

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS AMBIENTAL

3.1 Principales contaminantes

3.1.1 Sostenibilidad

El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, de satisfacer sus propias necesidades. Ésto involucra dos conceptos claves:

1) El concepto de 'necesidades', en particular de las necesidades esenciales del sector mas pobre del mundo, para los cuales debe haber una prioridad primordialmente. 2) La idea de las limitaciones impuestas por las tecnologías actuales y la organización social, en la capacidad del medio ambiente para satisfacer las presentes y futuras necesidades.

Así las metas del desarrollo social y económico deben ser definidas en términos de la sostenibilidad en todos los países desarrollados o en vías de desarrollo, con mercado-orientado o planeado centralmente. Las interpretaciones serán muchas, pero deberán compartir ciertas características generales y deben fluir, desde un consenso en el concepto básico de desarrollo sostenible, en un marco general estratégico para conseguirlo.

El desarrollo involucra una transformación progresiva de la sociedad y la economía. La vía de desarrollo que es sostenible en un sentido físico podría teóricamente ser buscada inclusive en un escenario político y social rígido (WCED, 1987). Pero la sostenibilidad física no puede ser asegurada a menos que las políticas de desarrollo pongan su atención a tales consideraciones, como cambios en el acceso a los recursos y en la distribución de los costos y beneficios. Incluso la pequeña noción de la sostenibilidad física implica un asunto de equidad social entre generaciones, un asunto que debe ser lógicamente extendido a la igualdad entre cada generación.

La satisfacción de las necesidades y aspiraciones de los seres humanos es el mayor objetivo del desarrollo. Las necesidades primordiales del vasto número de habitantes en los países en desarrollo por comida, ropa, refugios, trabajos, aún no están siendo satisfechos y más allá de sus necesidades básicas, estas personas tienen aspiraciones válidas por una mejor calidad de vida. Un mundo en el cual la pobreza y la desigualdad son endémicas siempre será propenso a crisis ecológicas y de otras índoles.

Los niveles de vida que van más allá del mínimo básico son sustentables solo si el nivel del consumo donde quiera que sea, tiene un sentido amplio de la sostenibilidad. Aún así muchos de nosotros vivimos más allá de los concernientes ecológicos, por ejemplo, en los modelos del uso de la energía. Las necesidades percibidas, son socialmente y culturalmente determinadas, y el desarrollo sostenible requiere la promoción de los valores que fomenten el nivel de consumo que se encuentre dentro de los límites ecológicos posibles y razonablemente deseados.

Satisfacer las necesidades esenciales depende, en parte de conseguir el total crecimiento potencial y el desarrollo sostenible, claramente requiere de un crecimiento económico en los lugares donde tales necesidades no han sido satisfechas. En cualquier lugar, ésto puede ser consistente con un crecimiento económico, provisto dicho crecimiento refleja los principios generales de la sostenibilidad y la no explotación de otros. Pero el crecimiento por sí mismo no es suficiente, los altos niveles de la actividad productiva y la pobreza extendida pueden coexistir, y pueden poner en peligro el medio ambiente. Debido a que el desarrollo sostenible requiere que las sociedades satisfagan las necesidades humanas, ambas, aumentando el potencial productivo y asegurando oportunidades equitativas para todos.

Una expansión de población, puede incrementar la explotación de los recursos y disminuir los niveles de vida en las áreas donde la privación es extensa. El asunto no es simplemente por el

tamaño de la población, si no por la distribución de los recursos, el desarrollo sostenible puede únicamente ser perseguido, si el desarrollo demográfico está en armonía con los cambios potenciales productivos del ecosistema. La sociedad puede poner en riesgo de muchas formas, su capacidad de satisfacer las necesidades esenciales de las personas en un futuro, por ejemplo, debido a la sobreexplotación de los recursos. La dirección de los desarrollos tecnológicos puede resolver algunos de los problemas inmediatos, pero también resolver algunos de mayor índole. Grandes secciones de la población pueden ser marginadas por su bajo nivel de desarrollo.

La erosión de los suelos, los desvíos del curso del agua, la extracción de los minerales, las emisiones de calor y gases nocivos en la atmósfera, el comercio forestal, las manipulaciones genéticas, son ejemplos de la intervención humana en los sistemas naturales durante el curso del desarrollo. Hasta hace poco, tales intervenciones eran pequeñas en escala, y su impacto limitado. Actualmente tales intervenciones son más drásticas en escala e impacto, y más amenazante para los sistemas de supervivencia tanto localmente como globalmente (WCED, 1987). Como mínimo, el desarrollo sostenible no debe poner en peligro los sistemas naturales de supervivencia en todo el planeta: La atmósfera, las aguas, los suelos y a los seres humanos.

El crecimiento económico y desarrollo obviamente involucran cambios físicos en el ecosistema. Cada ecosistema de cualquier región, no puede ser preservado intacto, un bosque puede ser mermado en un momento clave y ampliado en otro sitio, lo cual no es malo mientras que la explotación haya sido planificada y los efectos en el ritmo de la erosión del suelo, el comportamiento del agua y las pérdidas genéticas hayan sido tomadas en cuenta. En general, los recursos renovables como los bosques, y los bancos de peces necesitan no ser mermados, explotándolos a un ritmo dentro de los límites de la regeneración y su crecimiento natural. Pero la mayoría de los recursos renovables son parte de un ecosistema complejo e interrelacionado, y el máximo rendimiento sostenible debe ser definido después de tomar en cuenta los grandes efectos en el sistema, provenientes de la explotación.

