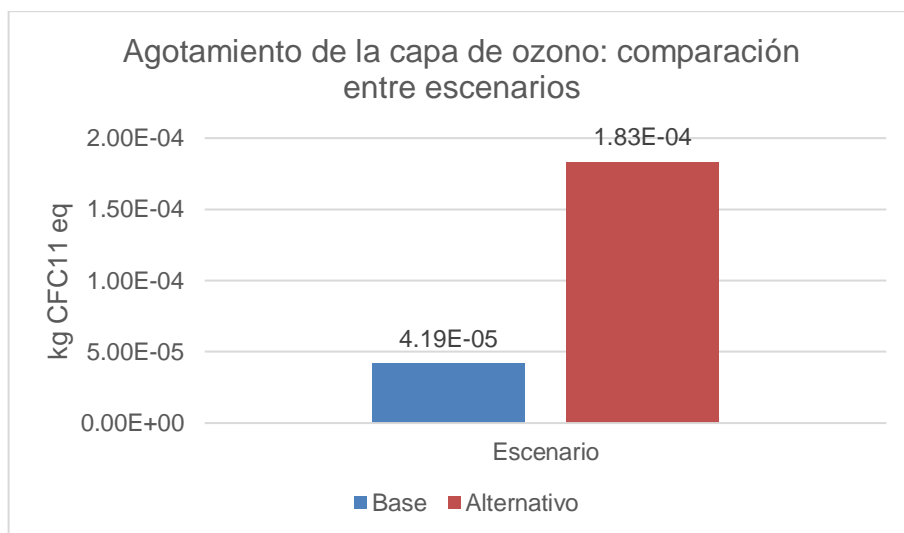


Figura 10. Comparación de escenarios respecto al Agotamiento de la capa de ozono

El proceso con mayor aporte del caso base es la refinación de petróleo (36%), debido a la producción de petróleo (Figura 11). Las emisiones que más contribuyen al impacto total del escenario de referencia son el metano, el bromotrifluoruro y el halón 1301 (35%).

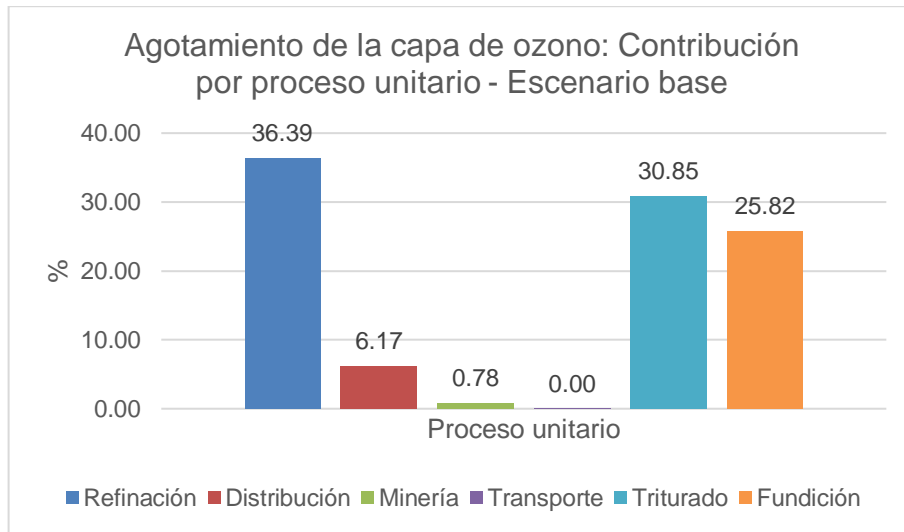


Figura 11. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto al Agotamiento de la capa de ozono

A su vez, el proceso con mayor aporte en el escenario alternativo fue la Transformación de la madera (58%), lo cual se atribuyó a la matriz eléctrica mexicana (Fig. 12). La emisión que tuvo la mayor contribución al efecto general del escenario alternativo fue el óxido de nitrógeno (93 %) debido a la generación de electricidad con combustibles fósiles aguas arriba.

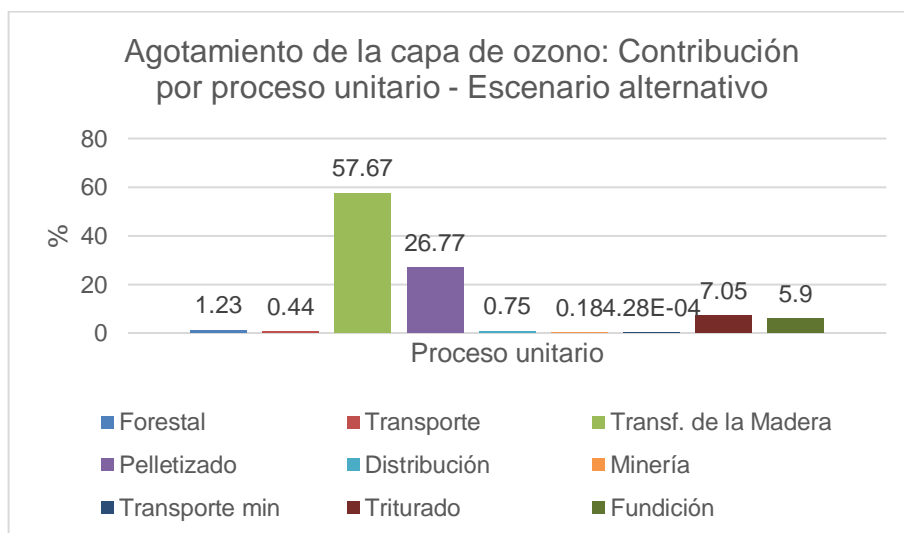


Figura 12. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto al Agotamiento de la capa de ozono

Ozono troposférico

El escenario de mejor desempeño es el escenario alternativo, que produce $4,20E-01$ kg NOx eq, en comparación con el escenario alternativo que produce $1,65E-00$ kg NOx eq (Figura 13). Esto quiere decir que la diferencia es del 75%, es decir, reemplazar el combustible reducirá las emisiones de contaminantes que provocan la formación de ozono terrestre (Tabla 8).

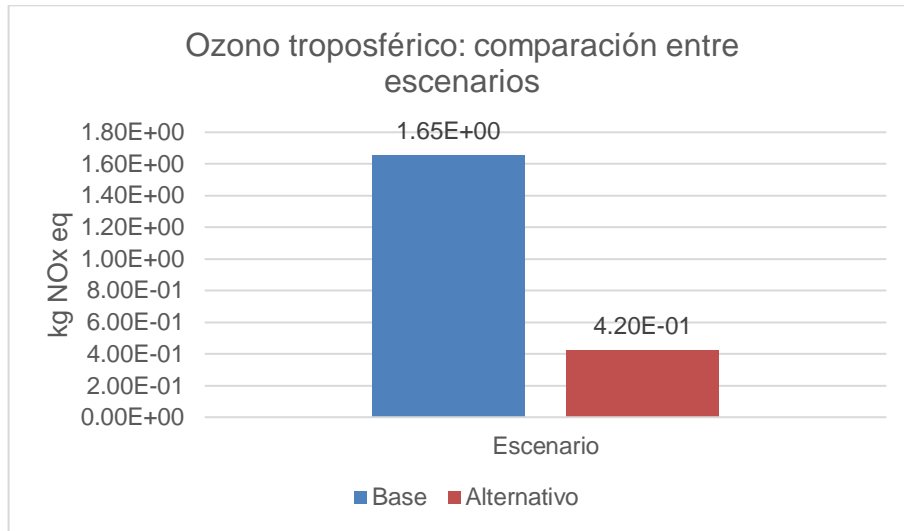


Figura 13. Comparación de escenarios respecto al Ozono troposférico

El proceso con mayor contribución del escenario base es Fundición (89%) (Figura 14). La emisión que más contribuyó al impacto global del escenario de referencia fueron los óxidos de nitrógeno liberados durante la combustión del coque (99,7%).

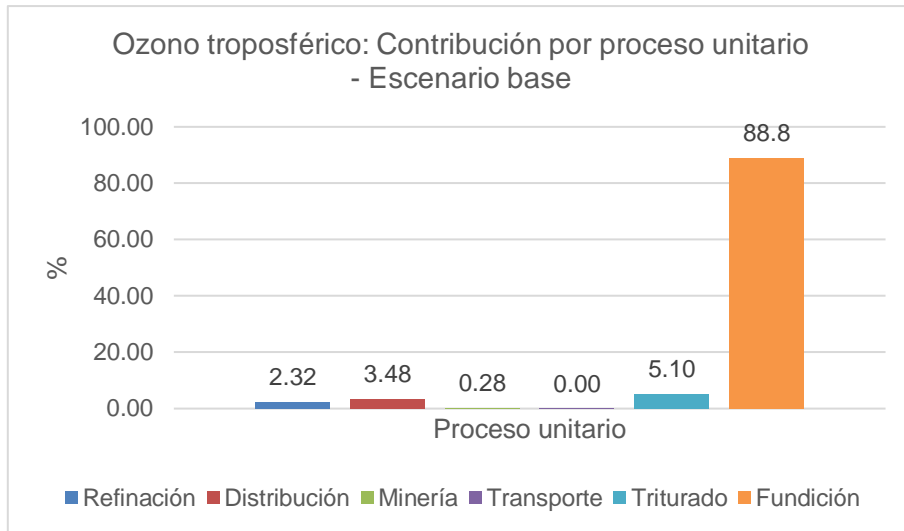


Figura 14. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto al Ozono troposférico

Por su parte, el proceso de mayor aporte en el escenario alternativo fue la Transformación de la madera (37%), el cual está asociado al consumo de combustible diésel (Figura 15). Las emisiones con mayor contribución al impacto total del escenario alternativo fueron los óxidos de nitrógeno (98%) emitidos durante la combustión del combustible diesel.

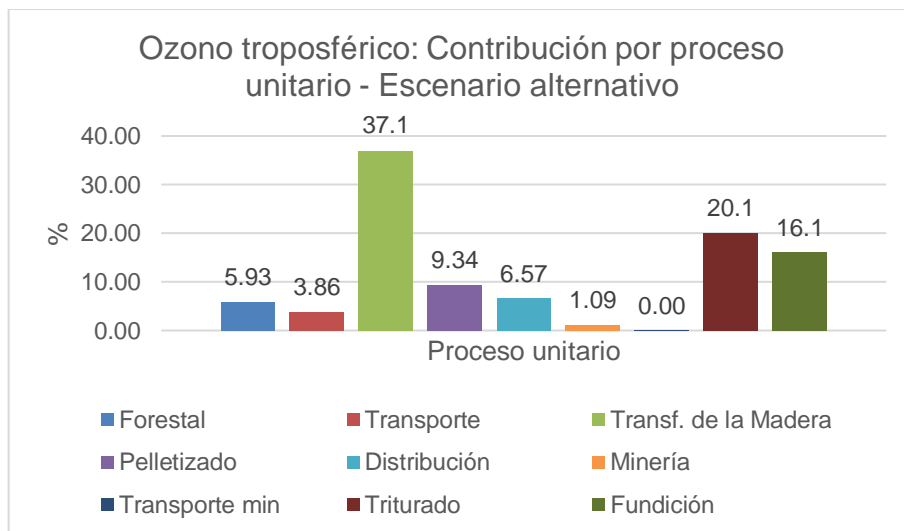


Figura 15. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto al Ozono troposférico

Material particulado

El escenario que tuvo mejor desempeño fue el base puesto que genera $9.45E-01$ kg PM_{2.5} eq, frente al escenario alternativo que genera $1.28E+00$ (Figura 16). Esto significa una

diferencia de -35%, es decir, que la sustitución del combustible aumentaría la emisión de material particulado a la atmósfera (Tabla 8).

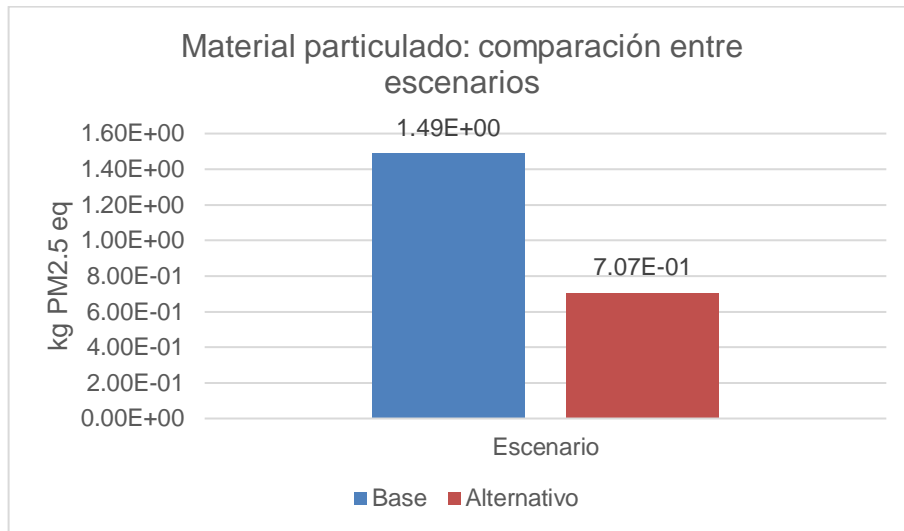


Figura 16. Comparación de escenarios respecto al Material particulado

El proceso con la mayor contribución del escenario base fue la Fundición (63%) (Figura 17). La emisión con mayor contribución al impacto total del escenario base fue el material particulado menor a 2.5 μm (53%) lo cual se debe a fundición del coque.

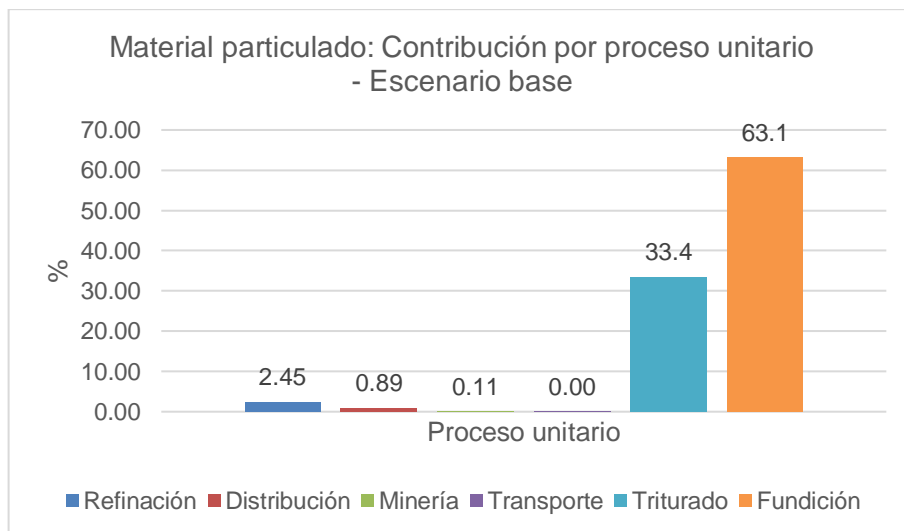


Figura 17. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto al Material particulado

Mientras tanto, el proceso con la mayor contribución al escenario alternativo fue el Pelletizado (40%), lo cual se debe al secado de la madera (Figura 18). La emisión con mayor contribución al impacto total del escenario alternativo fue el material particulado

menor a 2.5 µm (84%) debido a la combustión de residuos de madera para el secado de la madera utilizada para la producción de pellets.

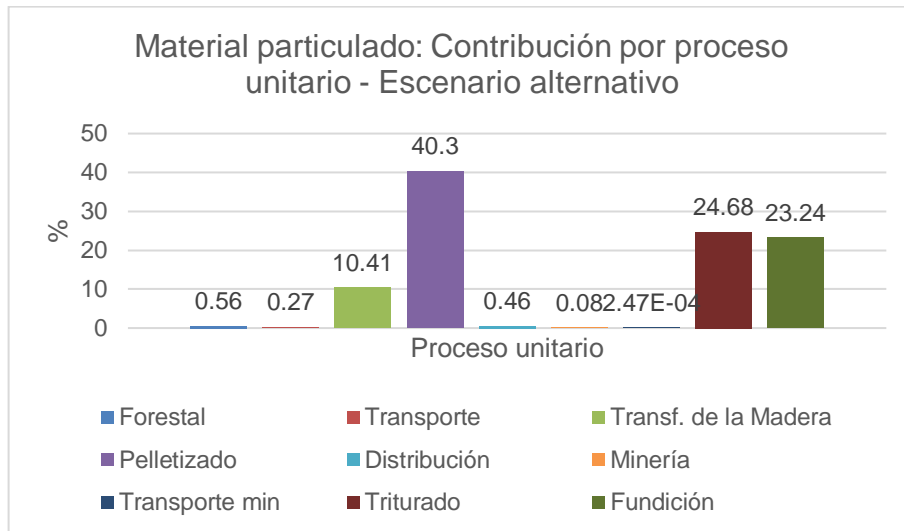


Figura 18. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto al Material particulado

Acidificación terrestre

El escenario de mejor desempeño fue el alternativo, ya que produjo 7.07E-01 kg SO₂ eq en comparación con el escenario de referencia que produjo 1.49E+00 kg SO₂ eq (Figura 19). Esto significa una diferencia del 53%. En otras palabras, la sustitución de combustibles reduce las emisiones de contaminantes que causan la acidificación (Tabla 8).

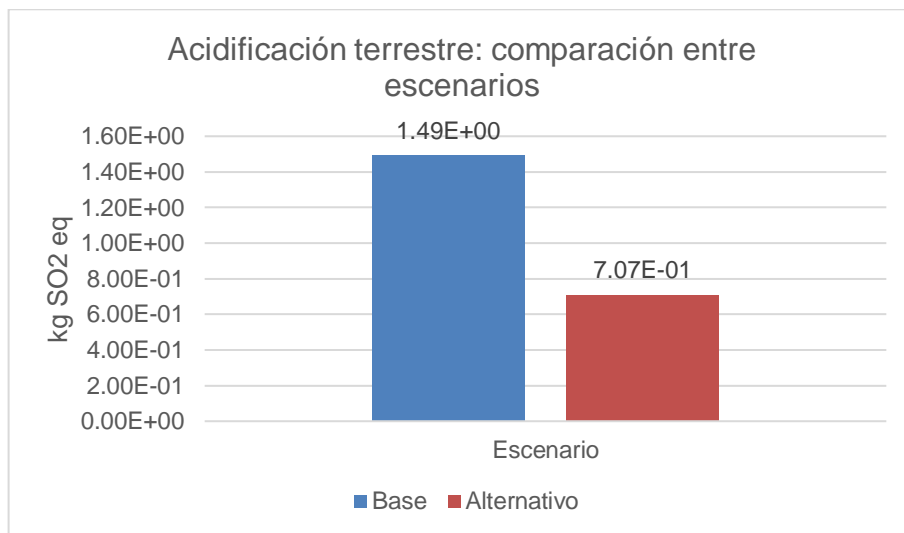


Figura 19. Comparación de escenarios respecto a la Acidificación terrestre

El proceso con mayor contribución del escenario base fue fundición (80%) (Figura 20). El mayor contribuyente al impacto general del escenario es el dióxido de azufre (60%), que proviene de la fundición de coque.

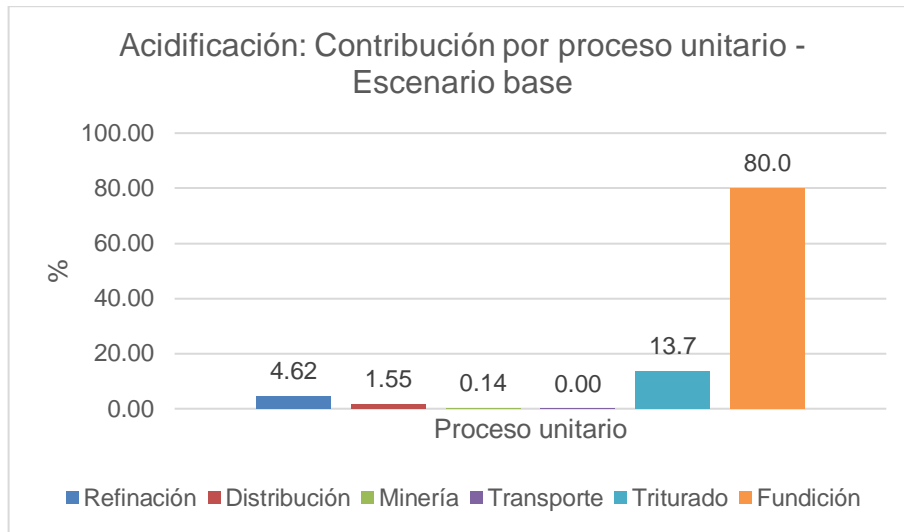


Figura 20. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto a la Acidificación

Por otro lado, el proceso de mayor contribución al escenario alternativo fue el Triturado (29%), lo que se puede atribuir a la matriz energética de México (Figura 21). Las emisiones que más contribuyeron al impacto general del escenario alternativo fueron el dióxido de azufre (79 %) de la generación de energía con combustibles fósiles aguas arriba.

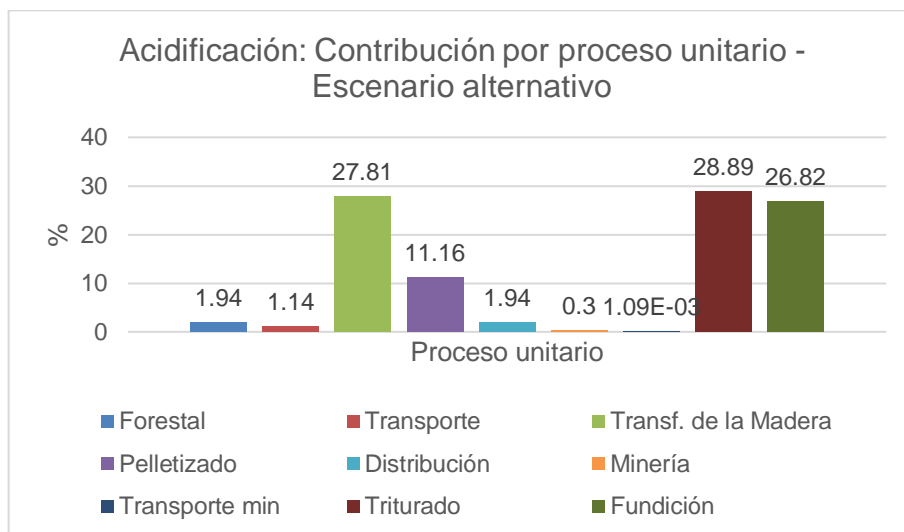


Figura 21. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto a la Acidificación

Eutroficación

El escenario de mejor desempeño es el escenario base ya que produce $1.56E-02$ kg P eq, en comparación con el escenario alternativo que produce $1.91E-02$ kg P eq (Figura 22). Esto significa una diferencia de -22%, es decir, la sustitución de combustibles incrementaría las emisiones de contaminantes que causan eutrofización (Tabla 8).

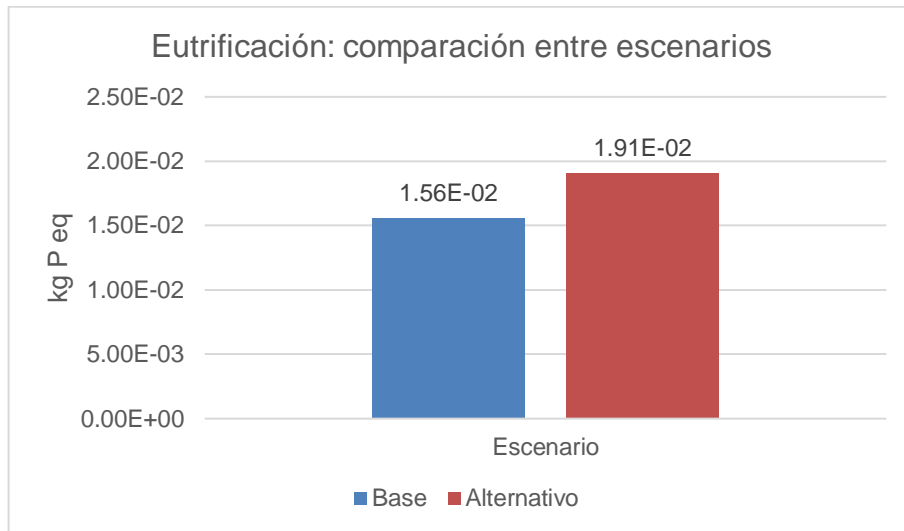


Figura 22. Comparación de escenarios respecto a la Eutroficación

El proceso con la mayor contribución del escenario base fue el Triturado (51%), lo cual se debe al consumo de electricidad del mix mexicano (Figura 23). La emisión con mayor contribución al impacto total del escenario base fue el fosfato (99%) el cual es liberado durante la extracción del carbón para la generación de electricidad “aguas arriba”.

El proceso de mayor aporte en el escenario de referencia es el Triturado (51%), lo que se explica por el consumo eléctrico del mix mexicano (Figura 23). Las emisiones que más contribuyen al impacto de referencia total es el fosfato (99 %), que se liberan durante la extracción de carbón para la generación de energía eléctrica aguas arriba.

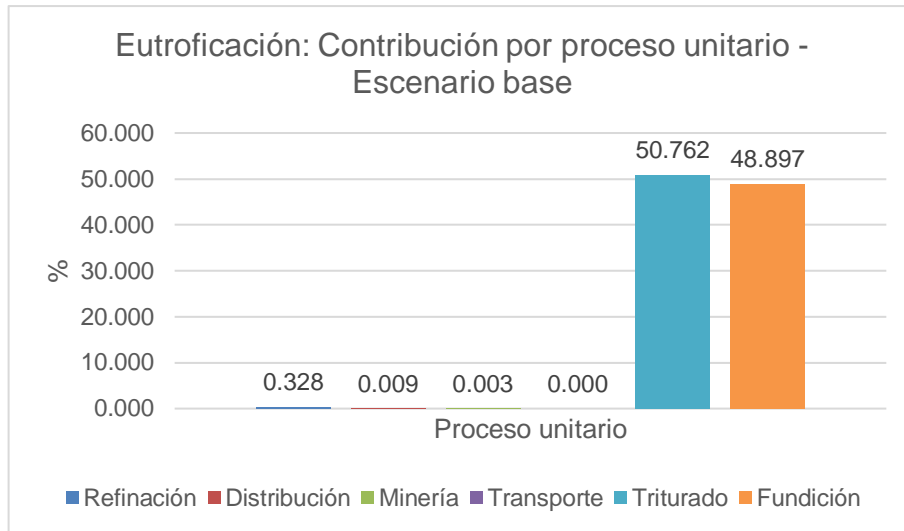


Figura 23. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto a la Eutroficación

A su vez, el proceso que más aportó al escenario alternativo fue el Triturado (42%), debido al mix eléctrico mexicano (Figura 24). La emisión que más contribuye al impacto total del escenario es el fosfato (99 %), que se libera durante la extracción de carbón para la generación de energía eléctrica aguas arriba.

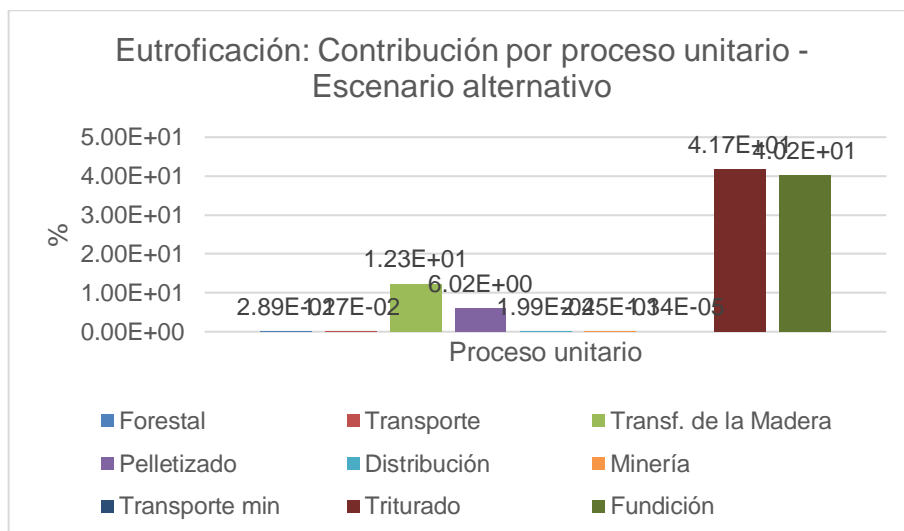


Figura 24. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto a la Eutroficación

Ecotoxicidad

El escenario que tuvo mejor desempeño fue el alternativo puesto que genera 417.9 kg 1,4-DCB, frente al escenario base que genera 26649.2 1,4-DCB (Figura 25). Esto significa una diferencia de 98%, es decir, que la sustitución del combustible disminuiría la emisión de contaminantes causantes de la ecotoxicidad (Tabla 8).

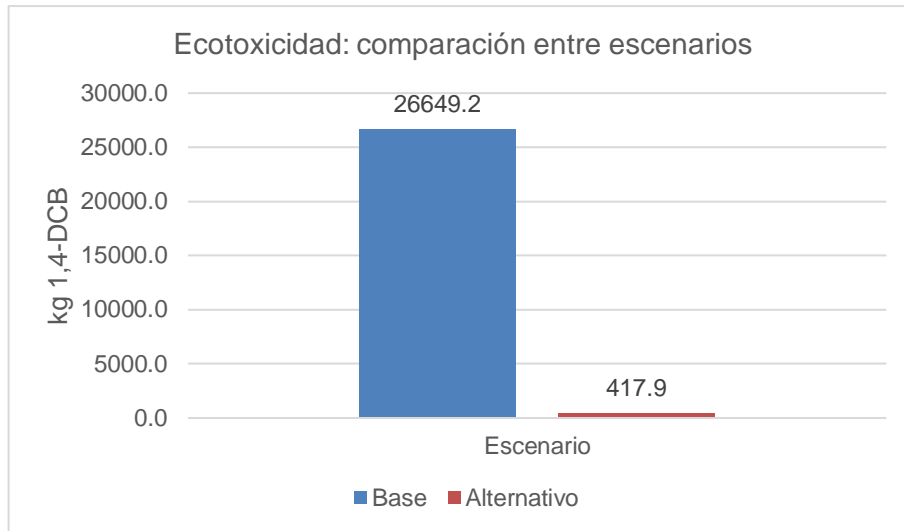


Figura 25. Comparación de escenarios respecto a la Ecotoxicidad

El proceso con mayor contribución del escenario base fue la Fundición (99.7%) (Figura 26). La emisión con mayor contribución al impacto total del escenario base fue el cobalto (94%) lo cual se debe a la fundición del coque.

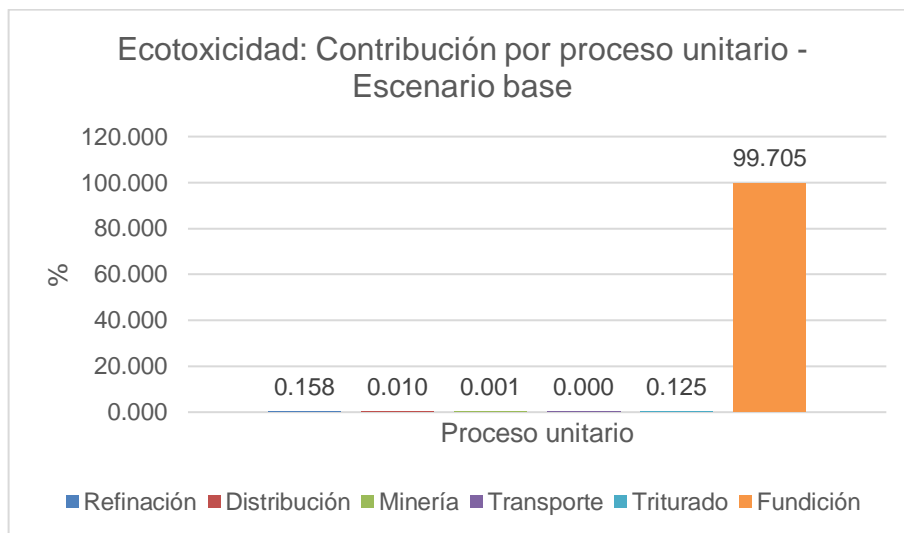


Figura 26. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto a la Ecotoxicidad

Mientras tanto, el proceso con la mayor contribución al escenario alternativo fue la Fundición (42%) (Figura 27). La emisión con mayor contribución al impacto total del escenario alternativo fue el cobre (43%) lo cual se debe a la fundición de los pellets puesto que es uno de sus constituyentes.

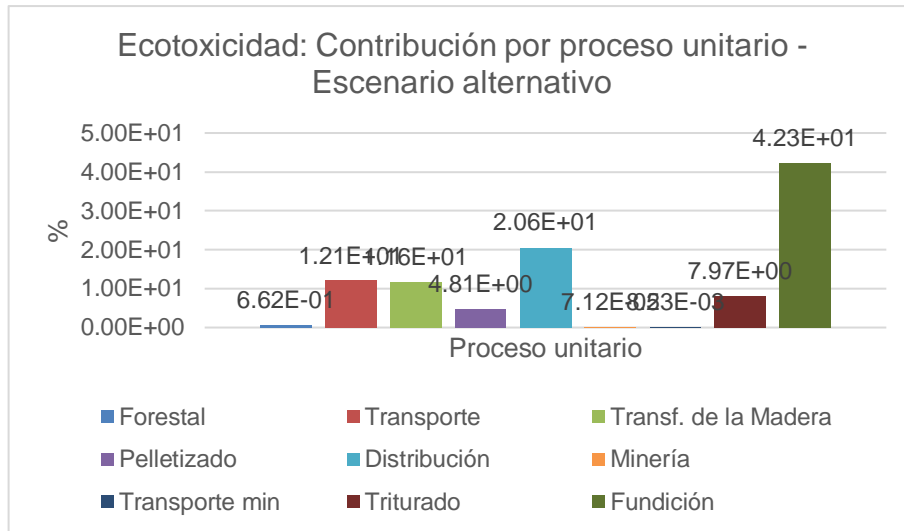


Figura 27. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto a la Ecotoxicidad

Toxicidad humana

El escenario de mejor desempeño fue el escenario alterno ya que produce 1490.0 kg de 1,4-DCB eq en comparación con el escenario de referencia que produce 1772.2 kg de 1,4-DCB eq (Figura 28). Esto significa una diferencia del 16%, es decir, al sustituir el combustible se reduciría la emisión de contaminantes tóxicos para la humanidad (Cuadro 9).

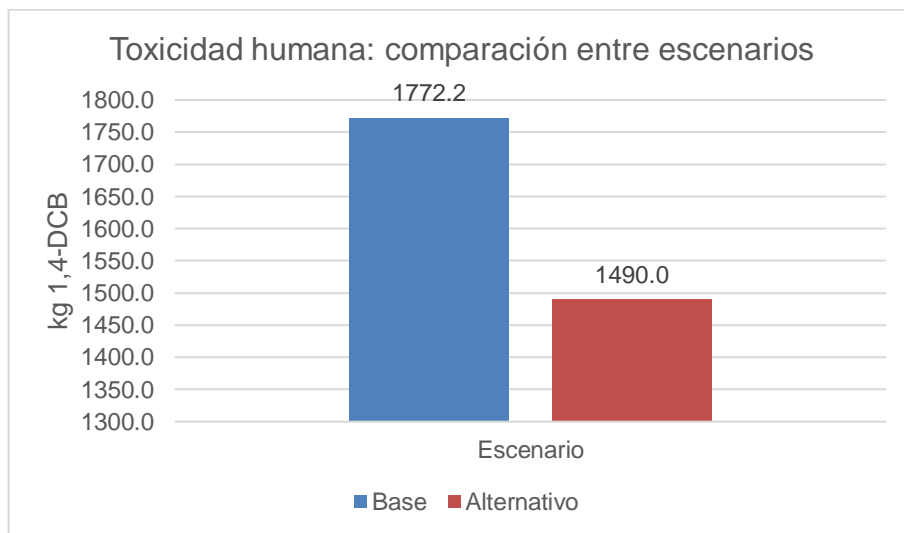


Figura 28. Comparación de escenarios respecto a la Toxicidad humana

El proceso con mayor contribución del escenario base es Fundición (74%) (Figura 29). Las emisiones con la mayor contribución al impacto total del escenario de línea base son las de mercurio (71%) causadas por la fundición de coque.

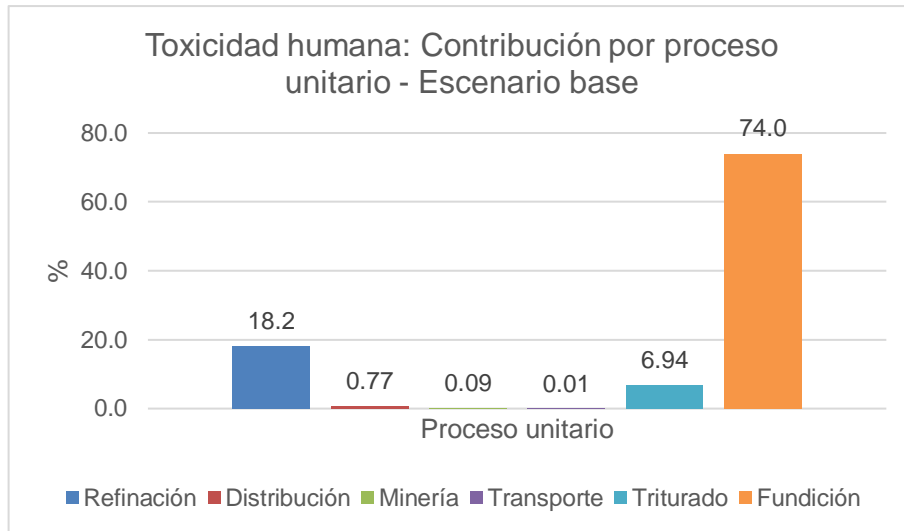


Figura 29. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto a la Toxicidad humana

En contraste, el proceso con mayor contribución al escenario alternativo fue la Transformación de la madera (32%) (Figura 30). La emisión con mayor contribución al efecto global del escenario fue el zinc (42%), que se atribuye al consumo de diésel del cargador frontal.

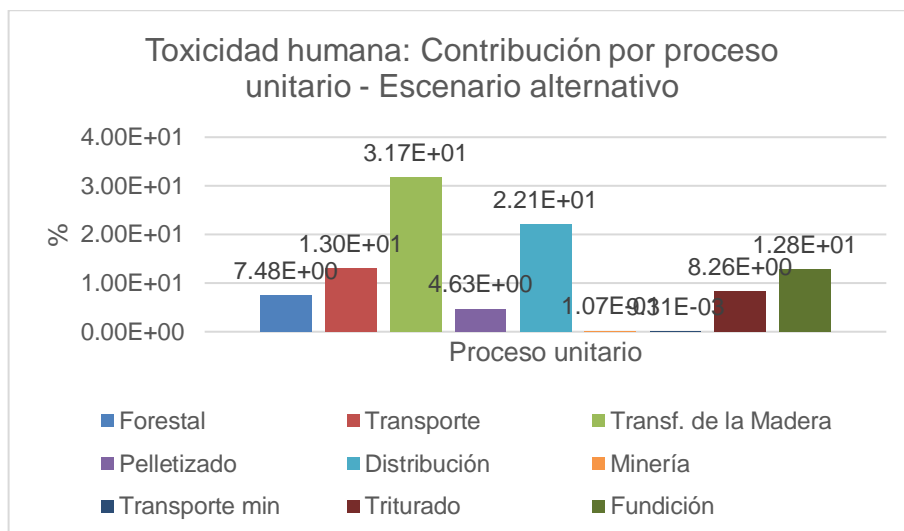


Figura 30. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto a la Toxicidad humana

Agotamiento de recursos fósiles

El escenario de mejor desempeño fue el escenario base, ya que produjo un equivalente de petróleo de 34.7 kg en comparación con otro escenario que produjo un equivalente de

petróleo de 43.9 kg (Figura 31). Esta es una diferencia de -26%, lo que significa que la sustitución de combustibles agotaría aún más los recursos fósiles (Tabla 8).