Por lo que respecta a los recursos no renovables, como los combustibles fósiles y los minerales, su uso reduce las reservas disponibles para las futuras generaciones. Pero esto, no significa que tales recursos no deben ser utilizados, en general el ritmo de agotamiento debería tomar en cuenta, lo críticos e importantes que son dichos recursos, la disponibilidad de las tecnologías para la minimización de los agotamientos, y la probabilidad de sustitutos estén disponibles. Así la tierra no debería ser degradada más allá de su recuperación. Con los minerales y los combustibles fósiles, el ritmo de agotamiento y el énfasis en el reciclaje y la economía de su uso, debería ser calibrado para asegurarse que los recursos no se agoten antes de asegurarse que los sustitutos ya están disponibles. El desarrollo sostenible requiere que el ritmo de agotamiento de los recursos no renovables debería detenerse como nuevas futuras opciones como sea posible.

El desarrollo tiende a simplificar los ecosistemas y a reducir su diversidad de especies, y las especies una vez extintas, no son renovables. La pérdida de especies de flora y fauna puede limitar las opciones de las futuras generaciones, así el desarrollo sostenible requiere la conservación de todas las especies. Los llamados productos gratuitos como el agua y el aire son también recursos. Las materias primas y la energía de los procesos de producción son solo parcialmente convertidas a productos útiles. El resto sale como desperdicios, el desarrollo sostenible requiere que los impactos adversos de la calidad del aire, agua, y otros elementos naturales sean minimizados al grado de sustentar la integridad total de los ecosistemas.

En esencia, el desarrollo sostenible es un proceso de cambio en el cual la explotación de los recursos, la dirección de las inversiones, la orientación del desarrollo tecnológico y los cambios institucionales estén todos en armonía y mejora ambas, para el futuro potencial y actual para satisfacer las necesidades y deseos de los seres humanos.

El desarrollo sostenible requiere de métodos y herramientas para medir y comparar los impactos ambientales de las actividades humanas en varios productos (mercancías y servicios). Con el

abastecimiento de dichas mercancías y servicios a la sociedad, contribuyen a generar un amplio rango de impactos ambientales. Los impactos ambientales son por ejemplo, las emisiones al ambiente, el consumo de los recursos, así como otras intervenciones, tales como el uso de suelo, etc. El análisis de ciclo de vida es una técnica para evaluar las cargas ambientales de un producto o un sistema.

3.1.2 Análisis de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una técnica para evaluar varios aspectos asociados con el desarrollo de un producto y su impacto potencial, a través de la vida del producto, desde adquisición sin tratamiento del material, el proceso, la manufactura, uso, y finalmente su desecho. Los análisis de ciclo de vida deberían sistemáticamente y adecuadamente dirigir los impactos ambientales de los productos o sistemas. La profundidad de los detalles y el marco temporal de estudio del análisis de ciclo de vida, puede variar y extenderse, dependiendo de la meta y alcance. El alcance, las suposiciones, la descripción y la calidad de la información, las metodologías y salida de información de los estudios del análisis del ciclo de vida deben ser transparentes.

La metodología del análisis del ciclo de vida debería ser amigable a la inclusión de nuevos descubrimientos científicos y mejoras tecnológicas (Varun y col., 2008). El punto clave del análisis de ciclo de vida es en el acercamiento de estudio de un modo holístico, el producto o sistema como un todo y nos permite evitar, la suboptimización, que puede ser el resultado de solo pocos procesos, concentrándose en ellos. Los resultados son también relacionados con el uso del producto el cual permite una comparación entre diversas alternativas. El análisis de ciclo de vida incluye la definición de meta y alcance, análisis de inventarios, evaluación de los impactos y la interpretación de los resultados como se aprecia en la Figura 3.1.

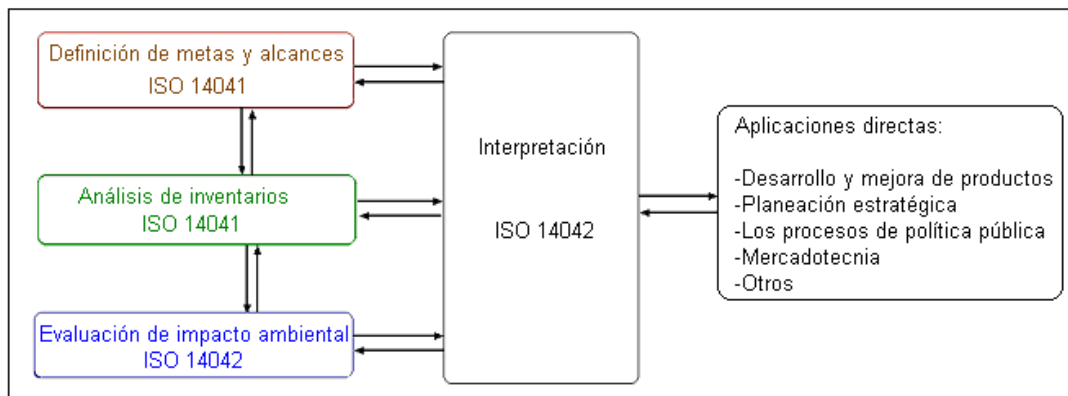


Fig. 3.1 Esquema de evaluación del ciclo de vida (Rebitzer y col., 2008)

La creciente preocupación sobre el futuro de las fuentes energéticas y la gran conciencia sobre la importancia de la energía en nuestra sociedad, han llevado a preguntar cuanta energía es usada en la producción de productos y servicios. Una importante aplicación del análisis del ciclo de vida es el análisis neto de energía. La energía neta ha sido definida como la cantidad de energía que queda para el uso del consumidor después de los costos de la energía, de encontrar la energía, su producción, modernización y entrega de la energía que ha sido pagada (Huettner, 1976).