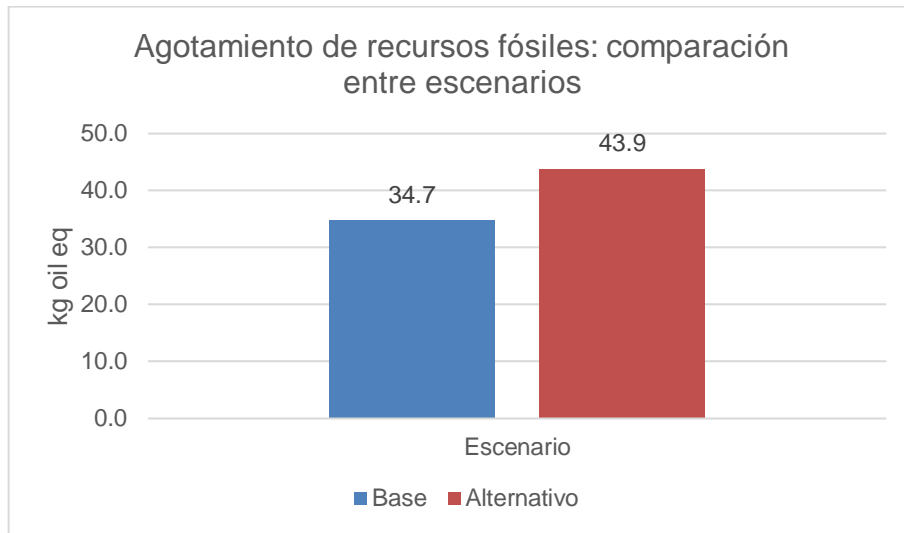


Figura 31. Comparación de escenarios respecto al Agotamiento de recursos fósiles

El proceso con mayor aporte a la línea base fue la Refinación (51%), que se atribuye a la producción de petróleo (Figura 32). La sustancia que más contribuyó al impacto global del escenario fue el petróleo (54%).

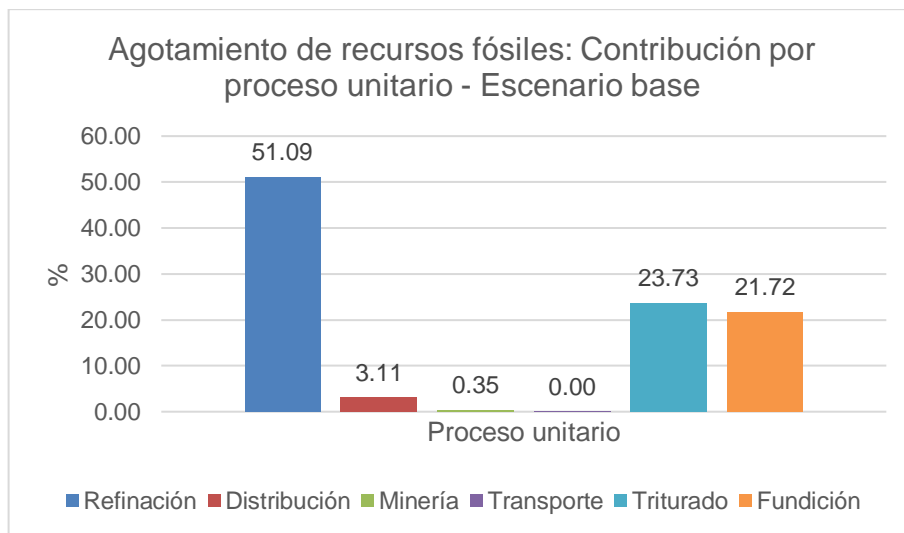


Figura 32. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario base respecto al Agotamiento de recursos fósiles

Por otro lado, el proceso con mayor aporte al escenario alternativo fue la Transformación de la madera (40%) (Figura 33). El carbono (42%) fue el mayor contribuyente al impacto general del escenario, que se debe al consumo de gas natural.

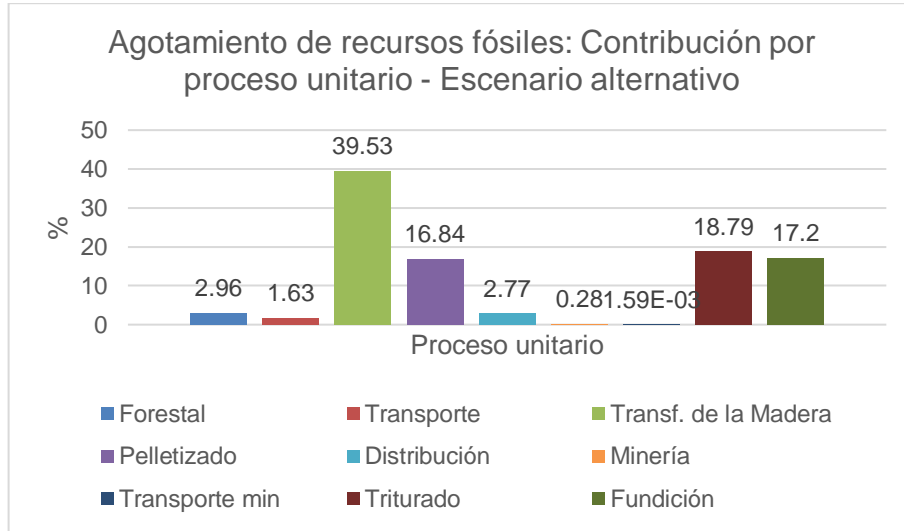


Figura 33. Análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo respecto al Agotamiento de recursos fósiles

Tabla 8. Comparación de resultados entre el sistema base y alternativo

Categoría de impacto	Unidad	Escenario base	Escenario alternativo	Diferencia (%)
Cambio climático	kg CO2 eq	946.3	152.6	84
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	4.19E-05	1.83E-04	-337
Ozono troposférico	kg NOx eq	1.65E+00	4.20E-01	75
Material particulado	kg PM2.5 eq	9.45E-01	1.28E+00	-35
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	1.49E+00	7.07E-01	53
Eutroficación	kg P eq	1.56E-02	1.91E-02	-22
Ecotoxicidad	kg 1,4-DCB	26649.2	417.9	98
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB	1772.2	1490.0	16
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	34.7	43.9	-26

Tabla 9. Resultados del análisis de contribución por proceso unitario del sistema base

Categoría de impacto	Unidad	Total	Refinación	Distribución	Minería	Transporte	Triturado	Fundición Coque
Cambio climático	kg CO2 eq	946.3	8.0	3.5	0.4	0.0	36.0	898.5
	%	100.00	0.84	0.37	0.04	0.00	3.80	95.0
Agotamiento de la Capa de ozono	kg CFC11 eq	4.19E-05	1.53E-05	2.59E-06	3.27E-07	7.85E-10	1.29E-05	1.08E-05
	%	100	36.39	6.17	0.78	0.00	30.85	25.82
Ozono troposférico	kg NOx eq	1.65	0.04	0.06	0.00	0.00	0.08	1.47
	%	100	2.32	3.48	0.28	0.00	5.10	88.8
Material particulado	kg PM2.5 eq	0.95	0.02	0.01	0.00	0.00	0.32	0.60
	%	100	2.45	0.89	0.11	0.00	33.4	63.1
Acidificación	kg SO2 eq	1.49	0.07	0.02	0.00	0.00	0.20	1.19
	%	100	4.62	1.55	0.14	0.00	13.7	80.0
Eutroficación	kg P eq	0.016	5.13E-05	1.35E-06	4.66E-07	2.16E-09	0.0079	0.0076
	%	100	0.328	0.009	0.003	0.000	50.762	48.897
Ecotoxicidad	kg 1,4-DCB	26649.2	42.23	2.65	0.30	0.04	33.30	26570.7
	%	100	0.158	0.010	0.001	0.000	0.125	99.705
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB	1772.2	321.8	13.62	1.60	0.14	123.0	1312.1
	%	100	18.2	0.77	0.09	0.01	6.94	74.0
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	34.7	17.75	1.08	0.12	0.00	8.24	7.54
	%	100	51.09	3.11	0.35	0.00	23.73	21.72

Tabla 10. Resultados del análisis de contribución por proceso unitario del escenario alternativo

Categoría de impacto	Unidad	Total	Forestal	Transporte	Transf. de la Madera	Pelletizado	Distribución	Minería	Transporte2	Triturado	Fundición
Cambio climático	kg CO2 eq	152.59	2.38	2.12	51.99	22.61	3.62	0.35	2.05E-03	36	33.51
	%	100	1.56	1.39	34.07	14.81	2.37	0.23	1.34E-03	23.59	21.96
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 eq	1.83E-04	2.25E-06	8.12E-07	1.06E-04	4.91E-05	1.38E-06	3.27E-07	7.85E-10	1.29E-05	1.08E-05
	%	100	1.23	0.44	57.67	26.77	0.75	0.18	4.28E-04	7.05	5.9
Ozono troposférico	kg NOx eq	0.420	0.025	0.016	0.156	0.039	0.028	0.005	0.000	0.084	0.067
	%	100	5.93	3.86	37.1	9.34	6.57	1.09	0.00	20.1	16.1
Material particulado	kg PM2.5 eq	1.28	7.19E-03	3.45E-03	1.33E-01	5.16E-01	5.87E-03	1.04E-03	3.16E-06	3.16E-01	2.98E-01
	%	100	0.56	0.27	10.41	40.3	0.46	0.08	2.47E-04	24.68	23.24
Acidificación	kg SO2 eq	0.71	0.01	0.01	0.2	0.08	0.01	2.10E-03	7.70E-06	0.2	0.19
	%	100	1.94	1.14	27.81	11.16	1.94	0.3	1.09E-03	28.89	26.82
Eutroficación	kg P eq	1.90E-02	5.50E-06	2.22E-06	2.34E-03	1.14E-03	3.78E-06	4.66E-07	2.16E-09	7.93E-03	7.64E-03
	%	100	2.89E-02	1.17E-02	1.23E+01	6.02E+00	1.99E-02	2.45E-03	1.14E-05	4.17E+01	4.02E+01
Ecotoxicidad	kg 1,4-DCB	417.9	2.77	50.5	48.4	20.1	85.9	0.30	0.04	33.3	176.6
	%	100	6.62E-01	1.21E+01	1.16E+01	4.81E+00	2.06E+01	7.12E-02	8.53E-03	7.97E+00	4.23E+01
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB	1489.984184	111.422645	193.2615913	472.5400919	68.93333658	329.0820198	1.59704398	0.138670222	122.9999961	190.0087892
	%	100	7.48E+00	1.30E+01	3.17E+01	4.63E+00	2.21E+01	1.07E-01	9.31E-03	8.26E+00	1.28E+01
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	43.87	1.3	0.71	17.34	7.39	1.22	0.12	6.97E-04	8.24	7.54
	%	100	2.96	1.63	39.53	16.84	2.77	0.28	1.59E-03	18.79	17.2

El escenario que presentó un mejor desempeño ambiental es el alternativo ya que mostró generar menores emisiones en cinco de las nueve categorías de impacto evaluadas (Cambio climático, Ozono troposférico, Acidificación, Ecotoxicidad, y Toxicidad humana). Estos resultados coinciden con lo reportado en los casos en los que se sustituye el combustible fósil por combustibles de fuentes alternativas ya que en la literatura se reportó que se obtiene un mejor desempeño ambiental cuando se utilizan combustibles alternativos como plásticos (Boesch et al., 2009); residuos de llantas, residuos rechazados para reciclaje, lodos biológicos, y la mezcla de los mismos (Georgiopoulou & Lyberatos, 2018); residuos de construcción de demolición de madera, tejas de asfalto y plástico (Zhang & Mabee, 2016); residuos rechazados para su reciclaje (Güereca et al., 2015); y biocombustibles como pellets de madera fabricados a partir de residuos (Hossain et al., 2017) (Tabla 11). Los resultados también coinciden con lo reportado para la fracción orgánica de residuos municipales en las categorías de Cambio climático, Material particulado, eutroficación, pero contradicen en lo reportado en las categorías de Agotamiento de la capa de ozono, Agotamiento de los recursos abióticos, Ecotoxicidad y Toxicidad humana (Mathioudakis et al., 2021).

Cabe mencionar que los alcances de la presente investigación difieren de los utilizados en la literatura mencionada anteriormente ya que en dichos casos se tomó como punto de partida el residuo una vez que éste ha sido generado mientras que la presente investigación abarcó procesos aguas arriba. Otra diferencia relevante que se encontró fue que en el resto de las investigaciones suele modelarse una sustitución del combustible fósil de alrededor del 30% y no del 100% como se realizó en esta investigación. En dichas decisiones metodológicas podría encontrarse la razón por la cual los resultados obtenidos en esta investigación difieren del resto de casos.

Tabla 11. Comparación resultados con lo reportado en investigaciones similares.

Fuente	UF	Combustible	Cambio climático	Ag. Rec. Fós.	Acidif.	Eutrof.	Ago cap ozo	Oxid. Fotoq.	Toxi. terrestre	MP	Tox. Hum.
(Boesch et al., 2009)	1 ton de clínker	20% Llantas 20% Residuos 20% industriales 20% Lodo activado seco	922 kg CO ₂ eq 928 kg CO ₂ eq 941 kg CO ₂ eq 937 kg CO ₂ eq	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
(Zhang & Mabee, 2016);	1 ton de clínker	100% Residuos de construcción de madera 100% Residuos de asfalto 100% Residuos de vigas de madera 100% Plástico	582 kg CO ₂ eq 827 kg CO ₂ eq 669 kg CO ₂ eq 856 kg CO ₂ eq	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
(Güereca et al., 2015)	1 ton de clínker	20% Residuos rechazados	932 kg CO ₂ eq	0.93 MJ	1.67 Kg SO ₂	0.39 kg PO ₄	4.3e-05 Kg CFC-11	0.087 kg C ₂ H ₄ eq	0.055 kg 1,4-DB eq	NA	NA
(Hossain et al., 2017)	1 ton de cemento	50% Residuos de madera	980 kg CO ₂ eq	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
(Mathioudakis et al., 2021)	Combustión de 1000 kg de residuos orgánicos	Residuos urbanos orgánicos	+	+	NA	+	+	NA	NA	-	-
Esta investigación	1 ton de clínker	100% pellets de madera	152 kg CO ₂ eq	43 kg oil eq	7 kg SO ₂ eq	1.91 kg P eq	1.8e-4 kg CFC11 eq	NA	NA	1.2 kg PM2.5 eq	1490 kg 1,4-DCB

En el escenario base, el proceso unitario que presentó la mayor contribución fue la Fundición ya que fue el proceso que contribuyó más en seis de las nueve categorías (Cambio climático, Material particulado, Acidificación, Ecotoxicidad, Toxicidad humana, y Ozono troposférico), mientras que el que contribuyó menos fue el Transporte de minerales ya que tuvo la menor contribución en todas las categorías. Un comportamiento similar fue reportado por Güereca (2015), ya que se encontró que la Fundición fue el proceso con la contribución mayor tanto en el escenario base.

Por su parte, en el escenario alternativo, el proceso de la Transformación de la madera fue el que tuvo la mayor contribución, con cinco categorías (Cambio climático, Agotamiento de la capa de ozono, Toxicidad humana, Agotamiento de los recursos abióticos, y Ozono troposférico), mientras que el que contribuyó menos en todas las categorías fue el Transporte de los minerales.

Adicionalmente, el proceso específico que mostró una influencia preponderante a lo largo del ciclo de vida en el escenario base fue la Fundición de coque puesto que mostró una mayor contribución en seis de las categorías de impacto (Cambio climático, Material particulado, Acidificación, Ecotoxicidad, Toxicidad humana, y Ozono troposférico). Mientras que en el escenario alternativo el proceso específico que tuvo la mayor contribución fue el uso de electricidad proveniente del mix eléctrico nacional en cuatro de las categorías (Cambio climático, Agotamiento de la capa de ozono, Acidificación, y Eutroficación). Como puede observarse, para ambos escenarios los procesos con mayor contribución están relacionados con el uso de combustibles fósiles, lo cual resalta la importancia de lograr una transición energética con el fin de que exista una diversificación en la matriz energética, disminuya el uso de combustibles fósiles y aumente la participación de fuentes renovables que demuestren ser sostenibles. Por otra parte, es importante mencionar que el análisis de contribución no es un tema comúnmente reportado en la literatura de ACV, por lo que no fue posible realizar una comparación de los resultados obtenidos en esta materia con los reportados en la literatura.

V. CRITERIO SOCIAL

5.1. Metodología

Para el Criterio Social se realizó una revisión de la literatura con el fin de identificar los indicadores que han sido propuestos para la evaluación de impacto social en marcos tanto generales, como la GRI (n.d.) y UNEP/SETAC (2013), así como específicos para proyectos de bioenergía como lo son aquellos propuestos por la GBEP (2020) y Dale y colaboradores (2013, 2015, 2018). Posteriormente, se realizó una prueba piloto (Tabla 12) en la cual se revisó la literatura enfocada en la evaluación de sostenibilidad de dendroenergía, se encontró que el empleo es el criterio más utilizado e, incluso, en algunos casos es el único (Blumer et al., 2013; Buchholz et al., 2009; Cambero & Sowlati, 2014; den Herder et al., 2012; Domac et al., 2005; Fedorova & Pongrácz, 2019; Fritsche et al., 2012; Marcianó & Menguzzato, 2012; Nielsen-Pincus & Moseley, 2009; Ramirez-Contreras & Faaij, 2018; Scarlat & Dallemand, 2011; Tourkolias & Mirasgedis, 2011; Vallesi et al., 2012; van der Horst & Vermeylen, 2011).

Para decidir el criterio social a evaluar se tomó en cuenta que, por un lado, el empleo es el indicador utilizado más frecuentemente como se pudo observar en la revisión de la literatura. Por otro lado, se tomaron en cuenta los factores limitantes en la investigación para la recolección de datos, como lo son: la factibilidad para la obtención de los datos a través de comunicación directa con empresas, el presupuesto disponible para realizar trabajo de campo, el tiempo límite para realizar la investigación, y la pandemia por el COVID-19. Por estas razones se decidió que el criterio elegido para evaluar el impacto social sería el empleo, bajo el indicador de número de empleados, en la fase de producción del coque de petróleo y de los pellets de madera.

La recolección de los datos se realizó de distinta manera para cada escenario. Para el escenario base se realizó una revisión de la literatura para investigar la generación de empleo reportada en la producción de coque de petróleo. Se decidió utilizar los datos del número de empleados de la empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX) presentada en su reporte de sostenibilidad (2017) ya que contenía información más precisa en comparación con el resto de las empresas revisadas (Chevron, Shell, Exxon Mobile, Saudi Aramco, Lukoil, Marathon). Para el escenario alternativo, los datos fueron obtenidos a través de comunicación directa con la empresa MMSM.

Tabla 12. Indicadores sociales reportados en la prueba piloto.

Autor	Año	Indicador social utilizado	Estatus
Blumer et al.	2013	Transparencia Opinión pública Cambio en la opinión pública	Aplicado
Bushholz et al.	2009	Participación Cumplimiento regulatorio Seguridad alimentaria Condiciones laborales de los trabajadores Derechos de propiedad y de uso Respeto de los derechos humanos Aceptación cultural Respeto a las minorías Cohesión social Disponibilidad de la tierra para actividades diferentes a la producción alimentaria Nivel de vida Impacto acústico Impacto visual	Propuesta
Cambero & Sowlati,	2014	Empleo Cambio de uso de suelo Molestias por tráfico	Aplicado
Den Herder et al.	2012	Empleo	Aplicado
Domac et al.,	2005	Empleo	Aplicado
Fedorova & Pongrácz	2019	Capacitación Seguridad e higiene Riesgos a la salud Empleo Opinión pública Participación local	Aplicado
Fritsche et al.	2012	Seguridad alimentaria Tenencia de la tierra Derechos laborales	Propuesta
Marcianó & Menguzzato	2012	Capacitación de los trabajadores Seguridad e higiene ocupacional Riesgos para la salud Empleo Opinión pública Participación local	Aplicado
Nielsen-Pincus & Moseley	2009	Empleo Seguridad e higiene ocupacional Participación local Percepción pública	Propuesta
Ramirez-Contreras & Faaij	2018	Empleo Bienestar de los trabajadores y sus familias Educación Beneficios sociales y participación de grupos minoritarios Quejas de agentes de interés Seguridad alimentaria Derechos humanos	Propuesta
Scarlat & Dallemand	2011	Beneficios sociales para la comunidad Derechos humanos Derechos de propiedad del territorio Condiciones laborales Contratos laborales Seguridad e higiene ocupacional Discriminación en el trabajo Jornada laboral Capacitación	Propuesta
Tourkolias & Mirasgedis	2011	Empleo	Aplicado
Vallesi et al.	2012	Tenencia de la tierra Empleo Condiciones laborales Participación local Impacto en las comunidades	Propuesta

Para ambos casos se realizó una asignación másica debido a que no se encontró información exacta sobre la cantidad de empleados destinados para la producción de los combustibles sino el total de empleados de cada empresa. Para el cálculo del porcentaje de la asignación másica se utilizaron los datos de producción comunicados directamente por MMSM y los datos de producción presentes en el reporte de sostenibilidad de PEMEX. De esta manera, en el caso de PEMEX la asignación fue de 0.60% mientras que para MMSM fue de 30.9%. Cabe mencionar que la razón por la cual se prefirió realizar una asignación másica en vez de una asignación económica fue la falta de información exacta sobre las ganancias obtenidas a partir de la venta del coque de petróleo.

5.2 Resultados y discusión

Como se puede observar en la Tabla 13, PEMEX cuenta con 91.9 veces más empleados que MMSM para la producción del combustible. A primera vista, los resultados indicarían un mejor desempeño social por parte del escenario base, en el que se usa combustible fósil, en comparación con el escenario alternativo.

Tabla 13. Número de empleados por empresa

Combustible	Empresa	No. de empleados
Coque de petróleo	PEMEX	689.4
Pellets de madera	MMSM	7.5

La diferencia notable entre el número de trabajadores de las empresas se debe, a su vez, a la diferencia de la magnitud de éstas y sus operaciones. Por un lado, PEMEX es una empresa estatal, identificada como la más grande de México. Sus operaciones se clasifican en cuatro áreas principales: Exploración y producción, Transformación industrial, Logística, y Fertilizantes. Entre la infraestructura con la que cuenta se encuentran seis refinerías, dos complejos petroquímicos y complejos procesadores de gas, 83 terminales terrestres y marítimas, poliductos, buques, carros tanque, más de 11,000 estaciones de servicio a lo largo del país (PEMEX, 2021). Por otro lado, MMSM es una empresa ubicada en Durango cuyas operaciones son la fabricación y comercialización de productos de madera (Maderas y Materiales San Mateo, 2021). Las condiciones mencionadas denotan la problemática que supone pretender comparar a dos empresas desiguales en tamaño desde un punto de vista empresarial. Si bien en la presente investigación se encontró que el indicador social más

utilizado para la evaluación de la sostenibilidad de la bioenergía es el número de trabajadores a manera de reflejo de la creación de empleo, sería recomendable incluir más indicadores en la evaluación del desempeño social.

Al utilizar el número de trabajadores como único indicador social ignora el resto de los indicadores posibles para evaluar el desempeño ante el agente de interés de “los trabajadores”, como lo son: la libertad de asociación, el trabajo infantil, las jornadas, el trabajo forzado, la igualdad de oportunidades, la discriminación, las condiciones de salud y seguridad, los beneficios sociales y prestaciones. De esta manera, se podría juzgar que por tener un mayor número de trabajadores una empresa tendría un mejor desempeño que otra incluso si dichos trabajadores se encuentran bajo condiciones de explotación laboral, violencia, desigualdad, insalubridad, esclavitud etc. Además, los trabajadores son solamente uno de los agentes de interés de las empresas ya que también se encuentran: los inversionistas, la cadena de valor, la comunidad local, los consumidores, y la sociedad (Taticchi, 2013). Sería recomendable que toda evaluación del desempeño social aborde los distintos agentes de interés, de lo contrario, se tendría una visión sesgada de la realidad con implicaciones relevantes para la sostenibilidad. Algunos sets de indicadores que servirían como punto de partida serían aquellos utilizados para los Informes de Sostenibilidad que se utilizan en la actualidad como GRI, el Pacto Mundial, las Hojas Metodológicas para la Evaluación del Ciclo de Vida Social de UNEP-SETAC, o los Estándares ASG (ambiente, sociedad, gobernanza) (Cort & Esty, 2020).

En este punto cabe recordar que para cada agente existe un set de indicadores, con el fin de lograr una evaluación del desempeño social más amplia, tal como se recomienda, por ejemplo, en las Hojas Metodológicas para la Evaluación de Ciclo de Vida Social de la UNEP-SETAC y se mencionan a continuación. Algunos indicadores que podrían resultar importantes para evaluar el desempeño social hacia las comunidades locales son: la migración, el respeto a la herencia cultural, el acceso a los recursos materiales e inmateriales, las condiciones de salud y seguridad de las comunidades locales, el respeto de los derechos humanos, el empleo local, la relación empresa-comunidad. En cuando a la cadena de suministro se podrían utilizar la competencia justa, el respeto a los derechos de propiedad intelectual, las relaciones con los proveedores, y la promoción de la responsabilidad social. Para el caso de los consumidores se pueden utilizar los indicadores de seguridad y salud, mecanismos de retroalimentación, privacidad, transparencia, y la responsabilidad del fin de vida del producto/servicio. Respecto a la sociedad, se podría

evaluar el compromiso público hacia temas de sustentabilidad, la prevención y mitigación de conflictos, la contribución al desarrollo económico, la corrupción, y el desarrollo tecnológico.

Con el fin de tener un panorama más completo sobre las condiciones socioambientales relacionadas con los combustibles abordados en este trabajo, en la siguiente sección se presentan hallazgos sobre las implicaciones de la producción y consumo encontrados a partir de la revisión de la literatura especializada. En primer lugar, se presentará lo referente a la etapa de producción de los combustibles y, en segundo lugar, se expondrá lo pertinente al consumo.

Producción

En esta subsección se presentará la información más relevante relacionada a las implicaciones de la producción de cada combustible. En este caso, la información se encontrará en el siguiente orden: riesgo de desastres en la producción de petróleo y sus derivados; inseguridad relacionada con la producción de derivados del petróleo; afectaciones por accidentes petroleros; y afectaciones por proyectos de pellets de madera.

Riesgo de desastres en la producción de petróleo y sus derivados

Como punto de partida, es importante conocer la influencia que tienen las actividades industriales sobre la comunidad circundante a las instalaciones. Esto es posible conocerlo a través de investigaciones etnográficas que presenten datos cualitativos recabados a través de entrevistas con los pobladores sobre sus experiencias y percepciones. En este caso, la industria petrolera se utilizan sustancias peligrosas y en este tipo de actividades las explosiones representan, junto con los incendios, los accidentes más frecuentes y destructivos (Avalos-Bravo et al., 2019). Por lo tanto, el riesgo de desastres es uno de los temas más relevantes para las comunidades circundantes.

En la literatura se puede encontrar el caso de estudio publicado por Landa (2016) en el que aborda la situación en la ciudad de Poza Rica, Veracruz, en la cual se realizaron entrevistas a trabajadores retirados de PEMEX, científicos locales, servidores públicos estatales y residentes de una colonia empobrecida. En esta ciudad se pueden encontrar sitios de perforación cerca o en el centro de parques públicos y andaderos, algunos de estos se encuentran activos mientras que otros están abandonados. También se menciona la tonalidad rojiza del cielo debido a la quema de gas, un tema que es recurrente entre los pobladores.

La percepción de una cooperativa indígena es de temor hacia los incendios y explosiones asociadas a los derrames y fugas, lo cual es originado por la experiencia de la vida diaria. En este sitio es frecuente que los habitantes se encuentren con ductos rotos, presencia de petróleo, fugas de gas, el cielo rojo e, incluso, con derrames de petróleo en el sistema de drenaje. Estos problemas son retomados y expuestos por los periódicos locales. PEMEX, por su parte, realiza reparaciones para evitar tener mayores problemas con la comunidad, pero sus esfuerzos resultan infructuosos. Uno de los entrevistados menciona que esta ciudad ha sido conocida como la capital nacional del petróleo pero que ha dejado la ciudad y el ambiente dañados. Otros habitantes optan por remedios caseros para cuando las fugas de gas se toman insoportables al punto de causarles vómitos debido al olor desagradable que se extiende por la ciudad. La calidad del aire ha sido un problema recurrente en los medios locales, ha sido denunciado por activistas ambientales ante la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), y ha llamado la atención de científicos de la universidad estatal; quienes han encontrado concentraciones de contaminantes mayores a las consideradas como normales en la Ciudad de México. Específicamente, encontraron valores de ozono, CO₂ y otras partículas por encima de lo considerado como normal en la Ciudad de México en ocho de diez puntos de muestreo en la Poza Rica, lo cual es atribuido a las quemadas que PEMEX lleva a cabo.

También se menciona la dificultad de algunos para tener servicios básicos en sus casas debido a la presencia de ductos de PEMEX en el subsuelo. Además, la mayoría de los residentes de una de las colonias recuerdan al menos un incidente en el que tuvieron que abandonar sus casas. De forma contraria, una residente menciona que considera la infraestructura petrolera como un asunto irrelevante, lo cual es identificado por la investigadora como un estado de negación en el cual se rechaza la realidad debido a sus asociaciones angustiantes.

Por otra parte, un trabajador retirado de PEMEX menciona que, si bien viven con nerviosismo, se han acostumbrado. No obstante, la investigadora indica que la percepción de este individuo se debe a su experiencia trabajando entre las máquinas y porque conoce las señales que pueden indicar problemas. En este punto cabe recordar que PEMEX ha sido la principal fuente de empleos en la ciudad y el trabajo dentro y alrededor de la empresa ha influido en sus habitantes. De acuerdo con la autora, esta situación explica que situaciones riesgosas asociadas a los ductos y gases tóxicos han sido naturalizadas y parcialmente negadas por parte de la población (Landa, 2016).

Mientras tanto, para un grupo de trabajadores retirados de PEMEX un tema importante es la corrupción dentro de la misma empresa. Mencionan que existen intereses económicos personales por parte de los directores regionales mientras que la precariedad se extiende en los hospitales donde se atienden a los trabajadores puesto que escasean los medicamentos. En este punto cabe resaltar la presencia de casos de cáncer entre los entrevistados. A pesar de que las condiciones de vida en las que se encuentran inmersos amenazan su bienestar, existe un apego hacia la empresa y mantienen la esperanza de se logren mejoras. De acuerdo con la autora, esto sucede debido a la nostalgia y las nociones de justicia, solidaridad, deber y camaradería (Landa, 2016). Finalmente, tras analizar las percepciones de los distintos actores la autora concluye que los residentes, a través de la negación, atenúan el impacto que el petróleo y el gas pueden tener sobre ellos (Landa, 2016).

Algunas expresiones relevantes mencionadas en la investigación fueron:

- El petróleo es una maldición que los enferma.
- La gente se acostumbra a todo menos al hambre.
- Las moléculas en el aire pueden provocar una catástrofe.
- Está viviendo en una bomba de tiempo.
- En caso de un accidente serio no hay mucho que hacer más que correr (Landa, 2016).

Inseguridad relacionada con la producción y distribución de derivados del petróleo

Aunado a lo anterior, también existen riesgos durante el transporte de hidrocarburos ya sea debido a los derrames causados por fracturas en los ductos o por fallas en el mantenimiento, mecánicas, por operación inadecuada o por extracción ilegal (Avalos-Bravo et al., 2019). El robo de petróleo y sus derivados, conocido también como “huachicoleo”, es un factor relevante en la economía ilícita y político-criminal de México. Este mercado ilícito de combustible forma parte de un mercado más amplio y transfronterizo, el cual involucra cárteles de drogas, huachicoleros, servidores públicos corruptos y trabajadores de PEMEX (Jones & Sullivan, 2019). Este es un tema que ha ganado interés y ha decantado en la literatura en la investigación etnográfica realizada por Jones y Sullivan (2019), la cual sirvió como base para esta sección.

Uno de los factores que ha llamado la atención sobre esta problemática son las pérdidas económicas. En 2017, se estimó que el impacto económico del huachicoleo fue de entre 15

y 20 miles de millones de pesos. Esto resulta preocupante tomando en cuenta que las tomas clandestinas han aumentado, de 180 por año en el 2000 a 14,894 en el 2018. A través de dichas tomas se extrae petróleo crudo, derivados del petróleo (p. ej. gasolina, diésel, y turbosina), y gas LP (Avalos-Bravo et al., 2019).

El huachicoleo solía llevarse a cabo por criminales locales que se organizaron hasta conformar bandas especializadas. Sin embargo, ahora es una actividad desempeñada por bandas de narcotraficantes que se enfrentan con las bandas de huachicoleros por el control del comercio del combustible. De acuerdo con Jones y Sullivan (2019), el auge del huachicoleo surgió a partir de las reformas energéticas implementadas en la administración de Peña Nieto (2012-2018) ya que estas permitieron el incremento del precio de la gasolina y esto incentivó a los huachicoleros para rebajar los precios respecto al mercado legal. Esto llamó la atención de los grupos narcotraficantes, entre los que se encuentran: el Cártel del Golfo (CG), Cártel de Santa Rosa de Lima (CSRL), los Zetas y el Cártel Jalisco Nueva Generación (CJNG); el cual es considerado como el grupo criminal más fuerte del país. Debido a los fuertes intereses económicos asociados por el control del mercado del petróleo, han surgido guerras entre los grupos criminales, lo cual ha afectado a las comunidades circundantes a la infraestructura de PEMEX, donde se lleva a cabo el huachicoleo (Jones & Sullivan, 2019).

El robo de combustible se ha detectado en 22 estados, entre los que se encuentran: Hidalgo, Chihuahua, Coahuila, Oaxaca, Sinaloa, Tlaxcala, Durango, Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Puebla y Baja California. Actualmente, los estados con mayor auge de huachicoleo son Puebla y Guanajuato ya que en estos se encuentran los dos Triángulos Rojos del huachicoleo, el primero conformado por lo municipios poblanos de Tepeaca, Palmar de Bravo Quecholac, Acatzingo, Acajete y Tecamachalco, mientras que al segundo lo conforman las ciudades guanajuatenses de Salamanca, Irapuato, Celaya. La ciudad de Salamanca, en donde se encuentra la cuarta refinería más grande de México, es el epicentro del robo de petróleo de la zona. Por consiguiente, es un sitio que ha sufrido los estragos de la violencia e inseguridad derivados de las guerras entre los grupos criminales, especialmente el CJNG, el CSRL, y los Zetas, pero también contra el Estado. La confrontación ha incluido narcobloqueos, desmembramientos, amenazas contra gobernadores de Guanajuato e, incluso, amenazas contra el presidente Andrés Manuel López Obrador, si las autoridades no retiraban a las fuerzas de seguridad. Dicha amenaza fue realizada por medio de una narcomanta colgada en Salamanca y, después, las

autoridades encontraron una camioneta de carga que contenía explosivos en su interior estacionada en frente de la refinería de Salamanca (Jones & Sullivan, 2019).

Como se mencionó al inicio de esta sección, existen distintos actores cuya participación influye en la problemática. Esto se ve reflejado en las diferentes maneras a través de las cuales los delincuentes obtienen el combustible. Por ejemplo, sobornan y cooptan a los trabajadores de PEMEX para obtener acceso y explorar los oleoductos o construir sus propios oleoductos subterráneos para desviar el combustible. También se hace referencia a un impuesto sobre PEMEX por utilizar su propia infraestructura (Jones & Sullivan, 2019). Por otra parte, existen amenazas sobre trabajadores de PEMEX por parte de grupos criminales para que el combustible sea derramado en lagos con el fin de que sea recolectado, posteriormente, por los criminales (antiguo trabajador de PEMEX, comunicación directa, 2021).

En una de las investigaciones se menciona que “Los criminales usan este combustible robado para financiar su poder paralelo donde los empleados de PEMEX, funcionarios gubernamentales y policías corruptos ejercen un poder puro que ha penetrado y desafiado al Estado y al gobierno en todos los niveles” (Jones & Sullivan, 2019, p. 6). Tal corrupción es el combustible de la insurgencia criminal y del auge potencial del narcoestado. Como resultado de la corrupción y la violencia extrema perpetrada por los criminales, la inseguridad aumenta y la legitimidad del Estado se ve mermada. Así, los grupos criminales pueden suplantar el control y gobernanza del Estado y originar un estado de insolvencia; entendiendo la insolvencia como los efectos combinados de la inseguridad, la carencia de capacidad y la carencia de legitimidad entre las funciones del Estado. De acuerdo con los autores, la insolvencia política ocasionada podría combinarse con la inestabilidad económica y resultar en un círculo vicioso en donde la capacidad del estado se merma hasta que los criminales logran tener control territorial y gobernanza de facto (Jones & Sullivan, 2019).

Otro actor son las comunidades por las cuales pasan ductos de PEMEX ya que los grupos criminales han buscado obtener su aprobación y apoyo a través del establecimiento de una cultura huachicolera. Entre las estrategias que utilizan para lograr su objetivo se encuentran ofrecer gasolina a precios más baratos que las estaciones de gasolina y regalar combustible y otros bienes en festividades especiales (p. ej. día de las madres). Incluso existen actividades que se han observado en la narcocultura como los corridos que celebran el estilo de criminal y la creación un personaje inspirado en los santos católicos “El Santo Niño

Huachicolero”. Se ha señalado que la apropiación espiritual de dicho personaje por parte de la comunidad es una estrategia a través de la cual se explota el imaginario espiritual con el fin de moldear la percepción de los residentes respecto a los cárteles. De esta manera, dichas variaciones culturales tienen el potencial de modificar las estructuras política, económica y cultural (Jones & Sullivan, 2019).

Afectaciones por accidentes petroleros

El derrame de combustible sobre el suelo o al agua, ya sea por la presencia de tomas clandestinas o por fallas de mantenimiento, ocasiona su contaminación y esto lo convierte en un riesgo a la salud humana. De no limpiar las áreas impactadas y prevenir estos accidentes, se puede ocasionar daño al ambiente y pérdidas humanas (Avalos-Bravo et al., 2019). A continuación, en esta sección resumiré lo ocurrido en dos accidentes sucedidos en México.

En primer lugar, en 1979 ocurrió uno de los derrames de petróleo más grandes a nivel global, causado por la explosión de Ixtoc-I en la Sonda de Campeche. En este accidente se derramaron 3.4 millones de barriles de petróleo en el Golfo de México, por alrededor de nueve meses (Soto et al., 2014). El accidente se agravó debido a la falta de una respuesta rápida para controlar y mitigar los efectos de la contaminación y, por otra parte, debido al transporte del crudo hacia la zona costera. Si bien algunas investigaciones concluyeron que los factores de la meteorización disminuyeron los efectos de la contaminación aguda, no hubo una respuesta definitiva sobre las consecuencias a largo y mediano plazo sobre los ecosistemas.

Cabe mencionar que el ecosistema marino, era conocido entonces por sus condiciones prístinas previas al derrame. La Sonda de Campeche solía contar con una economía basada en la pesca, la cual cambió después del accidente. Por ejemplo, la pesca de camarón era una industria floreciente en la década de 1960 y era responsable del 21% de las exportaciones mexicanas de camarón. No obstante, algunas especies son más vulnerables a la exposición al petróleo y, adicionalmente, los disturbios en los hábitats marinos o costeros afectó el balance de las poblaciones de peces (Soto et al., 2014).