Si una nueva tecnología consumió mas energía de la que produjo, ésta tuvo una energía de salida neta negativa, esta tecnología no podría proporcionar alguna contribución útil para el abastecimiento de la energía y debería ser descartada. Contrario a esto, si una nueva tecnología de energía puede conseguir una energía de salida neta positiva, cuando la energía está en poco suministro, entonces podría ser adoptado para el uso, incluso si la perspectiva de la evaluación económica se encuentra desfavorable (Mortimer, 1991). El análisis de ciclo de vida es un instrumento para cuantificar todos

los impactos de toda la cadena de abastecimiento de la energía. Por ejemplo, para obtener el requerimiento de energía acumulativa para producción de una planta de energía, el ciclo de vida de emisión del carbón, etc. Para mayor facilidad se requiere separar en componentes y subcomponentes y todo el flujo de material y energía a través de éste es examinado (Wagner, 2007).

El impacto del ciclo de vida de los sistemas de energía renovables mas comunes es importante cuando se compararan con los sistemas de combustible convencionales para una elección racional de fuentes de energía. En adición a las diferencias ya conocidas entre los sistemas de energía que usan combustible convencional y los sistemas de energía renovables con respecto al impacto económico, existen otras diferencias en muchas otras áreas de impacto que favorecen y apuntan al desarrollo de las energías renovables (Sorensen, 1994).

3.2 Contaminantes en el proceso de combustión

La Tabla 3.1 muestra el ciclo de vida de las emisiones para diversos combustibles convencionales, para la generación de electricidad. Se aprecia que la emisión máxima fue de una planta alimentada por carbón que fue de 975.3 gCO₂ eq/KWh y la emisión mínima fue de una planta nuclear, que fue de alrededor de 24.2 gCO₂ eq/KWh. La Tabla 3.2 muestra una comparación entre las tecnologías de generación eléctrica con energías renovables y las fuentes de generación de energía eléctrica convencional. El ciclo de vida de las emisiones son comparativamente muy altas en las fuentes convencionales comparadas con las fuentes renovables. En las fuentes convencionales solo la generación eléctrica nuclear tiene menos emisiones al ambiente, pero el desecho de los materiales radioactivos causan mayores daños al entorno.

Tabla 3.1 Comparativo del análisis de ciclo de vida de las emisiones de CO₂ en diversas técnicas de producción de electricidad (Varun y col., 2008)

Fases de evaluación del ciclo de vida	Carbón gCO ₂ eq/KWh	Aceite gCO ₂ eq/KWh	Gas gCO ₂ eq/KWh
Combustión del combustible	886.8	704.3	477.9
Construcción	3.6	2.3	2.9
Operación	32	35.2	117.7
Clausura de servicio de planta	52.9	0.3	9.1
Total	975.3	742.1	607.6

Tabla 3.2 Comparativo de análisis de ciclo de vida de emisiones con sistemas convencionales de generación eléctrica con fuentes de energía renovables (Varun y col., 2008)

Sistemas convencionales		Sistemas renovables	
Sistema	gCO ₂ eq/KWh	Sistema	gCO ₂ eq/KWh
Carbón	975.3	Eólico	9.7-123.7
Aceite	742.1	Solar	53.4-250
Gas	607.6	Biomasa	35-178
Nuclear	24.2	Térmica solar	13.6-202
		Hidroeléctrico	3.7-237

3.3 Contaminantes en el proceso de gasificación

Varun y col. (2008) revisaron los impactos ambientales de la producción de energía eléctrica a través de una planta de gasificación de ciclo combinado alimentado por biomasa. Los resultados son comparados con la opción alternativa con la producción de energía por las plantas de energía convencionales alimentados por combustibles fósiles. Como un modelo para la evaluación del

impacto se utilizó la metodología del Eco-índice. Dicho método ha sido desarrollado dentro del Programa Nacional Holandés acerca del reciclado de la basura.

El ciclo de producción de biomasa se basa en la cosecha de árboles, después de que se rotan los árboles, por tres años más se cultivan en viveros para después podarlos. El campo estimado de biomasa es de 20 Mg/ha*año. La cantidad neta disponible de biomasa es aproximadamente de 16 Mg/ha*año, esto como resultado natural de secado de los árboles durante el almacenamiento. Para el transporte de la biomasa los trailers de diésel con (40 Megagramos cargados) fueron usados, y la distancia promedio de almacenamiento de la biomasa a la planta de energía, fue asumida en 75 Km. El consumo de energía y las emisiones debidas a la extracción, procesamiento, transporte y combustión del combustible para transporte fueron considerados.

Un valor medio o bajo de producción de gas por calor es producido por el gasificador de cama de flujo presurizado con un flujo continuo de aire u oxígeno (la inyección de vapor no es necesario debido a la humedad de la biomasa). El poder calorífico mínimo del gas es sensible al agente oxidante y a la humedad de la biomasa. El gasificador incluye filtros mecánicos y ciclones para la remoción de grandes partículas provenientes del gas. Un paso de filtración también es necesario para remover las partículas pequeñas (más pequeñas de 10 µm) las cuales no deben entrar a las turbinas de gas. La biomasa es usada como combustible en las plantas de energía de ciclo-combinadas de gas/vapor. La cantidad de producción de emisión de CO₂ fue de 7330 KgCO₂ eq/ha*año.

Varun y col. (2008) revisaron una interpretación del análisis y evaluación del ciclo de vida de la gasificación integrada de ciclo combinado (GICC), alimentado por biomasa con absorción química de CO₂. En la simulación, un gasificador atmosférico ha sido modelado, alimentado con un flujo de 31 Kg/s de biomasa, la biomasa considerada son árboles de poplar, caracterizados por una proporción de 8.28 de carbón/hidrógeno y el poder calorífico mínimo aproximado de 18,000 KJ/Kg, los valores de efecto invernadero para las diferentes fases consideradas en términos de Kg de CO₂ equivalente por unidad funcional (1 MJ de energía producida).

Los resultados son comparados con la gasificación integrada de ciclo combinado, donde la reducción de CO₂ es obtenida por medio de soluciones orgánicas derivadas del amoníaco y por absorción química. Una planta de gasificación de biomasa integrada de ciclo combinado con absorción química de CO₂ forma el gas sintético que ha sido simulado por medios del Aspen Plus. Los resultados son 167 KgCO₂ eq/MWh con respecto al carbón convencional de gasificador integrado de ciclo combinado con valor de 700-800 KgCO₂ eq/MWh.

También se ha estudiado la evaluación del ciclo de vida de la gasificación integrada de biomasa de ciclo combinado con eliminación de CO₂ por absorción química (Carpentieri y col., 2005). Ésta evaluación se condujo en base a la metodología de evaluación de impacto del Eco-índice 95, el propósito de ese trabajo fue la evaluación del impacto ambiental en el horizonte de ciclo de vida y en la utilización de biomasa para producción de energía.

La contribución de las diversas fases del ciclo de vida de todos los impactos son resaltados de acuerdo al orden de evaluación de las fases de mayor impacto. Se realizó también un comparativo con un análisis de evaluación en el ciclo de conversión de energía alimentado con carbón (GICCC). Los resultados en la simulación del estudio de Carpentieri y col. (2005) de las emisiones de CO₂ fueron 178 KgCO₂ eq/MWh. La Tabla 3.3 muestra los resultados generales del análisis de CO₂ en los sistemas con utilización de biomasa en los gasificadores.

Tabla 3.3 Perspectiva de análisis del CO₂ en los sistemas que usan biomasa (Varun y col., 2008)

Año de estudio	Proceso	índice de potencia	gCO ₂ eq/KWh
2004	Sistema de carbón +biomasa y eliminación de CO ₂	457 MW	43

2005	IBGCC+ eliminación de CO ₂ (absorción química)	204.5 MW	178
2005	Cogeneración de biogás	80 KW	78
1999	90% de carbón y 10% de paja	509 MW	37
	90% de carbón y 10% de madera		35
1999	IGCC	1 MW	110

3.4 Contaminantes en el proceso de pirólisis

El aceite de pirólisis obtenido de la biomasa residual, y de materiales tales como los desechos en las construcciones y demoliciones, es un sustituto potencial del petróleo, para generar energía renovable y calor para diversos procesos. La tecnología de procesamiento rápido térmico PRT®, desarrollado por Tecnologías Evergent, es un proceso térmico rápido por el cual, la biomasa es vertida en un contenedor y rápidamente calentada a una temperatura de 500 °C por un tornado de arena caliente y rápidamente enfriado en segundos.

El proceso genera grandes capacidades de bio-aceite o aceite de pirólisis o aceite pirolítico de los residuos de la silvicultura o residuos de la agricultura de la biomasa. El proceso también genera subproductos que son las cenizas y gas no condensable, el cual es utilizado en el recalentador, para proporcionar al proceso calor y secar la biomasa. El aceite de pirólisis puede ser quemado directamente para generar electricidad y las emisiones en la etapa de combustión son consideradas como neutrales para el carbono. Dado que el CO₂ es absorbido por la fotosíntesis durante el proceso de crecimiento de la biomasa, así las emisiones de GEI son significativamente menores comparadas a las emisiones de los combustibles fósiles.

Las metas de estudio del análisis de ciclo de vida de la combustión del aceite de pirólisis o aceite pirolítico para la generación de energía eléctrica, se proponen entender la importancia relativa al cultivo, transporte y combustión en el análisis de ciclo de vida de las emisiones de GEI, investigar las materias primas y tecnologías, y evaluar la eficiencia en la generación de energía eléctrica. Los límites del sistema incluyen la energía, combustible, químicos, y las necesidades de transporte para realizar todas las fases, comenzando con los cuidados en el vivero para la biomasa y terminando con la combustión del aceite pirolítico en la planta de generación eléctrica.

La unidad funcional es asumida en 1 KWh de electricidad generada, todas las entradas fueron simuladas en el programa de análisis de ciclo de vida Simapro 7.1 para generar el análisis de ciclo de vida de las emisiones de la generación de energía eléctrica usando el método del potencial de calentamiento global (PCG). Los efectos del porcentaje de área de tierra para el cultivo de biomasa y transporte de la biomasa fueron investigados para diferentes escenarios. Un escenario adicional evaluó las reducciones de GEI cuando la electricidad es proporcionada por una planta de pirólisis autosuficiente, así se evita el uso de electricidad proveniente de la red de suministro eléctrico.

Los diversos caminos para generación de electricidad en el análisis son: Planta parásita alimentada por aceite pirolítico de los residuos de tala y remoción, también este mismo combustible en planta de alimentación dual, planta parásita alimentada por aceite pirolítico de cultivos de rápido crecimiento, también el caso de este mismo combustible en planta de alimentación dual, combustión directa de la biomasa de los residuos de tala y remoción, y combustión directa de las cosechas de rápido crecimiento.

3.4.1 Contaminantes generados en el transporte de biomasa al proceso pirolítico

El modelo matemático mostrado en la ecuación fue utilizado para simular la distancia del transporte entre los sitios de recolección de biomasa y las plantas de pirólisis.

$$r = \frac{2}{3} * \tau * \sqrt{\frac{F}{(\pi * Y * f)}}$$

(3.1)

Donde:

τ : Representa el factor de tortuosidad del camino (1.5)

- f : Es la fracción de tierra destinada a la cosecha de la biomasa (0.10)
 Y : Representa la cosecha de biomasa en toneladas por acre
 F : Es la biomasa necesaria para generar la cantidad de energía requerida para cada caso
 π : Constante matemática, relación entre la longitud de la circunferencia y su diámetro

(Se asume que la biomasa húmeda contiene 40% de humedad, y es transportada por camiones de 16 toneladas, para los casos de combustión directa de la biomasa). F fue calculada por la capacidad de energía de la planta, la eficiencia y el valor calorífico mínimo de la biomasa seca. Para las plantas de turbina de gas de ciclo combinado (TGCC), y los sistemas de generación por diésel, la F fue calculada por la energía de salida, las eficiencias térmicas de la planta, el poder calorífico mínimo del aceite de pirólisis y la proporción de la producción de aceite pirolítico en relación a la biomasa de entrada.