Los cambios en la zona no han parado ya que PEMEX ha continuado su expansión de operaciones y ha causado derrames accidentales crónicos. Esta situación ha sido señalada en algunas investigaciones como la causante de la merma en la pesca, adjudicado específicamente a la bioacumulación y biomagnificación de los tóxicos, como metales

pesados o hidrocarburos aromáticos policíclicos, a lo largo de la cadena trófica de la fauna y flora marinas. De manera contraria, otros estudios indican que la sobrepesca es la principal causa. Por otro lado, investigaciones apuntan a que la región de la Sonda de Campeche enfrenta un gran riesgo ecológico debido a los siguientes factores: la hipoxia, el cambio climático, a la explotación petrolera, y la sobrepesca (Soto et al., 2014). Las afectaciones a la pesca del camarón se ven reflejadas en la captura que ha disminuido de 20,000 toneladas en 1970 a 500 toneladas en años recientes (Soto et al., 2014). Se estima que la recuperación ecológica de los ecosistemas dañados puede tardar décadas debido a que los compuestos liberados pueden persistir por al menos 20 años después del derrame (Soto et al., 2014).

Desde el inicio de operaciones de PEMEX en el Golfo de México, en 1974, ha habido una gran preocupación por la transformación social, económica y ambiental que la industria petrolera podría tener sobre las comunidades locales. En respuesta, han ocurrido confrontaciones sociales y demandas legales en contra de PEMEX por parte de grupos sociales y conservacionistas ante las autoridades estatales y federales debido a los daños ambientales causados por los derrames accidentales y crónicos (Soto et al., 2014).

En segundo lugar, se tiene como ejemplo las afectaciones derivadas de la explosión de un pozo en Tabasco en el año 2013. La explosión del pozo Terra 123 lanzó gases tóxicos durante 58 días y afectó la zona conocida como la chintalapa tabasqueña, la cual se encuentra conformada por pequeñas comunidades indígenas de la comunidad Oxiacaque, municipio de Nacajuca, Tabasco. El accidente ha sido catalogado como un ecocidio debido a sus impactos en la salud de la población y en las actividades agrícolas, ganaderas y pesqueras, además de la alteración de la fauna, flora, el sistema de ríos y en las zonas de pantano (Durán, 2018).

Las emisiones de la explosión afectaron a cientos de comunidades indígenas como El Sitio, Isla de Guadalupe y Tucta, por mencionar algunas. Dichas comunidades se caracterizan por contar con el yocotán como lengua originaria, ser áreas marginadas y presentar un alto índice de discriminación por parte de las autoridades. Los habitantes han afirmado que sus viviendas sufrieron daños físicos en pisos y muros como resultado de la explosión, lo cual afecta a la seguridad de sus familias.

Otras afectaciones identificadas por la población son: contaminación del ambiente, pérdidas de cosechas, pérdidas en las actividades pesqueras, mayores enfermedades, y mala

calidad del aire (Durán, 2018). Respecto a las cosechas, se encontró que los terrenos utilizados para la agricultura se inundan debido a la temporada de lluvia y que el agua que cubre los terrenos se encuentra contaminada con residuos de petróleo. También se han reportado peces muertos cubiertos con residuos de petróleo. Aunado a lo anterior, los pobladores exponen que se ven afectados indirectamente sus medios de vida ya que pierden sus trabajos e ingresos asociados a las actividades agrícolas y pesqueras.

La opinión pública de las comunidades se ha mostrado en contra de la extracción de petróleo debido a los riesgos a los cuales se encuentran expuestos y que ponen en peligro su bienestar. Adicionalmente, investigadores han detectado el riesgo a la salud representado por el agua contaminada ya que es utilizada para consumo humano y para riego. Complementariamente, se señalan el riesgo ecológico sobre la fauna y flora de la zona.

Afectaciones por proyectos de pellets de madera

A la par del crecimiento en el consumo de biocombustibles sólidos también ha incrementado el número de incidentes asociados a su manejo (Koppejan et al., 2013). Respecto a los pellets de madera, las afectaciones que se han reportado en la literatura se concentran en las fases de almacenamiento y transporte de los pellets. Los riesgos asociados a dichas fases de la cadena de valor de los pellets son: la liberación de gases como monóxido de carbono (CO), CO₂, metano, y compuestos orgánicos volátiles (COV), material particulado, atmósferas asfixiantes y explosivas, y combustión espontánea (Simpson et al., 2016). Desde 2002 han ocurrido al menos nueve fatalidades en el mundo debido a la exposición aguda al CO tras entrar al sitio de almacenamiento (Simpson et al., 2016).

Uno de los accidentes sucedió en Suecia, en 2006, cuando pellets de madera estaban siendo descargados después de ser transportados desde Canadá. Un marinero murió, un estibador resultó seriamente herido y varios rescatistas sufrieron heridas leves después de entrar a una escalera sin ventilación que se encontraba adyacente a una bodega de carga. Tras ser llevados al hospital se determinó que sus afectaciones fueron causadas por la falta de oxígeno y la exposición a CO (Svedberg et al., 2008). Accidentes similares se reportaron en el mismo país en los años 2005, 2006 y 2007 (Svedberg et al., 2009). Otro accidente de la misma naturaleza ocurrió en el Puerto de Rotterdam, Holanda, en 2002, donde un estibador murió y otros trabajadores sufrieron lesiones (Svedberg et al., 2008). En cuanto a exposición crónica a COV y CO, esta ha sido reportada en trabajadores de una fábrica de

pellets tras quejas de trabajadores sobre efectos presentados particularmente mientras laboraban en el almacén de pellets. Entre las afectaciones a la salud reportadas se mencionaron la irritación de los ojos y del sistema respiratorio (Svedberg et al., 2004).

Cabe resaltar que en esta sección se abordaron casos sucedidos en otros países debido a que, hasta el momento en el que se realizó esta investigación, no existe información publicada sobre casos en México.

VI. RIESGOS CLIMÁTICOS Y OPORTUNIDADES

6.1. Metodología

Para evaluar la contribución de la sustitución del uso de coque de petróleo por pellets de madera a los riesgos climáticos de transición y oportunidades de la industria cementera, en primer lugar, se recolectó la información publicada por CEMEX en su Reporte de recomendaciones sobre declaraciones financieras relacionadas con el clima 2021 (TCFD, por sus siglas en inglés, Task Force on Climate-related Financial Disclosure Response). De dicho reporte se extrajo la información sobre los riesgos climáticos y declarados por la empresa. Posteriormente, se analizó cualitativamente si existía una contribución positiva o negativa para la gestión de los riesgos climáticos tanto para el uso de coque, así como para el uso de pellets de madera. Finalmente, se analizaron las oportunidades relacionadas al clima reportadas por CEMEX y las identificadas en esta investigación.

6.2. Resultados y discusión

Se encontró que CEMEX identifica para sus operaciones seis riesgos climáticos, siendo estos dos de Regulación, uno Legal, uno de Tecnología, uno de Mercado y otro de Reputación (Tabla 14). En cuanto a su clasificación en horizonte de tiempo, cuatro son de corto plazo (0 – 3 años), uno de mediano plazo (3 – 6 años) y uno de largo plazo (6 – 35 años). Cabe aclarar que, para los fines de la investigación, se excluirán de la presente discusión las estrategias de reducción de emisiones a partir de la modificación de la materia prima utilizada para la producción de cemento diseñado para la edificación resiliente y/o eficiente energéticamente, así como la tecnología de secuestro, captura y uso de carbono.

Respecto al análisis de la contribución del uso de cada combustible sobre la gestión de los riesgos climáticos, se determinó que el uso de pellets contribuye positivamente para todos los casos y, por el contrario, el uso de coque contribuye negativamente para dicha gestión (Tabla 15). Esto se debe a que la gestión de riesgos climáticos se basa en la reducción de emisiones de GEI. Por lo tanto, los pellets, al ser un bioenergético cuyas emisiones son menores que las de los combustibles fósiles, se encuentran alineados con el objetivo de reducir los riesgos climáticos de la empresa. Además, ya que la mayoría de estos riesgos son de corto plazo, es necesaria la implementación de estrategias que logren una reducción de emisiones en corto tiempo. Si para este caso se toma como año base el año de publicación del reporte de CEMEX, es decir 2021, las estrategias de gestión de riesgos de corto plazo deberían mostrar resultados de reducción de emisiones a más tardar en 2024. La sustitución de coque por pellets de madera presenta la ventaja de ser capaz de contribuir

a la reducción de emisiones necesaria ya que es una alternativa cuyos resultados se verían reflejados en cuanto fuera implementada.

En cuanto a las oportunidades, CEMEX reportó dos oportunidades relacionadas con la oferta de Productos y servicios (Desarrollo de nuevos productos a través de innovación y Desarrollo de productos de bajo carbono) y una asociada a la Fuente de energía utilizada (Uso de fuentes de energía de menores emisiones) (Tabla 16). La sustitución de coque por pellets representaría una estrategia para abordar tanto la oportunidad de Desarrollo de productos de bajo carbono y el Uso de fuentes de energía de menores emisiones. Cabe mencionar que, debido a que la oportunidad de Desarrollo de nuevos productos a través de innovación está orientada a la producción de cemento diseñado para la edificación resiliente y/o eficiente energéticamente, esta fue excluida del análisis por considerarla fuera de los alcances de la investigación.

En cuanto al horizonte de tiempo, una de ellas se contempla para corto plazo (Desarrollo de nuevos productos a través de innovación), una para corto-largo plazo (Desarrollo de productos de bajo carbono) y una para mediano-largo plazo (Uso de fuentes de energía de menores emisiones). Los resultados de reducción de emisiones debido a la sustitución de coque por pellets se podrían obtener en corto plazo, no obstante, para su implementación sería necesario un estudio de factibilidad por parte de la empresa para determinar el grado en el que el proveedor de pellets podría cubrir la demanda de combustible, o en su caso el mapeo y evaluación de proveedores potenciales, la cotización del combustible y del transporte hasta las instalaciones. En caso de que la demanda de combustible sobrepasara la oferta de los proveedores actuales de pellets de madera de residuos forestoindustriales se tendría que analizar la factibilidad de utilizar una mezcla del coque con los pellets; de coque, los pellets y otro tipo de combustible que sea sostenible, o de pellets con otros combustibles sostenibles. Por estas razones se concuerda con CEMEX en que el abordaje de esta oportunidad sea de mediano a largo plazo.

Sobre la magnitud del impacto financiero potencial principal que tendría el aprovechamiento de las oportunidades, se puede observar que el Desarrollo de productos bajos en carbono tendría un impacto alto por el aumento en los ingresos debido al acceso a nuevos y emergentes mercados. Por otro lado, el Uso de fuentes de energía de menores emisiones tendría un impacto mediano debido a la reducción de costos directos. Por lo tanto, el invertir en proyectos como la sustitución de coque por pellets promovería a que en el futuro se

obtuvieran beneficios financieros desde ambos frentes: el acceso a nuevos mercados y a la reducción de costos operacionales.

En cuanto la probabilidad de ocurrencia, es probable que ocurra la Desarrollo de productos de bajo carbono y muy probable el Uso de fuentes de energía de menores emisiones. Por esta razón, la transición de formas de producción menos contaminantes como el uso de pellets sería una alternativa que debería ser considerada por las empresas cementeras ya que puede ser aprovechada desde la actualidad. La disponibilidad actual de esta alternativa podría acelerar el proceso para reducir las emisiones de las operaciones y proveer productos bajos es carbono.

Adicionalmente a lo reportado por CEMEX, se identificaron las siguientes oportunidades relacionadas con los riesgos climáticos:

1. Respecto a la regulación actual, en caso de implementar proyectos para reducir emisiones como lo es el uso de pellets, la empresa tendría la oportunidad de participar en el mercado de carbono como vendedor y obtener ingresos a partir de la venta de derechos de emisión. Se considera que esta oportunidad tiene una aplicabilidad de mediano a largo plazo debido a que primero se deberán implementar los cambios operacionales para el uso de combustibles como los pellets.
2. En el futuro, la empresa podría participar activamente en las negociaciones sobre el establecimiento de regulaciones emergentes, en lugar de tener una participación reactiva o, incluso, de cabildeo. Esta oportunidad tendría una aplicabilidad de mediano a largo plazo puesto que, una vez implementados la transición de uso de combustibles, la empresa tendría el conocimiento práctico de las ventajas, desventajas, retos y posibilidades que implica la reducción de emisiones para este giro industrial y, por lo tanto, tendría una opinión informada en las futuras mesas de negociación.
3. Podría ser una empresa libre de litigios climáticos a mediano y largo plazo puesto que se estarían tomando medidas para reducir su contribución al cambio climático.
4. Tecnológicamente, a mediano y largo plazo la empresa podría establecerse como una cementera innovadora en la oferta de productos bajos en carbono. Esto cobrará cada vez mayor relevancia conforme el mercado vaya incrementando su interés sobre las emisiones de su cadena de suministro.

5. Al implementar el cambio en el uso de combustible a pellets la empresa mejoraría su reputación ante sus agentes de interés ya que estaría respondiendo a los requerimientos emergentes relacionados a las acciones de reducción de emisiones.

Si bien el análisis anterior se encuentra basado en lo reportado por CEMEX, es posible que el resto de las empresas cementeras se enfrenten a riesgos climáticos similares. De igual manera, las oportunidades descritas son aplicables para otras cementeras. No obstante, la escala de análisis provista en reportes de tipo TCFD es a nivel empresarial y debido al enfoque de las Ciencias de la Sostenibilidad es necesario expandir el análisis para incluir otras perspectivas que influyen en la toma de decisiones sobre el consumo de combustible en la industria cementera. Por esta razón, a continuación, se mencionan algunas consideraciones importantes que pueden influir en la elección del tipo de combustible.

Riesgos políticos y legales

Si bien pareciera que la elección del consumo de combustible se basa en factores económicos, cabe resaltar la influencia que la política y legislación ambiental nacional pueden tener. La tendencia de la política y legislación ambiental, previa a la administración pública actual, se caracterizaba por estar orientada hacia la restricción de la emisión de GEI (Ibarra, 2017; Ibarra Sarlat, 2018). Para el caso actual de México, la política ambiental y energética impulsa el consumo de combustibles fósiles, la creación de una nueva refinería, el mantenimiento de refinerías ya existentes. Al mismo tiempo, se ha priorizado la generación de energía eléctrica por parte de la empresa estatal, cuyo mix energético es de origen preponderantemente fósil por sobre las empresas privadas generadoras de energía de fuentes renovables (Banacloche et al., 2020; Guliyev & Solovova, 2020; Hernández Ibarzábal & Bonilla, 2020; Talanquer, 2020). Cabe mencionar que la única fuente de energía renovable que es impulsada es la hidroeléctrica, la cual hasta el momento se ha implementado de forma que pone en duda su sostenibilidad ya que se han reportado conflictos socioambientales asociados a esta en distintas localidades (Barone, 2019; Maher, 2019; Mézquita Alonso et al., 2020; Mézquita et al., 2018; Raftopoulos, 2017; United Nations University, 2012; Vallejos-Romero et al., 2020).

Tabla 14. Riesgos climáticos reportados por CEMEX. Tabla modificada con información de (CEMEX, 2021)

Tipo de Riesgo	Horizonte de tiempo	Descripción
Regulación actual	Corto	Varias de las operaciones de CEMEX actualmente están sujetas a legislación relacionadas al cambio climático, incluyendo sistemas de comercialización de emisiones (Unión Europea, California) e impuestos (por ejemplo, Colombia y México). Dadas las importantes implicaciones que pueden tener hasta pequeños cambios en la libre asignación a nuestras operaciones, por ejemplo, o la escasez generalizada de derechos de emisión, es primordial para CEMEX seguir de cerca los acontecimientos actuales en materia de regulación y ajustar nuestra administración y estrategia de riesgos con base en ello.
Regulación emergente	Corto	CEMEX apoya plenamente la implementación del Acuerdo de París y colabora con gobiernos alrededor del mundo para definir e implementar las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC en inglés). El Grupo de Enfoque en la Regulación de CO2 de CEMEX, que incluye miembros de los departamentos de Asuntos Públicos, Operaciones y Sostenibilidad en cada región, comparte trimestralmente las perspectivas de este trabajo de colaboración que realiza con los gobiernos e identifica cualquier riesgo implícito en las regulaciones emergentes.
Legal	Corto	A pesar de que actualmente no estamos envueltos en ningún litigio relacionado con el cambio climático, es de esperarse que la mayor atención y compromiso que han adoptado los gobiernos para cumplir con las NDC resulte en legislaciones más robustas y en una mayor supervisión del cumplimiento, lo que se traducirá en un aumento en el riesgo de litigación o multas. El departamento Jurídico Central de CEMEX realiza un monitoreo trimestral de todos los temas regulatorios y procedimientos legales que aplican a nuestra compañía, incluyendo los relacionados con el cambio climático.
Tecnología	Largo	La tecnología es el principal factor que puede contribuir a que CEMEX logre reducir significativamente su huella de CO2 en el largo plazo. CEMEX participa en la investigación y desarrollo (I&D) de nuevos productos (como nuestro clínker registrado bajo en CO2) y otros proyectos que emplean nuevas tecnologías para la captura de carbono. CEMEX cuenta con un departamento de I&D que evalúa y valora nuevas tecnologías relacionadas con el cambio climático (propias y externas) y con un equipo multidisciplinario dedicado para evaluar las nuevas tecnologías que hay en el mercado. CEMEX trabaja generalmente bajo el esquema H2020 de la Unión Europea y el nuevo EU Innovation Fund, y también colabora con NPC en Estados Unidos en tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS) que nos pueden servir para administrar los riesgos de transición. Esto se podría considerar como un riesgo en algunas instalaciones en las que la operación podría no ser rentable si no implementamos las nuevas tecnologías.
Mercado	Mediano	Es probable que principal impacto en el mercado sea causado por la regulación. Es probable también que el impacto de los desarrollos en el mercado que no son impulsados por la regulación sea bajo en el corto plazo, y se espera que los cambios se den muy lentamente. Sin embargo, CEMEX ha identificado este tema como clave para el largo plazo ya que tiene el potencial de reformar a la industria, y lo está integrando ya en su estrategia de CO2. Entre las tendencias de mercado que podrían ser relevantes en el mediano plazo se incluye la demanda de productos de bajo carbono o productos con mejor eficiencia energética en edificios, lo que está entre los objetivos que persiguen ciertas iniciativas como, por ejemplo, la Taxonomía de la UE. Nuestro departamento comercial y equipo de I&D siguen muy de cerca la demanda de productos bajos en carbono y de los productos de alta eficiencia como parte de su búsqueda de soluciones innovadoras.
Reputación	Corto	Actualmente, los principales riesgos de reputación se relacionan con nuestros inversionistas, pero no podemos descartar que, en el futuro, también los clientes pudieran basar sus decisiones de compra cada vez más en nuestra reputación. CEMEX mantiene comunicación constante con sus grupos de interés para entender sus puntos de vista y expectativas. Las áreas de Asuntos Públicos, Sostenibilidad y Relación con Inversionistas monitorean este riesgo de forma regular y coordinada. Los canales más importantes en el contexto del cambio climático son: <ul style="list-style-type: none"> • Encuestas periódicas realizadas entre nuestros grupos de interés para evaluar nuestra imagen y matriz de materialidad. • Diálogo con el público inversionista (inversionistas institucionales, analistas financieros y de sostenibilidad). • Revisión de reportes externos como, por ejemplo, los de las ONG, autoridades o medios de comunicación.

Tabla 15. Análisis de contribución por uso de coque de petróleo vs pellets de madera

Tipo de Riesgo	Contribución coque (positiva / negativa)	Razonamiento	Contribución pellets (positiva / negativa)	Razonamiento
Regulación actual	Negativa	Al ser combustible fósil libera más emisiones de CO2e que otros combustibles. Aumenta el riesgo de superar el umbral de los derechos de emisión. Aumenta el riesgo del pago de impuestos y de ser comprador en el mercado de carbono	Positiva	Los bioenergéticos liberan menos emisiones de CO2e que los combustibles fósiles. Reduce el riesgo de superar el umbral de los derechos de emisión y consecuentemente el pago de impuestos.
Regulación emergente	Negativa	Aumentaría el riesgo de incumplimiento en caso de que las regulaciones emergentes reduzcan los umbrales de emisiones permitidos para las cementeras	Positiva	Reduciría el riesgo de incumplimiento de las regulaciones emergentes incluso cuando estas reduzcan los umbrales de emisiones permitidas
Legal	Negativa	Aumenta el riesgo de litigio o multas debido al uso de combustibles altos en emisiones	Positiva	Reduciría el riesgo de litigio y multas al utilizar combustible bajo en emisiones
Tecnología	Negativa	Aumenta el riesgo tecnológico porque al mantener el uso de combustibles altamente emisores limita la reducción de la huella de carbono de los productos y abre la posibilidad de que la competencia ofrezca productos con menor huella de carbono, si es que esta sí implementa el uso de combustibles bajos en carbono durante la producción	Positiva	Reduciría el riesgo tecnológico ya que permite reducir la huella de carbono de los productos
Mercado	Negativa	Aumentaría el riesgo de mercado puesto que limitaría la reducción de la huella de carbono de los productos ofrecidos y, por lo tanto, no estaría alineado con las demandas del mercado	Positiva	Disminuiría el riesgo de mercado puesto que contribuiría a la reducción de la huella de carbono de los productos, consecuentemente, estaría alineado con la demanda del mercado
Reputación	Negativa	Aumentaría el riesgo reputacional puesto que, al ir en contra de las tendencias regulatorias, legales, tecnológicas y de mercado, no estaría alineado con los intereses de los clientes respecto a la adquisición de productos con menor impacto ambiental y esto, a su vez, podría afectar las ganancias. También aumentaría el riesgo de recibir una calificación desfavorable en la evaluación de criterios ASG realizada por las instituciones financieras respecto de los proyectos financiados por los inversionistas.	Positiva	Disminuiría el riesgo reputacional ya que estaría alineado con las tendencias regulatorias, legales, tecnológicas, y de mercado y, con ello, también lo estaría con los intereses de los clientes e inversionistas.

Tabla 16. Oportunidades relacionadas al clima reportadas por CEMEX. Tabla modificada con información de (CEMEX, 2021)

Características	Oportunidad 1	Oportunidad 2
Tipo de oportunidad	Productos y servicios	Fuente de energía
Principal factor de oportunidades relacionadas al clima	Desarrollo y/o expansión de bienes y servicios de bajo carbono	Uso de fuentes de energía de menores emisiones
Horizonte de tiempo	De corto a mediano plazo	Mediano a largo plazo
Magnitud del impacto	Alto	Mediano
Impacto financiero potencial principal	Aumento en los ingresos a través del acceso a mercados nuevos y emergentes	Reducción de costos directos
Probabilidad de que ocurra	Probable	Muy probable

Tabla 17. Oportunidades identificadas en relación con los riesgos climáticos

Tipo de Riesgo	Horizonte de tiempo	Oportunidad
Regulación actual	Mediano – largo plazo	Participar como vendedor en el mercado de carbono y obtener ingresos
Regulación emergente	Mediano – largo plazo	Posibilidad de participar activamente en las negociaciones sobre la modificación de regulaciones en vez de tener una participación reactiva o de cabildeo.
Legal	Mediano – largo plazo	Convertirse en una empresa libre de litigios climáticos
Tecnología	Mediano – largo plazo	Establecimiento como la cementera innovadora en productos bajos en carbono
Mercado	Mediano	Mantenimiento o incremento del portafolio de clientes
Reputación	Corto	Fortalecimiento de relaciones con los grupos de interés

Por otra parte, el cambio en la política ambiental también repercute en el uso de instrumentos económicos como los Mercados de carbono, diseñados para incentivar al sector privado para que se integren en proyectos que busquen reducir las emisiones de GEI de sus actividades para la mitigación del cambio climático. En este caso, las empresas cementeras suelen participar ya sea como compradoras de bonos de carbono, para

subsancar sus emisiones, o como vendedoras en caso de que posean proyectos de reducción de emisiones (p.ej. generación energía a partir de fuentes renovables para autoconsumo). Cabe recordar que los mercados de carbono a escala nacionales e internacional, son instrumentos cuyo marco normativo yace, en origen, en la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático y, actualmente, en el Acuerdo de París, por lo que se espera que continúe su desarrollo e implementación (Ibarra, 2017).

En resumen, la política y legislación ambiental actual de México presentan condiciones que podrían desincentivar la implementación de proyectos de energía sostenible como el que se abordó en esta investigación. No obstante, las tendencias globales sobre las restricciones de emisión de GEI del uso de combustibles fósiles impulsadas por el derecho ambiental internacional marcan compromisos que superan la temporalidad de la administración federal mexicana actual y, por lo tanto, se esperaría que las siguientes administraciones acotaran las decisiones en materia ambiental de acuerdo con los compromisos adquiridos a través de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático y el Acuerdo de París. Bajo esta lógica, la industria cementera deberá alinear sus estrategias de producción para que sean de bajas emisiones de GEI y deberá tomar decisiones basadas en evidencia científica sobre la alternativa energética más conveniente de acuerdo con contexto específico de la empresa e incluso sobre la planta de producción evaluada.

Como se observó en los apartados anteriores, los pellets de madera mostraron un mejor desempeño ambiental respecto a la categoría de Cambio climático, además de mostrar mejor desempeño en otros aspectos ambientales, al igual que en los aspectos sociales relacionados con la producción/distribución del combustible. A partir de lo anterior se demuestra que la sustitución del coque de petróleo por los pellets de madera presenta beneficios potenciales para mitigar los riesgos climáticos políticos y legales de la empresa cementera en contraste con la línea base, bajo el contexto específico evaluado en esta investigación. Si bien se encontraron impactos desfavorables en comparación con el sistema a base de coque de petróleo, existen áreas de oportunidad para la mejora de procesos que permitirían mitigarlos como, por ejemplo, el aumento de la eficiencia energética y una mayor participación de fuentes de energía renovable en el mix de energía eléctrica, que van más allá del caso de estudio analizado en la presente investigación.

Otro aspecto que se ve influenciado por la elección de combustible es la reputación de la empresa consumidora y sus oportunidades comerciales. Es en este punto en donde, nuevamente, las empresas necesitan elegir las alternativas que estén científicamente comprobadas como las mejores. En el caso particular de la empresa cementera, la elección de la sustitución del coque de petróleo por los pellets de madera le haría merecedor de una mejor evaluación en materia de sostenibilidad empresarial y le daría una ventaja sobre el resto de la competencia ya que es más probable que lograra concretar tanto contratos comerciales, así como de inversión. De esta manera el consumo de pellets de madera sería una mejor elección para mitigar los riesgos reputacionales y comerciales de la empresa cementera.

VII. CONSIDERACIONES FINALES

Es importante resaltar que actualmente, y cada vez con más frecuencia, los contratos comerciales presentan cláusulas para que las empresas proveedoras cumplan con criterios ambientales y sociales que se encuentren alineados con los estándares más recientes en materia de sostenibilidad empresarial para que evitar poner en riesgo la reputación de sus contrapartes. Dada la creciente importancia de la evaluación de impactos de sostenibilidad con enfoque de la cadena de suministro, algunos países y regiones, como la Unión Europea, han emitido leyes para regular la actividad de las empresas privadas. Algunos ejemplos de las leyes mencionadas son: Transparency in Supply Chains Act (California, E.U.A.), Modern Slavery Act (Gran Bretaña), Duty of care (Francia) Child Labour Due Diligence Law (Países Bajos) (Harris, 2015; Hoff, 2019; Krajewski et al., 2021; Modern Slavery Act (United Kingdom), 2015) sobre el trabajo infantil o forzado; Transparency Act (Noruega), Sapin II (Francia) sobre la transparencia y el combate a la corrupción (Ministère des Finance et des Comptes Publics, 2016; Act relating to enterprises' transparency and work on fundamental human rights and decent working conditions (Sweden), 2021); Supply chain due diligence act (Alemania) y Corporate Sustainability Due Diligence and amending Directive (Unión Europea) sobre la debida diligencia en materia de derechos humanos y medio ambiente (Cossart et al., 2017; Corporate Sustainability Due Diligence and amending Directive, 2022; International Federation for Human Rights, 2021), entre otras.

Dicho lo anterior, cada vez será más común que las empresas busquen evaluar su desempeño en sostenibilidad y requieran el conocimiento científico y las herramientas metodológicas que les permitan tomar decisiones informadas. En este caso, siendo CEMEX una empresa con presencia global que forma parte de una de las industrias más contaminantes en términos de GEI, será imperante que gestione sus impactos para que pueda concretar contratos comerciales y cumplir los compromisos acordados. Así, la sustitución de coque por pellets de madera le permitiría encaminar sus esfuerzos para lograr la continuidad de su negocio.

Cabe recordar que la reputación de una empresa depende estrechamente de la comunidad en la cual presenta operaciones ya que este agente de interés se ve impactado directamente por las externalidades de la actividad industrial. Dicho lo anterior, el cambio en procesos industriales, como la sustitución de coque por pellets de madera, puede reducir los impactos que recibe la comunidad por la actividad de la planta de CEMEX en Torreón. A su vez, la implementación de procesos con menos impactos puede prevenir la ocurrencia

de conflictos entre la comunidad y la empresa, es decir, puede mejorar la licencia social de la empresa para operar en la comunidad.

Si, por el contrario, la empresa cementera decidiera continuar con el consumo del coque de petróleo a PEMEX, sus riesgos climáticos de transición aumentarían y su sostenibilidad se mermaría ya que estaría apoyando la incidencia de los impactos sobre el ambiente y la sociedad mencionados en las secciones anteriores. En resumidas cuentas, estaría apoyando la continuación de una empresa (PEMEX) que:

1. Presenta más accidentes que la productora de pellets.
2. Contamina el ambiente en diferentes escalas espaciales y temporales y afecta a los ecosistemas.
3. Afecta a la salud de las personas y de la biodiversidad.
4. Afecta a comunidades indígenas.
5. Afecta los modos y medios de vida de las comunidades por la contaminación ocasionada por los accidentes en las plantas de producción de la empresa.
6. Genera afectaciones a otras actividades económicas (agricultura, ganadería y pesca) debido a los derrames de hidrocarburos.
7. Ha recibido demandas por parte de comunidades debido a los daños ambientales ocasionados por los derrames de hidrocarburos.
8. Ha sido parte de actos corruptos y sobornos.
9. Desempeña sus operaciones en zonas que presentan altos grados de inseguridad por la guerra de los carteles y huachicoleros.

Por todas estas razones la empresa cementera, al seguir consumiendo el coque de petróleo de PEMEX, afectaría su relación con la comunidad inmediata, su reputación ante los inversionistas y consumidores, y su desempeño en la gestión de la sostenibilidad empresarial. Además, dicha decisión puede aumentar el riesgo de que la empresa no logre cumplir con los derechos de emisión de GEI otorgados por el gobierno en caso de aprobarse mayores restricciones sobre las emisiones generadas por la industria cementera y aquellos adquiridos ante el resto de la industria cementera. De igual manera, aumentaría sus riesgos financieros ya que estaría en desventaja frente a otras empresas que ofrezcan productos con un menor impacto hacia el ambiente y la sociedad. Por último, económicamente se arriesgaría a enfrentar la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles.

Como se ha podido observar en esta investigación, la elección del consumo de recursos energéticos por parte de las empresas se ve influenciada por aspectos externos, pero al mismo tiempo, es una forma en la que pueden apoyar u obstaculizar la transición energética a nivel nacional y mundial. De esta manera, se muestra que las empresas son un agente de interés capaz de marcar pautas en la gobernanza ambiental y climática. Por lo tanto, es imperante que las empresas cuenten con la asesoría técnica en materia de sostenibilidad para que puedan gestionar sus impactos, riesgos y oportunidades a través de la toma de decisiones basadas en ciencia.

De esta manera, las características que debería presentar un proyecto de bioenergía a partir de residuos con el fin de mejorar su sostenibilidad en términos sociales y ambientales en la industria cementera son los siguientes:

1. **Mitigación del cambio climático.** Se deberá incorporar como objetivo la reducción de emisiones respecto a sistemas energéticos actuales. Se deberá definir la manera y temporalidad en la cual el proyecto contribuirá a la transición a formas de producción menos contaminantes y a que el modelo de negocio sea bajo en emisiones.
2. **Seguridad y Resiliencia energética.** Deberá promover la seguridad y resiliencia energética a través de la utilización de combustible que permita aumentar la diversidad de alternativas, siempre que sea posible y factible.
3. **Mitigación de impactos ambientales directos y potenciales sobre los sistemas terrestres.** Deberá contar con medidas de mitigación de los impactos ambientales directos y potenciales. Además, se deberá contar con medidas para la mitigación de impactos a través de la mejora continua de las operaciones con base en las metodologías más recientes y basado en evidencia científica.
4. **Riesgos y oportunidades relacionados a la naturaleza.** Se deberá incorporar la evaluación de riesgos y oportunidades relacionados a la naturaleza con el fin de ampliar el enfoque y abordar las externalidades que se puedan ocasionar sobre los sistemas terrestres relacionados y no relacionados con el clima.
5. **Net-positive.** En la medida de las posibilidades propias del proyecto, se deberán aplicar estrategias que además de reducir y mitigar los impactos ambientales negativos derivados de éste, promuevan los impactos ambientales positivos.
6. **Género, Diversidad e inclusión.** Los proyectos deberán contar con medidas para prevenir y mitigar la discriminación contra los sujetos protegidos por la ley. Se

deberá promover una plantilla laboral diversa e incluyente. Se deberá prevenir o mitigar la existencia de la brecha salarial por razón de género.

7. **Respeto de derechos humanos de los agentes de interés.** En todo momento se deberán respetar los derechos de todos los agentes de interés asociados al proyecto.
8. **Seguridad e higiene laboral.** Se deberá garantizar la seguridad y salud de la plantilla laboral. Se deberá proveer el equipo de protección personal, la capacitación y ambiente adecuado para que el personal desempeñe sus funciones de manera segura e higiénica.
9. **Salario digno.** No deberá haber condiciones de explotación laboral y el pago otorgado al personal nunca deberá ser menor al salario digno del país donde se desarrolle.
10. **Transición energética socialmente justa.** Se deberá evaluar y vigilar que el proyecto no contribuya a la asimetría de poderes, que obstaculice el acceso a la energía por parte de las comunidades aledañas o que ocasione el desplazamiento de poblaciones, con especial énfasis en comunidades históricamente marginadas.
11. **Respeto a las leyes.** Se respetarán todas las leyes y normas aplicables.
12. **Corrupción.** No se recurrirá a actos corruptos de ningún tipo ya sea en términos de gestión de permisos ante entidades públicas, el financiamiento del proyecto, la asignación de contratos a terceros, etc.
13. **Transparencia y rendición de cuentas.** Se reportará de manera pública y frecuente, con respeto a la regulación de privacidad de la información, la información los impactos ambientales y sociales de proyecto. La información será comunicada de manera oportuna y culturalmente adecuada para la comunidad en la que se desarrollen las operaciones y sobre la cual las externalidades posean una influencia directa.
14. **Verificación y evaluación externa.** La información reportada sobre los resultados de la gestión de impactos ambientales y sociales del proyecto deberá ser sometida a verificación y evaluación por terceras partes con el fin de evaluar la veracidad y el desempeño.
15. **Enfoque de ciclo de vida.** Las condiciones anteriores deberán ser aplicadas para toda la cadena de suministro del proyecto y deberán ser evaluadas con enfoque de ciclo de vida.

- 16. Comunicación con agentes de interés.** Se deberá mantener canales de comunicación de fácil acceso disponibles en los que cualquier grupo de interés pueda denunciar de forma confiable y sin represiones el incumplimiento de las condiciones antes enlistadas. Además, se deberán implementar plataformas para la comunicación sincrónica con los agentes de interés con el fin de generar un espacio de intercambio de saberes y construcción de conocimiento colaborativo.
- 17. Alineación con iniciativas nacionales e internacionales relacionadas con la sostenibilidad empresarial.** El proyecto deberá estar alineado con las iniciativas nacionales e internacionales que propicien la sostenibilidad empresarial ya sean generales o enfocadas a la industria cementera.
- 18. Perspectiva iterativa.** Se deberá vigilar la adecuación de las condiciones antes planteadas de acuerdo con las actualizaciones normativas, políticas, científicas, económicas, sociales y ambientales que se desarrollen en durante el ciclo de vida del proyecto.

VIII Perspectivas

8.1. De la transparencia de las empresas

Es necesario que las empresas se comprometan con los principios de transparencia requeridos para aumente la cantidad y calidad de informes de sostenibilidad disponibles para el público en general. Esto permitiría al investigador acceder a una mayor diversidad de indicadores que son reportados por las empresas y así poder contrastar con mayor detalle el desempeño de las empresas, además de tener acceso a la información sobre los proyectos que las empresas se encuentran implementando para reducir sus impactos. Así, las investigaciones sobre el desempeño de las empresas en ámbitos de la sostenibilidad, como la energía sostenible, podrán realizarse de manera sistemática y será posible analizar tanto el estatus actual, así como las tendencias.

8.2. De los marcos regulatorios para proyectos de bioenergía

Es necesario que se impulsen los avances regulatorios en materia de transición energética y control de emisiones. No obstante, esto será posible en la medida en la que el Estado impulse una política ambiental que esté orientada a cumplimiento de los acuerdos internacionales. De ser así, en el futuro se habrán mejorado los instrumentos económicos que incentiven a las empresas a transitar hacia formas de producción con menos externalidades.

8.3. De la presente investigación

Para futuras investigaciones en la materia se recomendaría la comparación de escenarios que presentaran distintos mix de energía eléctrica para determinar de qué manera se podría lograr un mejor desempeño ambiental en las áreas de mejora del escenario alternativo. De igual manera, se aconsejaría la integración de la evaluación de la disponibilidad de la biomasa, la factibilidad económica e, incluso, la comparación con el uso de los pellets por parte de otras industrias. También, se recomienda el análisis e integración de sets de indicadores que ya son utilizados en la actualidad para evaluar la sostenibilidad de empresas, incluyendo aquellas que cuentan con proyectos de energía de fuentes renovables. Algunos ejemplos de los estándares que pueden utilizarse son: Sustainability Accounting Standards Board (SASB), GRI, Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD), United Nations Principles for Responsible Investment (UNPRI), Dow Jones Sustainability Indices (DJSI). Esto, para dotar de una visión sobre el estado actual de la evaluación de este tipo de proyectos en términos de sostenibilidad, representaría una oportunidad de colaboración entre la academia, empresas privadas y Organizaciones No

Gubernamentales. Lo anterior permitiría el intercambio de conocimiento y perspectivas, lo cual enriquecería las investigaciones, reduciría los sesgos de la academia y propiciaría un mayor acercamiento a la transdisciplina planteada en las Ciencias de la Sostenibilidad.

Finalmente, es imperante que toda investigación, proyecto, política, o regulación jurídica en materia de sostenibilidad tome como base no sólo el ámbito ambiental sino también el social ya que estos se encuentran interrelacionados. Además, es necesario que las investigaciones que pretenden evaluar la sostenibilidad de un proyecto incluyan indicadores sociales diversos ya que el utilizar la generación de empleo como único indicador genera un sesgo que impide tener una visión más completa de la situación. También cabe resaltar la importancia de la integración de metodologías cuantitativas y cualitativas con el fin de enriquecer el análisis y ampliar la perspectiva del evaluador.

IX. CONCLUSIONES

Esta investigación evaluó los potenciales impactos ambientales y sociales de la sustitución del uso de coque de petróleo por pellets de residuos forestoindustriales en la industria cementera. El sistema energético hipotético a base de pellets de madera fue comparado contra el escenario base que ha sido utilizado en la planta de CEMEX en Torreón. Los impactos ambientales fueron cuantificados mediante la aplicación de un ACV, mientras que la evaluación social consistió en el contraste de información sobre el número de empleos generados en la fase de producción del combustible reportada en la literatura científica y en el reporte de sostenibilidad de PEMEX. Posteriormente, a partir de la revisión de literatura se integró y analizó información sobre los impactos ambientales, sociales, políticos y legales de las producción y consumo de ambas opciones de combustibles y sus respectivas implicaciones sobre los riesgos climáticos de transición de la empresa cementera.

El ACV ambiental demostró que el uso de pellets de madera en vez del coque de petróleo es una mejor opción desde el ámbito ambiental. Se tuvo un mejor desempeño en cinco de nueve de las categorías de impacto que fueron evaluadas (Cambio climático, Ozono troposférico, acidificación terrestre, Ecotoxicidad, y Toxicidad humana). Por otra parte, en el ámbito social la generación de empleos de la producción del coque de petróleo es mayor frente a aquella generada por la producción de pellets de madera. No obstante, la limitación del desempeño social a un único indicador genera un sesgo en la evaluación. Adicionalmente, tomando en consideración los factores políticos, legales, mercantiles y reputacionales con perspectiva de ciclo de vida del combustible en la sostenibilidad corporativa, el uso de pellets de madera es más benéfico para la empresa cementera.