Para las plantas de cogeneración, se asumieron 400 toneladas de biomasa seca completamente fueron llevadas a la planta de generación de combustibles convencionales para ser quemadas. Las distancias de transporte de las 3 materias primas para cada planta de generación es mostrada en la Tabla 3.4. El desecho de madera es producido por la misma planta de generación del aceite pirolítico, por tanto el transporte no es requerido.

CD1 y CD2 representan la combustión directa de la biomasa en una planta de generación eléctrica tipo ranking con capacidad de 10 MW, 107,291 y 77,250 toneladas de biomasa son requeridas para CD1 Y CD2 por año, respectivamente (Tabla 3.4). Los valores de F , son 62,907 y 31,170 para los casos de combustión de aceite pirolítico TGCC y generador diésel, por otro lado, 146,000 toneladas de biomasa son quemadas en las plantas de combustible fósil. Para la variable Y de la cosecha de biomasa, SRC poplar, SRC sauce, y residuos de tala y remoción de árboles, son de 6.02, 5.31 y 0.28 toneladas por acre, respectivamente.

Tabla 3.4 Distancias de transporte de la biomasa a los sistemas de generación eléctrica (Fan y col., 2010)

Tipo de biomasa	Distancia (millas)				
	CD1	CD2	TGCC	Generador diésel	Plantas convencionales
SRC poplar	3.84	3.26	7.21	5.07	10.98
SRC sauce	4.09	3.47	7.67	5.4	11.69
Residuos de tala de árboles	17.97	15.25	33.7	23.72	51.34

3.4.2 Contaminantes en la generación de energía eléctrica a partir del aceite pirolítico

Para comprender la ventaja que tienen la generación eléctrica de los aceites de pirólisis desde la perspectiva ambiental, Fan y col. (2010) hicieron el análisis de ciclo de vida de los GEI sobre la combustión directa de las virutas de madera, en una planta convencional de ciclo Rankin, y el análisis de la combustión del aceite de pirólisis en plantas nuevas y ya instaladas. Para los casos de combustión directa de la biomasa, se tomó en cuenta 3 tipos de materias primas: Residuos sólidos, sauces SRC y árboles poplares SRC, los que son directamente puestos al proceso de combustión en una planta con capacidad de salida de 10 MW.

La eficiencia de los casos independientes de la combustión directa de biomasa CD1 Y CD2, se asumieron como 18 y 25% respectivamente, representando las plantas modernas y ya existentes

con una entrada de 400 toneladas de biomasa seca por día. Tres sistemas de conversión de energía fueron consideradas para los casos de combustión del aceite de pirólisis: 1) Plantas convencionales de combustión que queman combustibles fósiles incluyendo carbón, gas natural y combustóleo. 2) Plantas de turbinas de gas de ciclo combinado (TGCC) con recuperación de calor. 3) Plantas con generador estacionario diésel. En los casos de sustitución del aceite de pirólisis (en plantas de cogeneración) representa la combustión del aceite pirolítico en plantas de generación convencionales como materia prima, reemplazando los combustibles fósiles convencionales. La eficiencia de la generación eléctrica para los casos de sustitución fueron asumidas como la misma de una planta de combustible fósil (<30%) (Mann y Spath, 2001).

La biomasa húmeda (40% en peso de humedad), es transportada a una distancia promedio de 100 Km hacia la planta de generación. Se asumió que 400 toneladas de biomasa seca es procesada en los casos de sustitución de combustibles fósiles por aceite pirolítico. La salida de energía de estos sistemas fue calculada por el tipo de biomasa, el valor calórico mínimo de la biomasa y la eficiencia de la planta.

La planta de turbina de gas de ciclo combinado y el generador estacionario de diésel, se asumió como sistema parásito, en los cuales, la energía requerida para realizar la pirólisis, es proporcionada por la planta de energía integrada de combustión del aceite pirolítico. Un estimado de 0.012 KWh de electricidad generada es consumida por la planta de pirólisis para producir 1 MJ de aceite pirolítico, y entonces más aceite pirolítico es requerido para entrar en combustión para generar 1 KWh de electricidad. La eficiencia neta de las plantas con turbinas de gas de ciclo combinado, es de 39% mientras que la eficiencia del diésel estacionario es de 40.9%.

La producción de aceite pirolítico, fue dividido en 3 etapas de ciclo de vida: El cultivo y la cosecha, el transporte de la biomasa y la pirólisis. 400 toneladas por día de biomasa seca fue asumida para generar el aceite pirolítico. Las emisiones de GEI, se muestran en la Tabla 3.5. Para las plantas no parásitas, el proceso de pirólisis es el mayor contribuidor de los gases GEI en la producción de aceite pirolítico, debido principalmente al consumo de electricidad proveniente de la red eléctrica. El menor impacto ambiental proviene del aceite pirolítico producido de los desperdicios de madera, debido a que la materia prima por si misma no introduce ninguna emisión de GEI.

Cuando el valor de f cambia, la distancia de transporte de la materia prima de la biomasa de ajusta en consecuencia, como resultado las emisiones de esta parte del análisis de ciclo de vida, (de la producción a la puerta de la planta), de la producción de pirólisis, cambia. El caso base para el valor de f es de 0.01 que es el caso básico, y la f se fue modificando para hacer un análisis de sensibilidad. Las distancias para los diferentes valores de f se muestran en la Tabla 3.6 y las emisiones de transporte de GEI en la producción de aceite piroítico se muestra en la Figura 3.2.