En conclusión, el uso de pellets de madera por parte de la empresa cementera presenta más impactos positivos que el uso de coque de petróleo. Además de ser una mejor elección en términos de la sostenibilidad energética para la planta de CEMEX en Torreón, en términos generales, también lo es para gestionar los riesgos climáticos de transición de las empresas cementeras. La articulación de esfuerzos enfocados a la sostenibilidad empresarial permite que se formen relaciones de simbiosis industrial entre empresas, en este caso la industria maderera y cementera, al mejorar el desempeño ambiental y social de ambas y propiciar el desarrollo de la economía circular industrial en México. Este trabajo representa una de las escasas investigaciones que abordan la evaluación de impactos

ambientales y sociales de proyectos energéticos con enfoque de ciclo de vida y dentro del marco de las Ciencias de la Sostenibilidad a nivel nacional.

X. REFERENCIAS

- Acero, A., Rodríguez, C., & Ciroth, A. (2016). *LCIA methods: Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories*. Greendelta.
- Adams, W. (2006). *The Future of Sustainability*.
<https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/Rep-2006-002.pdf>
- Adu, S., Adu, G., Frimpong-Mensah, K., Antwi-Boasiako, C., Effah, B., & Adjei, S. (2014). Maximizing wood residue utilization and reducing its production rate to combat climate change. *International Journal of Plant and Forestry Sciences*, 1(2), 1–12.
https://www.researchgate.net/publication/277009459_MAXIMIZING_WOOD_RESIDUE_UTILIZATION_AND_REDUCING_ITS_PRODUCTION_RATE_TO_COMBAT_CLIMATE_CHANGE
- Álvarez-Godoy, E., Díaz-Aguirre, S., & Alessandrini-Díaz, M. (2001). Utilización racional de los residuos forestales. *Revista Internacional de Silvicultura e Industria Forestales*.
<http://www.fao.org/3/y1237s/y1237s00.htm#TopOfPage>
- Ambuj, S., & Katha, S. (2007, July). Bioenergy and Sustainable Development. *ReCOMMEND*, 1–5.
- Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Feiz, R., Helgstrand, A., & Marshall, R. (2015). Improving the CO2 performance of cement, part III: the relevance of industrial symbiosis and how to measure its impact. *Journal of Cleaner Production*, 98, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.086>
- Aranda, J., & Zabalza, I. (2010). *Ecodiseño y análisis de ciclo de vida*. Pressas Universitarias de Zaragoza.
https://books.google.com.mx/books?id=xFQgktQ6S8EC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=true
- Avalos-Bravo, V., Santos-Reyes, J., & Barragán-Tognola, B. (2019). A preliminary analysis of accident data caused by clandestine takes in Pemex pipelines. In M. Beer & E. Zio (Eds.), *29th European Safety and Reliability Conference* (pp. 30–37). Research Publishing. https://doi.org/10.3850/978-981-11-2724-3_0092-cd
- Baležentis, T., Streimikiene, D., Zhang, T., & Liobikiene, G. (2019). The role of bioenergy in greenhouse gas emission reduction in EU countries: An Environmental Kuznets Curve modelling. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 225–231.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.019>

Balsara, S., Jain, P. K., & Ramesh, A. (2021). An integrated methodology to overcome barriers to climate change mitigation strategies: a case of the cement industry in India. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(16), 20451–20475.

<https://doi.org/10.1007/s11356-020-11566-6>

Banacloche, S., Cadarso, M. A., Monsalve, F., & Lechon, Y. (2020). Assessment of the sustainability of Mexico green investments in the road to Paris. *Energy Policy*, 141, 111458. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111458>

Banco de México - UNEP Inquiry. (2020). *Riesgos y oportunidades climáticas y ambientales del sistema financiero de México. Del diagnóstico a la acción.*

Barone, M. E. (2019). Socio-environmental conflicts and social movements in defense of free rivers. Hydroelectric Project Garabí-Panambí between Argentina and Brazil. *Administración y Organizaciones*, 22(43), 39–51.

<https://doi.org/10.24275/uam/xoc/dcsh/rayo/2019v22n43/Barone>

Bartle, J. R., & Abadi, A. (2010). Toward Sustainable Production of Second Generation Bioenergy Feedstocks †. *Energy & Fuels*, 24(1), 2–9.

<https://doi.org/10.1021/ef9006438>

Battelle. (2002). *Toward a sustainable cement industry*. <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Toward-a-Sustainable-Cement-Industry>

Beaumont-Roveda, E. (1994). Impacto ambiental. In *Caso de Estudio: Autoproducción de Electricidad a partir de residuos de Madera y Leña en la República Argentina*. FAO.

<http://www.fao.org/3/v6204s/v6204s06.htm>

Birindelli, giuliana, Bruno, M., Citterio, A., Fuso, U., Genero, G. L., & Magurano, A. (2022). Banks' governance and risk management frameworks: how to integrate ESG and climate risks. *Risk Management Magazine*, 17(1), 25–35.

<https://doi.org/10.47473/2020rmm0103>

Bjorn, A., Owsianiak, M., Laurent, A., Olsen, S., Corona, A., & Hauschild, M. (2018). Scope Definition. In M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen (Eds.), *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer International Publishing.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>

- Blumer, Y. B., Stauffacher, M., Lang, D. J., Hayashi, K., & Uchida, S. (2013). Non-technical success factors for bioenergy projects—Learning from a multiple case study in Japan. *Energy Policy*, *60*, 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.075>
- Boesch, M. E., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Model for Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Clinker Production. *Environmental Science & Technology*, *43*(19), 7578–7583. <https://doi.org/10.1021/es900036e>
- Böttcher, H., Frank, S., Havlík, P., & Elbersen, B. (2013). Future GHG emissions more efficiently controlled by land-use policies than by bioenergy sustainability criteria. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *7*(2), 115–125. <https://doi.org/10.1002/bbb.1369>
- Buchholz, T., Luzadis, V. A., & Volk, T. A. (2009). Sustainability criteria for bioenergy systems: results from an expert survey. *Journal of Cleaner Production*, *17*, S86–S98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.04.015>
- Caínzos, J., Domínguez, M., & Vázquez, M. (2002). La necesidad de un análisis de ciclo de vida. In P. Ramos & M. Márquez (Eds.), *Avances en calidad ambiental* (p. 652). Ediciones Universidad de Salamanca. <https://books.google.com.mx/books?id=WAGsRdxAGtQC&pg=PA149&dq=análisis+de+ciclo+de+vida&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiQk-Wj-bHqAhVOSK0KHQggCDAQ6AEwCHoECAkQAg#v=onepage&q&f=true>
- Cambero, C., & Sowlati, T. (2014). Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *36*, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.041>
- Canales, Á., Elías, X., & Herrero, M. (2012). Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales. In X. Elías (Ed.), *Reciclaje de residuos industriales* (2da edición, p. 1320). Díaz de Santos. https://books.google.com.mx/books?id=8yWSZEbQSXgC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Castrejón, D., Zavala, A. M., Flores, J. A., Flores, M. P., & Barrón, D. (2018). Analysis of the contribution of CCS to achieve the objectives of Mexico to reduce GHG

- emissions. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 71, 184–193.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.02.019>
- CEMEX. (2021). *Reporte de recomendaciones sobre declaraciones financieras relacionadas con el clima (TCFD) - CEMEX 2021*.
<https://www.cemex.com/documents/20143/57102208/2021-reporte-tcdf-esp.pdf/192bf3ec-fa39-a63d-f402-9e1c83829bea?t=1656625023355>
- Chen, S. (2009). *Life Cycle Assessment of Wood Pellet*. Chamlers University of Technology.
- Commission, E. (2010). *Report from the Commission to the Council and the European Parliament on sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6e598e2a-2655-4ae2-8c20-ef617d5bf3fd/language-en>
- CONAFOR. (2015). *Los bosques tropicales generadores de empleo y beneficios ambientales para millones de personas en el mundo*.
<https://www.gob.mx/conafor/prensa/los-bosques-tropicales-generadores-de-empleo-y-beneficios-ambientales-para-millones-de-personas-en-el-mundo>
- Cornelissen, S., Koper, M., & Deng, Y. Y. (2012). The role of bioenergy in a fully sustainable global energy system. *Biomass and Bioenergy*, 41, 21–33.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.049>
- Cort, T., & Esty, D. (2020). ESG Standards: Looming Challenges and Pathways Forward. *Organization & Environment*, 33(4), 491–510.
<https://doi.org/10.1177/1086026620945342>
- Cossart, S., Chaplier, J., & Beau De Lomenie, T. (2017). The French Law on Duty of Care: A Historic Step Towards Making Globalization Work for All. *Business and Human Rights Journal*, 2(2), 317–323. <https://doi.org/10.1017/bhj.2017.14>
- Cowell, S. J., Fairman, R., & Lofstedt, R. E. (2002). Use of Risk Assessment and Life Cycle Assessment in Decision Making: A Common Policy Research Agenda. *Risk Analysis*, 22(5), 879–894. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00258>
- Dale, V. H., Efroymson, R., & Kline, K. L. (2015). A framework for selecting indicators of bioenergy sustainability. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 9, 435–446.

<https://doi.org/10.1002/bbb>

Dale, V. H., Efroymsen, R., Kline, K. L., Langholtz, M., Leiby, P., Oladosu, G., Davis, M., Downing, M., & Hilliard, M. (2013). Indicator for assessing socioeconomic sustainability of bioenergy systems: A short list of practical measures. *Ecological Indicators*, 26, 87–102.

Dale, V. H., Kline, K. L., Richard, T. L., Karlen, D. L., & Belden, W. W. (2018). Bridging biofuel sustainability indicators and ecosystem services through stakeholder engagement. *Biomass and Bioenergy*, 114, 143–156.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.09.016>

Dehue, B., Cornelissen, S., & Peters, D. (2011). *Indirect effects of fuel production*. Ecofys. <https://www.cbd.int/agriculture/2011-121/EU-Ecofys2-sep11-en.pdf>

den Herder, M., Kolström, M., Lindner, M., Suominen, T., Tuomasjukka, D., & Pekkanen, M. (2012). Sustainability Impact Assessment on the Production and Use of Different Wood and Fossil Fuels Employed for Energy Production in North Karelia, Finland. *Energies*, 5(11), 4870–4891. <https://doi.org/10.3390/en5114870>

Díaz-Chavez, R., Morese, M., Colangeli, M., Fallot, A., Azanha, M., Olénjy, S., Osseweijer, P., & Sibanda, L. (2015). Social considerations. In G. Mendes, R. Victoria, C. Joly, & L. Verdade (Eds.), *Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps* (pp. 528–553). SCOPE.

Domac, J., Richards, K., & Risovic, S. (2005). Socio-economic drivers in implementing bioenergy projects. *Biomass and Bioenergy*, 28(2), 97–106.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.08.002>

Durán, V. (2018). Metodología aplicada en un conflicto ambiental entre PEMEX y las comunidades chontales. *VI Encuentro Latinoamericano de Metodología de Las Ciencias Sociales*, 19.

http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/trab_eventos/ev.12623/ev.12623.pdf

Eisentraut, A. (2010). *Sustainable production of second-generation biofuels*.

http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IQ_biocombustibles_IEA_25607.pdf

Elghali, L., Clift, R., Sinclair, P., Panoutsou, C., & Bauen, A. (2007). Developing a sustainability framework for the assessment of bioenergy systems. *Energy Policy*,

35(12), 6075–6083. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.036>

Elías, X., Fullana, P., García, J., Martín, M., Rigola, M., Roca, M., & Salas, J. (2012).

Clasificación y gestión de residuos. In X. Elías (Ed.), *Reciclaje de residuos industriales* (2da edición, pp. 43–89). Díaz de Santos.

https://books.google.com.mx/books?id=8yWSZEbQSXgC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Er Kara, M., Ghadge, A., & Bititci, U. S. (2021). Modelling the impact of climate change risk on supply chain performance. *International Journal of Production Research*, 59(24), 7317–7335. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1849844>

Corporate Sustainability Due Diligence and amending Directive, (2022). chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclclefindmkaj/https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/1_1_183885_prop_dir_susta_en.pdf

Fahmy, H. (2022). The rise in investors' awareness of climate risks after the Paris Agreement and the clean energy-oil-technology prices nexus. *Energy Economics*, 106, 105738. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105738>

FAO. (n.d.-a). *Energía*. Retrieved December 9, 2019, from <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-post-2015/energy/es/>

FAO. (n.d.-b). *FAO Support to Decision-Making for Sustainable Bioenergy*. FAO. <http://www.fao.org/bioenergy/28392-0a61de8f511d0a4d08b2137bc929214a7.pdf>

FAO. (2019). *Los bosques y la economía circular*. FAO. <http://www.fao.org/3/nb032es/nb032es.pdf>

Fedorova, E., & Pongrácz, E. (2019). Cumulative social effect assessment framework to evaluate the accumulation of social sustainability benefits of regional bioenergy value chains. *Renewable Energy*, 131, 1073–1088. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.070>

Feiz, R., Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Helgstrand, A., & Marshall, R. (2015a). Improving the CO₂ performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 98, 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.083>

- Feiz, R., Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Helgstrand, A., & Marshall, R. (2015b). Improving the CO₂ performance of cement, part II: framework for assessing CO₂ improvement measures in the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 98, 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.103>
- Fernández, J., Gutiérrez, F., del Río, P., San Miguel, G., Bahillo, A., Sánchez, J., Ballesteros, M., Vázquez, J., Aracil, J., & Rodríguez, L. (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética* (G. San Miguel & F. Gutiérrez (eds.)). Ediciones Mundi-Prensa. https://books.google.com.mx/books?id=k9ISCgAAQBAJ&dq=biomasa&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- 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 Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Friederich, D., Kaack, L., Luccioni, A., & Steffen, B. (2021). *Automated Identification of Climate Risk Disclosures in Annual Corporate Reports*. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.01415>
- Fritsche, U., Oeko-Institute, & INASS. (2012). *Sustainable Bioenergy: Key Criteria and Indicators*.
- Fry, M. (2013). Cement, carbon dioxide, and the ‘necessity’ narrative: A case study of Mexico. *Geoforum*, 49, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.06.003>
- Fuel Oil News. (2015). No Global wood pellets market report: wood pellets expected to boom owing to their use as an alternative to fossil fuel. *Fuel Oil News*, 12–13.
- Gamborg, C., Anker, H. T., & Sandøe, P. (2014). Ethical and legal challenges in bioenergy governance: Coping with value disagreement and regulatory complexity. *Energy Policy*, 69, 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.02.013>
- Ganduglia, F., León, J., Gasparini, R., Rodríguez, M., Huarte, G., Estrada, J., & Filgueiras, E. (2009). *Manual de Biocombustibles*. IICA-ARPEL. https://books.google.com.mx/books?id=a2HH8c2IDUYC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=true

- GBEP. (n.d.). *Working together for sustainable development SINCE 2006*. Retrieved December 9, 2019, from <http://www.globalbioenergy.org/>
- GBEP. (2020). *Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy: Implementation Guide*.
- Georgiopoulou, M., & Lyberatos, G. (2018). Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A case study. *Journal of Environmental Management*, 216, 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.017>
- Ghafghazi, S., Sowlati, T., Sokhansanj, S., Bi, X., & Melin, S. (2011). Life cycle assessment of base-load heat sources for district heating system options. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(3), 212–223. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0259-9>
- Giuntoli, C., Jonsson, J., Robert, R., Cazzaniga, N., Jasinevicius, N. E., Avitabile, G., Grassi, V., Barredo, G., & Mubarela, S. (2021). *The use of woody biomass for energy purposes in the EU*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/831621>
- Gómez, D., & Gómez, M. (2013). *Evaluación de impacto ambiental*. Ediciones Mundi-Prensa. https://books.google.com.mx/books?id=9VOuAwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=true
- GRI. (n.d.). *GRI: Our mission & history*. Retrieved February 17, 2021, from <https://www.globalreporting.org/about-gri/mission-history/>
- Güereca, L. P., Torres, N., & Juárez-López, C. R. (2015). The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico. A life-cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 107, 741–748. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.085>
- Guliyev, I. A., & Solovova, Y. V. (2020). Energy industry in Mexico. Policy change and rethinking of energy reform results. *Cuadernos Iberoamericanos*, 8(1), 61–74. <https://doi.org/10.46272/24093416-2020-8-1-61-74>
- Harris, K. (2015). *The California Transparency in Supply Chains Act*. California Department of Justice. <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclcfindmkaj/https://oag.ca.gov/sites/all/files/agweb/>

pdfs/sb657/resource-guide.pdf

Hauschild, M. (2018). Introduction to LCA Methodology. In M. Hauschild, R. Rosenbaum, & S. Olsen (Eds.), *Life Cycle Assessment. Theory and Practice*. (pp. 59–66). Springer International. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>

Hayashi, T., van Ierland, E. C., & Zhu, X. (2014). A holistic sustainability assessment tool for bioenergy using the Global Bioenergy Partnership (GBEP) sustainability indicators. *Biomass and Bioenergy*, 66, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.040>

Helia, U., Reunout, H., Sangwon, S., & Gjalt, H. (2004). Three strategies to overcome the limitations of Life-Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 8(3), 19–32. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/66607078/108819804244235120210423-14659-ovw4te-libre.pdf?1619194093=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DThree_Strategies_to_Overcome_the_Limitat.pdf&Expires=1674269319&Signature=US9j2Uri8RR1iMQ8G3qMMQe9

Hernández Ibarzábal, J. A., & Bonilla, D. (2020). Examining Mexico's energy policy under the 4T. *The Extractive Industries and Society*, 7(2), 669–675. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.03.002>

Hillege, L. (n.d.). *Impact Categories (LCA) - Overview*. Retrieved April 4, 2020, from <https://ecochain.com/knowledge/impact-categories-lca/>

Hitcher, S., Schelhas, J., & Brosius, P. (2016). Snake Oil, Silver Buckshot, and People Who Hate Us: Metaphors and Conventional Discourses of Wood-based Bioenergy in the Rural Southeastern United States. *Human Organization*, 75(3), 204–217. [https://doi.org/0018-7259/16/030204-14\\$1.90/1](https://doi.org/0018-7259/16/030204-14$1.90/1)

Hoff, A. (2019). *Dutch child labour due diligence law: a step towards mandatory human rights due diligence*. <https://ohrh.law.ox.ac.uk/dutch-child-labour-due-diligence-law-a-step-towards-mandatory-human-rights-due-diligence/>

Hossain, M. U., Leu, S.-Y., & Poon, C. S. (2016). Sustainability analysis of pelletized bio-fuel derived from recycled wood product wastes in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 113, 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.069>

Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M. C., & Cheng, J. C. P. (2017). Comparative LCA on

- using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 199–208.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.012>
- Hossain, M. U., Poon, C. S., Wong, M., & Khine, A. (2019). Techno-environmental feasibility of wood waste derived fuel for cement production. *Journal of Cleaner Production*, 230, 663–671. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.132>
- Huang, Q., & Lin, M. (2022). Do climate risk beliefs shape corporate social responsibility? *Global Finance Journal*, 53, 100739. <https://doi.org/10.1016/j.gfj.2022.100739>
- Hudson, B. (2019). Woody Biomass and Electricity in the United States: A Case Study in Scientific and Policy Uncertainty. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3437332>
- Ibarra, R. (2017). La transición energética global: de la era del petróleo a las energías renovables. In O. Gutierrez, D. Jerez, P. Ligreni, L. López, R. Sánchez, & V. Vidal (Eds.), *La gobernanza climática en México: aportes para la consolidación estructural de la participación ciudadana en la política climática nacional* (pp. 55–75). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.pincc.unam.mx/wp-content/uploads/2021/05/2017-gobernanza-climatica-mexico-vol-1.pdf>
- Ibarra Sarlat, R. (2018). El impulso de las energías renovables en la lucha contra el cambio climático a través de los certificados ambientales en el sector eléctrico mexicano. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, 1(152).
<https://doi.org/10.22201/ijj.24484873e.2018.152.12918>
- IEA Bioenergy. (2009). *Bioenergy: A sustainable and reliable energy source* [Reporte]. IEA Bioenergy. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/MAIN-REPORT-Bioenergy-a-sustainable-and-reliable-energy-source.-A-review-of-status-and-prospects.pdf>
- IEA Bioenergy. (2010). *Economic and Social Drivers for Optimal Bioenergy Implementation*.
- IEA Bioenergy. (2020). *The use of forest biomass for climate change mitigation: dispelling some misconceptions*. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/08/The-use-of-biomass-for-climate-change-mitigation-dispelling-some-misconceptions-August-2020-Rev1.pdf>

- In, S. Y., Manav, B., Venereau, C. M. A., Cruz R., L. E., & Weyant, J. P. (2022). Climate-related financial risk assessment on energy infrastructure investments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112689.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112689>
- INECC-SEMARNAT. (2018a). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015*. [Reporte]. SEMARNAT.
- INECC-SEMARNAT. (2018b). *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. https://cambioclimatico.gob.mx/sexta-comunicacion/emisiones_y_gases.php
- INECC. (n.d.). *Pérdida y alteración de los ecosistemas*. SEMARNAT.
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/574/cap2.pdf>
- INECC. (2020). *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019*. chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fsinai.inecc.gob.mx%2Farchivo%2Finformes%2Finforme2019.pdf&clen=57018586&chunk=true
- International Federation for Human Rights. (2021). *Germany: call for an improvement of the Supply Chain Due Diligence Act*. Globalisation & Human Rights.
<https://www.fidh.org/en/issues/globalisation-human-rights/germany-call-for-an-improvement-of-the-supply-chain-due-diligence-act#:~:text=The Supply chain due diligence act was adopted by the,companies and their value chains.>
- IPCC. (2012). *Renewable energy sources and climate change mitigation. Summary for policymakers and technical summary* (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Marschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, & C. von Stechow (eds.)). Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2019). *Calentamiento global de 1.5 °C*. chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- IRENA, IEA Bioenergy, & FAO. (2017). *Bioenergy for Sustainable Development*.
- ISO. (2010). *ISO 26000:2010 Guía de responsabilidad social*. 4.