Tabla 3.5 Emisiones de GEI de la producción de aceite pirolítico provenientes de 4 diferentes tipos materia prima de la biomasa (Fan y col., 2010)

gCO₂ eq/ MJ aceite pirolítico	Aceite pirolítico poplar	Aceite pirolítico residuos	Aceite pirolítico sauces	Aceite pirolítico desperdicios de madera
Materia prima	4.00	2.08	2.41	0
Transporte	0.82	3.84	0.87	0
Pirólisis	8.59	8.59	8.59	8.59
TOTAL	13.42	14.51	11.88	8.59

Los efectos con respecto a la distancia del transporte de la biomasa, en el análisis de ciclo de vida de los impactos de emisiones de GEI, para la producción del aceite pirolítico, es mayor para valores pequeños de f : $0.03 < f < 0.6$. A valores pequeños de f , donde las distancias de transporte son grandes, los residuos por tala y remoción emiten la carga más grande de GEI, aunque los residuos del cultivo son pequeños, comparado con la biomasa de SRC. A mayores valores de f ($f > 0.6$), las

emisiones por residuos de tala y remoción y las cosechas por SRC, se tornan similares, en término de emisiones de GEI.

Tabla 3.6 Distancias de transporte de la biomasa para diversos valores de f (Fany col., 2010)

r (millas)	$f= 0.03$	$f= 0.1$	$f= 0.3$	$f= 0.6$	$f= 0.9$
Poplar	20.05	10.98	6.34	4.48	3.66
Sauce	21.34	11.69	6.75	4.77	3.90
Residuos	93.74	51.34	19.64	20.96	17.11

Sin embargo, tales valores tan grandes de f no son probables en la mayoría de las aplicaciones, debido a que la basura de la madera tal como las virutas de madera son producidas dentro del mismo sitio, no se requiere de transporte y los cambios del valor de f no hacen impacto en el análisis de ciclo de vida de las emisiones de la producción del aceite pirolítico proveniente del desecho de madera.

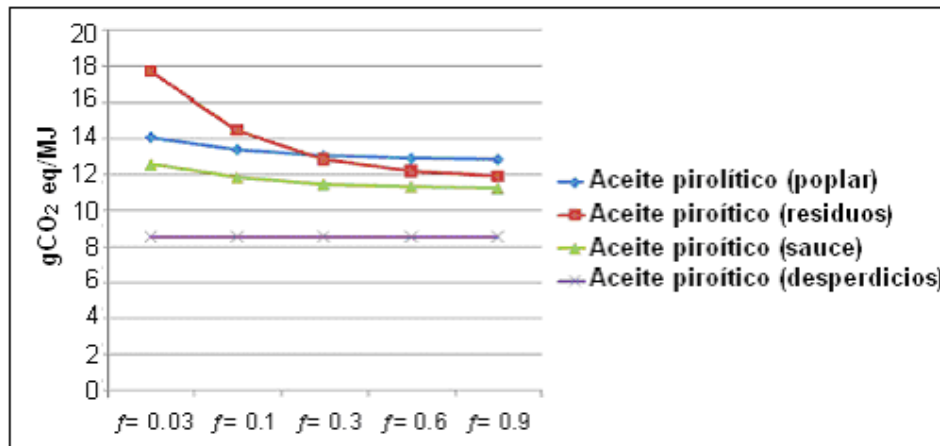


Figura 3.2 Emisiones de GEI del transporte de biomasa para diferentes valores de f (Fan y col., 2010)

3.4.2.1 Aceite pirolítico en planta autosuficiente

La ubicación de la fuente de energía y de la planta de pirólisis, tiene un gran impacto en los resultados del análisis de ciclo de vida. Si la planta de pirólisis esta integrada con la planta de energía, la electricidad generada en la planta de energía puede ser consumida internamente para satisfacer la demanda de energía de la pirólisis. Aunque toda la eficiencia de la generación de energía disminuirá, las emisiones de GEI causadas por el uso de electricidad de la red, pueden evitarse. La Tabla 3.7 muestra las emisiones de GEI de la producción de aceite pirolítico, cuando esta planta autosuficiente es considerada a estudio, las emisiones en la producción de aceite pirolítico, son considerablemente menores, un poco más de 8 gCO₂ eq/MJ de aceite de pirólisis, comparados con los resultados de la Tabla 3.5.

Tabla 3.7 Emisiones de GEI provenientes de plantas autosuficientes en la producción de aceite pirolítico (Fan y col., 2010)

gCO ₂ eq/ MJ	Aceite pirolítico poplar	Aceite pirolítico residuos	Aceite pirolítico sauces	Aceite pirolítico desperdicios de madera
Materia prima	4.00	2.08	2.41	0
Transporte	0.82	3.84	0.87	0

Pirólisis	0.42	0.42	0.42	0.42
TOTAL	5.25	6.34	3.70	0.42

3.4.2.2 Planta tipo TGCC con recuperación de calor

Con respecto a la generación de energía eléctrica, para los sistemas de TGCC, las emisiones causadas por la red eléctrica son evitadas. Adicionalmente no hay emisiones de GEI causadas por el transporte del aceite pirolítico debido a que la planta de pirólisis y el sistema TGCC se encuentra integrado. Las emisiones totales muestran una ventaja significativa. El ciclo de vida de las emisiones de GEI se muestra en la Figura 3.3. Las emisiones de GEI de los árboles poplares y sauces, son las más significativas para la etapa de cultivo y cosecha, mientras que el transporte y pirólisis tienen los valores casi iguales. Para los residuos de tala y remoción, el cultivo, cosecha y transporte, tienen casi la misma magnitud debido a las grandes distancias necesarias por la relativa baja productividad de la materia prima. El desecho de madera está disponible sin generar una carga y no necesita ser transportado, dado que es asumido que la biomasa está disponible el mismo lugar de la generación de electricidad y pirólisis. Las emisiones de GEI evitadas, comparadas con el rango de línea base de carbón, desde 95% hasta 99%, dependiendo del tipo de biomasa utilizada.

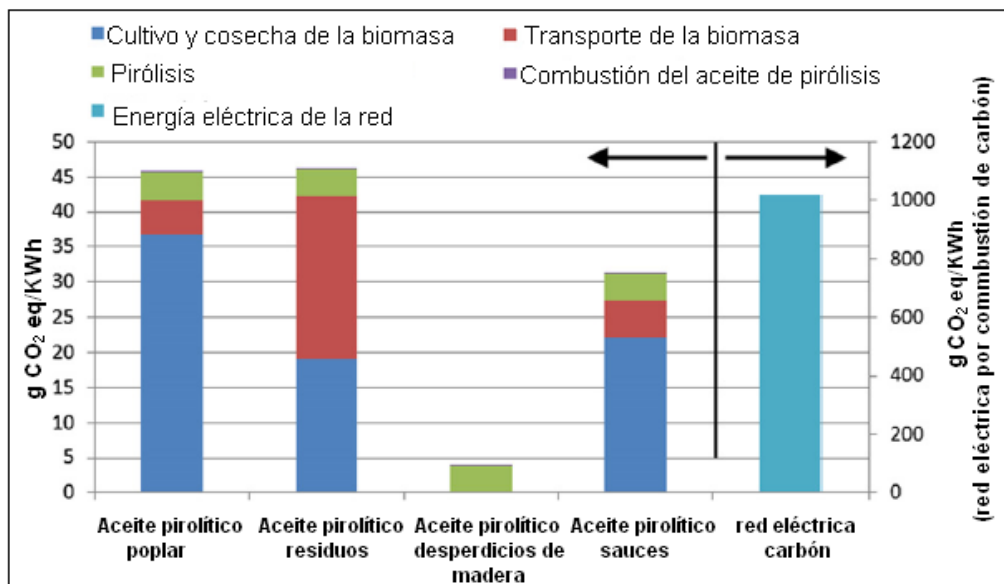


Figura 3.3 Análisis de ciclo de vida de las emisiones de GEI para la generación de energía eléctrica por el sistema de TGCC (Fan y col., 2010)

3.4.2.3 Generador diésel estacionario

En el caso del generador estacionario de diésel, también es un sistema parásito, similar al caso del sistema de TGCC. 0.52 Kg de aceite pirolítico es puesto en combustión para generar 1 KWh de electricidad neta. Los resultados del análisis de ciclo de vida de las emisiones de GEI, se muestran en la Figura 3.4. Los resultados son similares al caso del sistema con TGCC, los impactos por cultivo y cosecha son mayores para los árboles poplares y sauces, con emisiones casi iguales para el transporte de biomasa y la producción del aceite de pirólisis. La electricidad generada de la producción de aceite pirolítico a partir de los residuos de tala y remoción muestra impactos relativamente mayores y las emisiones de GEI a partir de los residuos de madera son las menores.

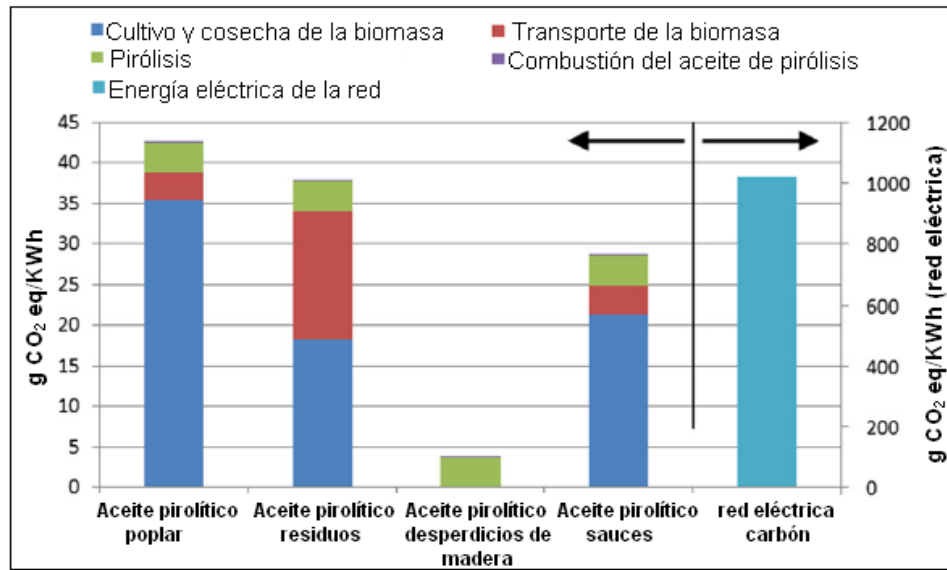


Figura 3.4 Análisis de ciclo de vida de las emisiones de GEI para el sistema con generador estacionario diésel (Fan y col., 2010)

3.4.2.4 Aceite pirolítico sustituyendo al carbón

En el caso donde el aceite de pirólisis es sometido a combustión en una planta de generación por carbón, reemplazando el carbón, la eficiencia se asumió como la misma de una planta de generación por carbón (33%). Los resultados del análisis de ciclo de vida de las emisiones, se presenta en la Figura 3.5. Debido a que el lugar de producción del aceite de pirólisis se encuentra alejado de la planta de generación y hace uso de electricidad, la producción del aceite pirolítico contribuye en mayor parte al impacto de generación de GEI en el análisis de ciclo de vida. Con respecto a los árboles poplares y sauces, el cultivo y cosecha contribuyen como segundo impacto en la emisión de GEI seguido por el transporte del aceite pirolítico y transporte de la madera de los residuos de tala y remoción, la emisión más baja es la que emiten los desperdicios de madera como materia prima, dado que no hay emisiones debidas al cultivo, cosecha y transporte, con un valor de 104.12 gCO₂ eq/KWh seguido por la emisión del sauce con un valor de 139.82 gCO₂ eq/KWh, la emisión más alta la generan los residuos de tala y remoción con un valor de 168.51 gCO₂ eq/KWh.