<https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:26000:ed-1:v1:es>

Jeihanipour, A., & Bashiri, R. (2015). Perspective of Biofuels from Wastes. In K. Karimi (Ed.), *Lignocellulose-Based Bioproducts: Biofuel and Borefinery Technologies* (pp. 37–83). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14033-9_2

Jiménez, T. (2016). *Evaluación ambiental de alternativas tecnológicas de aprovechamiento energético de residuos forestales mediante Análisis de Ciclo de Vida*. Universidad de Chile.

Jones, N. P., & Sullivan, J. (2019). Huachicoleros: Criminal Cartels, Fuel Theft, and Violence in Mexico. *Journal of Strategic Security*, 12(4), 1–24. <https://doi.org/10.5038/1944-0472.12.4.1742>

Kanagaretnam, K., Lobo, G., & Zhang, L. (2022). Relationship Between Climate Risk and Physical and Organizational Capital. *Management International Review*, 62(2), 245–283. <https://doi.org/10.1007/s11575-022-00467-0>

Kara, M. (2012). Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 21–28. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.011>

Klein, D., Wolf, C., Schulz, C., & Weber-Blaschke, G. (2015). 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(4), 556–575. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0847-1>

Koopmans, A., & Koppejan, J. (1997). *Agricultural and forest residues generation, utilization and availability*. Regional Wood Energy Development Programme in Asia. http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/p_residues.pdf

Koppejan, J., Lönnermark, A., Persson, H., Larsson, I., Blomqvist, P., Arshadi, M., Valencia-Reyes, E., Melin, S., Howes, P., Wheeler, P., Baxter, D., & Nikolaisen, L. (2013). *Health and safety aspects of solid biomass storage transportation and feeding*.

Krajewski, M., Tonstad, K., & Wohltmann, F. (2021). Mandatory Human Rights Due Diligence in Germany and Norway: Stepping, or Striding, in the Same Direction?

Business and Human Rights Journal, 6(3), 550–558.

<https://doi.org/10.1017/bhj.2021.43>

Landa, M. S. (2016). Crude residues: The workings of failing oil infrastructure in Poza Rica, Veracruz, Mexico. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 48(4), 718–735. <https://doi.org/10.1177/0308518X15594618>

Lyfe Cycle Initiative. (2013). *The metodological sheets for sub-categories in social life cycle assessment (S-LCA)*.

Maderas y Materiales San Mateo. (2021). *Maderas y Materiales San Mateo*.

<https://mmsanmateo.com/>

Maher, R. (2019). Pragmatic community resistance within new indigenous ruralities: Lessons from a failed hydropower dam in Chile. *Journal of Rural Studies*, 68, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.03.009>

Marcianó, C., & Menguzzato, G. (2012). *Bioenergy and Sustainable Forestry: good practices in Italy and Finland* (C. Marcianó & G. Menguzzato (eds.)). Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria.

Mathioudakis, D., Karageorgis, P., Papadopoulou, K., & Lyberatos, G. (2021). LCA and LCC of dried and shredded food waste as an alternative fuel for the cement industry. *Waste Management & Research*, 1–6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0734242X21992>

Mézquita Alonso, I., Ruelas Monjardín, L. C., & Hernández Cortez, N. (2020). Hacia una tipología de conflictos socioambientales en hidroeléctricas: experiencias de casos mexicanos y colombianos. *Revista Temas Sociológicos*, 27, 309–344. <https://doi.org/10.29344/07196458.27.2443>

Mézquita, I., Ruelas, L., & Hernández, N. (2018). Conflictos socioambientales por construcción de hidroeléctricas: análisis de casos. In *Sustentabilidad del desarrollo: desafíos y propuestas* (pp. 99–112). Secretaría de Educación de Veracruz. https://www.researchgate.net/publication/328626283_Conflictos_socioambientales_por_construccion_de_hidroelectricas_analisis_de_casos

Ministère des Finance et des Comptes Publics. (2016). *Transparency, anti-corruption and economic modernisation bill*. République Française. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.economie.gouv.fr/files/files/PDF/transparency-bill-march2016.pdf

Act relating to enterprises' transparency and work on fundamental human rights and decent working conditions (Sweden), (2021).

<https://lovdata.no/dokument/NLE/lov/2021-06-18-99>

Modern Slavery Act (United Kingdom), (2015).

<https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2015/30/introduction/enacted>

Mokrzycki, E., & Uliasz-Bochenczyk, A. (2003). Alternative fuels for the cement industry. *Applied Energy*, 74, 95–100.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261902001356>

Murphy, J., Smith, P., & Wiedenbeck, J. (2007). Wood residue utilization in Pennsylvania:1998 vs. 2003. *Forest Products Journal*, 57(4), 101–106.

<https://search.proquest.com/openview/937953d7e336459e339223d1dad83ba4/1?pq-origsite=gscholar&cbl=25222>

Musule, R., Núñez, J., Bonales-Revuelta, J., García-Bustamante, C. A., Vázquez-Tinoco, J. C., Masera-Cerutti, O. R., & Ruiz-García, V. M. (2021). Cradle to Grave Life Cycle Assessment of Mexican Forest Pellets for Residential Heating. *BioEnergy Research*. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10337-6>

Nielsen-Pincus, M., & Moseley, C. (2009). *Social Issues of Woody Biomass Utilization: A Review of the Literatura*.

ONU. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development*.

<https://digitallibrary.un.org/record/139811#record-files-collapse-header>

Pa, A., Bi, X. T., & Sokhansanj, S. (2011). A life cycle evaluation of wood pellet gasification for district heating in British Columbia. *Bioresource Technology*, 102(10), 6167–6177.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.009>

Padilla-Rivera, A., Barrette, J., Blanchet, P., & Thiffault, E. (2017). Environmental Performance of Eastern Canadian Wood Pellets as Measured Through Life Cycle Assessment. *Forests*, 8(9), 352. <https://doi.org/10.3390/f8090352>

Patiño, J., & Smith, R. (2008). Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistémico. *Revista Energética*, 39, 19–34.

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/23937/9401-16103-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PEMEX. (2021). *Acerca de Pemex*. <https://www.pemex.com/acerca/Paginas/default.aspx>

Petersen Raymer, A. K. (2006). A comparison of avoided greenhouse gas emissions when using different kinds of wood energy. *Biomass and Bioenergy*, 30(7), 605–617. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.01.009>

Porsö, C., & Hansson, P.-A. (2014). Time-dependent climate impact of heat production from Swedish willow and poplar pellets – In a life cycle perspective. *Biomass and Bioenergy*, 70, 287–301. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.09.004>

Pu, Y., Zhang, D., Singh, P., & Ragauskas, A. (2017). The new forestry biofuels sector. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2(1), 58–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bbb.48>

Puettmann, M., & Lippke, B. (2012). Woody Biomass Substitution for Thermal Energy at Softwood Lumber Mills in the Us Inland Northwest. *Forest Products Journal*, 62(4), 273–279.

Raftopoulos, M. (2017). Contemporary debates on social-environmental conflicts, extractivism and human rights in Latin America. *The International Journal of Human Rights*, 21(4), 387–404. <https://doi.org/10.1080/13642987.2017.1301035>

Ramirez-Contreras, N. E., & Faaij, A. P. C. (2018). A review of key international biomass and bioenergy sustainability frameworks and certification systems and their application and implications in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 460–478. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.001>

Reboredo, J. C., & Otero, L. A. (2021). Are investors aware of climate-related transition risks? Evidence from mutual fund flows. *Ecological Economics*, 189, 107148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107148>

Ren, X., Li, Y., Shahbaz, M., Dong, K., & Lu, Z. (2022). Climate risk and corporate environmental performance: Empirical evidence from China. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 467–477. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.023>

Reza, B., Soltani, A., Ruparathna, R., Sadiq, R., & Hewage, K. (2013). Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement

plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. *Resources, Conservation and Recycling*, 81, 105–114.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.009>

Rincón, J., & Silva, E. (2015). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía.

https://books.google.com.mx/books?id=YpnxCAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=true

Romero, P. (2012). *Ciclo de vida de los productos. Diseño y análisis para la innovación sostenible*. Universidad Nacional de Colombia.

https://books.google.com.mx/books?id=JOtDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Saleh, M., & Abo-Elyazeed, O. (2017). *Utilization of Biomass as an Alternative Fuel in Cement Industry*.

https://www.researchgate.net/publication/333811830_Utilization_of_Biomass_as_an_Alternative_Fuel_in_Cement_Industry

Saosee, P., Sajjakulnukit, B., & Gheewala, S. (2020). Life Cycle Assessment of Wood Pellet Production in Thailand. *Sustainability*, 12(17), 6996.

<https://doi.org/10.3390/su12176996>

Scarlat, N., & Dallemand, J.-F. (2011). Recent developments of biofuels/bioenergy sustainability certification: A global overview. *Energy Policy*, 39(3), 1630–1646.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.039>

Schulze, E.-D., Körner, C., Law, B. E., Haberl, H., & Luysaert, S. (2012). Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. *GCB Bioenergy*, 4(6), 611–616.

<https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01169.x>

SEMARNAT. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/555093/DiagnosticoBasicoGestionIntegralResiduosF.pdf.pdf>

SENER. (2013). *Atlas Nacional de Biomasa*.

<https://dgel.energia.gob.mx/ANBIO/mapa.html?lang=es>

- Sgarbossa, A., Boschiero, M., Pierobon, F., Cavalli, R., & Zanetti, M. (2020). Comparative Life Cycle Assessment of Bioenergy Production from Different Wood Pellet Supply Chains. *Forests*, 11(11), 1127. <https://doi.org/10.3390/f11111127>
- Sikkema, R., Steiner, M., Junginger, M., Hiegl, W., Hansen, M., & Faaij, A. (2011). The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 5, 250–278. <https://doi.org/10.1002/bbb.277>
- Simpson, A. T., Hemingway, M. A., & Seymour, C. (2016). Dangerous (toxic) atmospheres in UK wood pellet and wood chip fuel storage. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(9), 699–707. <https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1167279>
- Smeets, E. M. W., & Faaij, A. P. C. (2007). Bioenergy potentials from forestry in 2050. *Climatic Change*, 81(3–4), 353–390. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9163-x>
- Sobehart, J. (2022). Quantifying climate risk uncertainty in competitive business environments. *Journal of Risk Management in Financial Institutions*, 15, 26–37. <https://hstalks.com/article/6803/quantifying-climate-risk-uncertainty-in-competitiv/>
- Sokka, L., Lehtoranta, S., Nissinen, A., & Melanen, M. (2011). Analyzing the Environmental Benefits of Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 15(1), 137–155. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00276.x>
- Soto, L. A., Botello, A. V., Licea-Durán, S., Lizárraga-Partida, M. L., & Yáñez-Arancibia, A. (2014). The environmental legacy of the Ixtoc-I oil spill in Campeche Sound, southwestern Gulf of Mexico. *Frontiers in Marine Science*, 1. <https://doi.org/10.3389/fmars.2014.00057>
- Stafford, F., Viquez, M., Labrincha, J., & Hotza, D. (2015). Advances and challenges for the co-processing in Latin American cement industry. *Procedia Material Science*, 9, 571–577. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.05.032>
- Strazza, C., Del Borghi, A., Gallo, M., & Del Borghi, M. (2011). Resource productivity enhancement as means for promoting cleaner production: analysis of co-incineration in cement plants through a life cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 19(14), 1615–1621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.05.014>
- Svedberg, U., Högberg, H.-E., Högberg, J., & Galle, B. (2004). Emission of Hexanal and

- Carbon Monoxide from Storage of Wood Pellets, a Potential Occupational and Domestic Health Hazard. *The Annals of Occupational Hygiene*, 48(4), 339–349. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meh015>
- Svedberg, U., Petrini, C., & Johanson, G. (2009). Oxygen Depletion and Formation of Toxic Gases following Sea Transportation of Logs and Wood Chips. *The Annals of Occupational Hygiene*, 53(8), 779-787. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mep055>
- Svedberg, U., Samuelsson, K., & Melin, S. (2008). Hazardous Off-Gassing of Carbon Monoxide and Oxygen Depletion during Ocean Transportation of Wood Pellets. *The Annals of Occupational Hygiene*, 52(4), 259–266. <https://doi.org/10.1093/annhyg/men013>
- Symons, K. (2012). *How Bioenergy can help local communities adapt to climate change: lesson from Nyanza Province, Kenya*. Policy Innovation Systems for Clean Energy Security. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/57a08a53ed915d3cfd0006de/bioenergy-nyanza-climatechange_DEF.pdf
- Talanquer, M. S. (2020). Mexico 2019: Personalistic Politics and Neoliberalism from the Left. *Revista de Ciencia Política (Santiago)*, ahead, 0–0. <https://doi.org/10.4067/S0718-090X2020005000113>
- Taticchi, P. (2013). Sustainability Measurement and Reporting: Impacts on Finance, Stakeholders Communication and Internal Measurement Practices. In P. Taticchi, P. Carbone, & V. Albino (Eds.), *Corporate Sustainability* (pp. 221–231). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37018-2_10
- Tauro, R. (2018). *Pellets de residuos agroindustriales y forestales: Evaluación de factibilidad para la generación de energía térmica*. UNAM.
- Tauro, R., Ghilardi, A., García, C. A., & Masera, O. (2016). Recursos biomásicos. In C. A. García & O. Masera (Eds.), *Estado del arte de la bioenergía en México* (pp. 15–23). Red Temática de Bioenergía del Conacyt.
- TCFD. (2017). *Recomendaciones del grupo de trabajo sobre declaraciones financieras relacionadas con el clima*. <https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2020/10/TCFD-2017-Final-Report-Spanish-Translation.pdf>

- TCFD. (2022). *Task Force on Climate-related Financial Disclosures*.
<https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2022/12/tcf-2022-overview-booklet.pdf>
- Tourkolias, C., & Mirasgedis, S. (2011). Quantification and monetization of employment benefits associated with renewable energy technologies in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2876–2886.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.027>
- Trossero, M. (2002). Dendroenergía: perspectivas de futuro. *Unasyuva*, 53.
<http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/005/y4450s/y4450s02.pdf>
- UABio. (2016). *Analysis of criteria for the sustainable development of bioenergy*.
www.uabio.org/activity/uabio-analytics
- UN Climate Change. (2017). *Bigger Climate Action Emerging in Cement Industry*.
<https://unfccc.int/news/bigger-climate-action-emerging-in-cement-industry>
- UNEP. (2009). *Towards sustainable production and use of resources: Assessing biofuels*. [Reporte]. UNEP.
https://www.researchgate.net/publication/291774277_Towards_sustainable_production_and_use_of_resources_assessing_biofuels
- UNEP. (2012). *Modern Bioenergy: One of the game changers for Achieving universal access to modern energy services*. UNEP.
http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/2012_-_UNEP_-_Modern_bioenergy_one_of_the_game_changers_for_achieving_universal_access_to_modern_energy_services.pdf
- UNEP FI. (2021). *The Climate Risk Landscape*.
<https://www.unepfi.org/publications/banking-publications/the-climate-risk-landscape/>
- United Nations University. (2012). *The Rise of Post-Hegemonic Regionalism* (P. Ruggirozzi & D. Tussie (eds.)). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2694-9>
- Valente, C., Spinelli, R., & Hillring, B. G. (2011). LCA of environmental and socio-economic impacts related to wood energy production in alpine conditions: Valle di Fiemme (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 19(17–18), 1931–1938.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.06.026>
- Vallejos-Romero, A., Cordoves-Sánchez, M., Jacobi, P., & Aledo, A. (2020). In transitions

- we trust? Understanding citizen, business, and public sector opposition to wind energy and hydropower in Chile. *Energy Research & Social Science*, 67, 101508. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101508>
- Vallesi, M., D'Andrea, A., & Kumar, V. (2012). Evaluation of sustainable accounting practices in the Italian bioenergy sector. *PAGRI*, 3, 45–62. https://www.researchgate.net/publication/273626795_Evaluation_of_Sustainable_Accounting_Practices_in_THE_Italian_Bioenergy_Sector
- van der Horst, D., & Vermeylen, S. (2011). Spatial scale and social impacts of biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, 35(6), 2435–2443. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.029>
- Vera-Martínez, P. (2017). La cadena del valor de la industria del cemento en México. In P. Vera (Ed.), *Cadenas de valor y sostenibilidad en Latinoamérica* (pp. 164–194). UNAM.
- Wang, C., Chang, Y., Zhang, L., Pang, M., & Hao, Y. (2017). A life-cycle comparison of the energy, environmental and economic impacts of coal versus wood pellets for generating heat in China. *Energy*, 120, 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.085>
- Wei, D., & Marshall, C. (2018). *Climate and Supply Chain: The Business Case for Action*. https://www.bsr.org/reports/BSR_Climate_and_Supply_Chain_Management.pdf
- Wilson, D., & Chang, C. (2003). CEMEX promotes a sustainable approach with manufacturing excellence. *Environmental Quality Management*, 12(4), 23–34. <https://doi.org/10.1002/tqem.10083>
- Wolf, C., Klein, D., Weber-Blaschke, G., & Richter, K. (2016). Systematic Review and Meta-Analysis of Life Cycle Assessments for Wood Energy Services. *Journal of Industrial Ecology*, 20(4), 743–763. <https://doi.org/10.1111/jiec.12321>
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26(1), 303–329. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- Zaragoza, A. (2010). Circuito cerrado para una industria sostenible, aportaciones del sector cementero. *Informes de La Construcción*, 62(517), 53–59.

<https://doi.org/10.3989/ic.08.046>

Zhang, L., & Mabee, W. E. (2016). Comparative study on the life-cycle greenhouse gas emissions of the utilization of potential low carbon fuels for the cement industry.

Journal of Cleaner Production, 122, 102–112.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.019>

Zhong, Z., & Peng, B. (2022). Can environmental regulation promote green innovation in heavily polluting enterprises? Empirical evidence from a quasi-natural experiment in China. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 815–828.

<https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.01.017>