3.4.2.5 Aceite pirolítico sustituyendo al gas natural

En el caso donde el aceite pirolítico es sometido a combustión, en una planta de gas natural, como materia prima, la eficiencia es la misma que una planta promedio de gas natural (42%). Los resultados del análisis de ciclo de vida de las emisiones GEI, se muestran en la Figura 3.6. Los resultados son cualitativamente similares a los que se arrojaron en la sustitución del carbón, excepto que todas las emisiones fueron menores, debido a la gran eficiencia de generación de la electricidad.

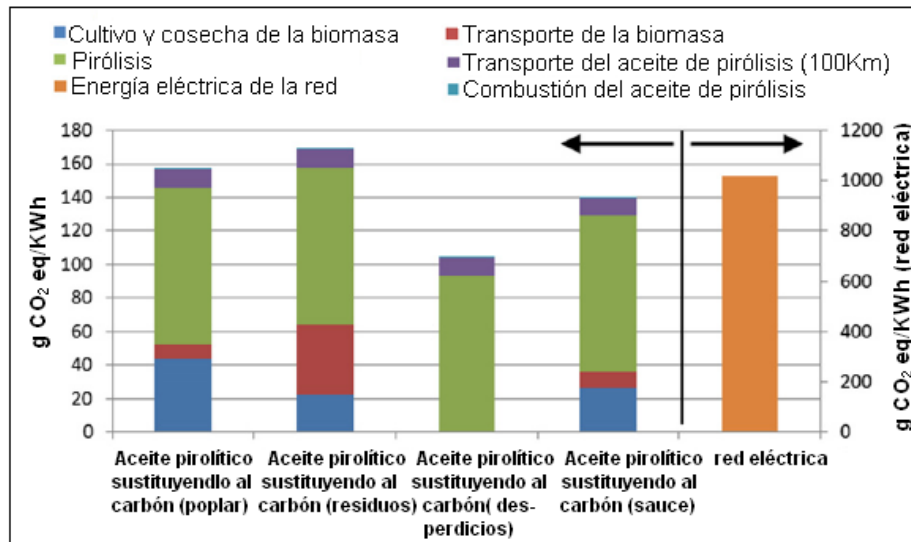


Figura 3.5 Análisis de ciclo de vida de las emisiones GEI de la combustión de aceite pirólítico en sustitución del carbón en la planta alimentada por carbón (Fan y col., 2010)

La gran eficiencia se traduce en la disminución de la demanda de materia prima por unidad de electricidad de salida generada, las emisiones evitadas comparadas a las emisiones de gas natural entraron en un rango de 77%-81% dependiendo del tipo de biomasa utilizado. El aceite pirólítico producido por los desperdicios de la madera, muestran las emisiones más bajas seguidas por la de los sauces, poplares y residuos de tala y remoción de árboles, emitiendo 81.34, 109.24, 122.35 y 131.65 gCO₂ eq/KWh, respectivamente.

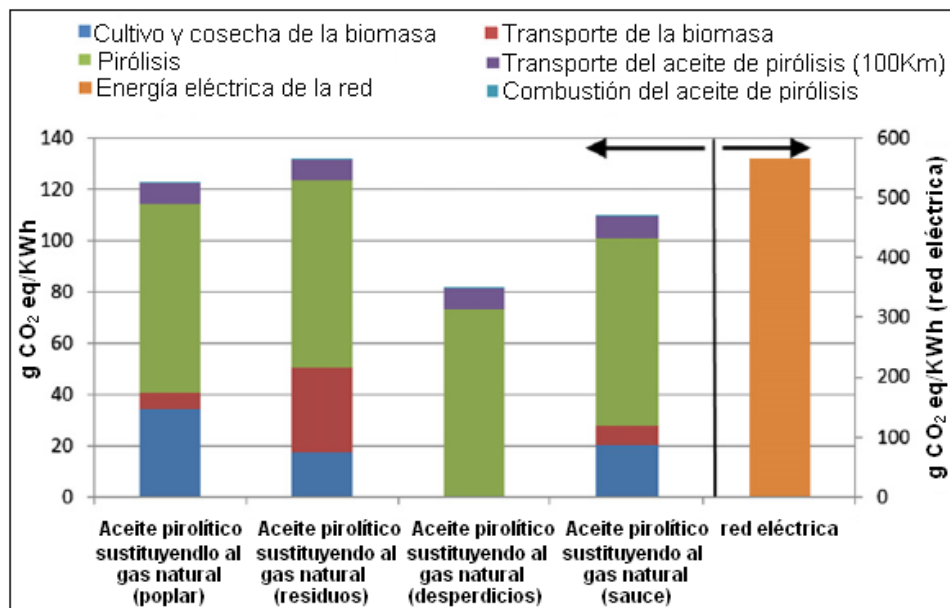


Figura 3.6 Análisis de ciclo de vida de las emisiones de la combustión del aceite pirólítico en una planta alimentada por gas natural (Fan y col., 2010)

3.4.2.6 Aceite pirólítico sustituyendo al combustóleo

En el caso donde el aceite pirolítico es puesto a combustión en una planta de combustóleo, como materia prima, la eficiencia que se asume es del (34%). Los resultados de las emisiones en el análisis de ciclo de vida se muestran en la Figura 3.7. Los datos de las emisiones GEI de la planta de combustóleo, fueron obtenidos por el modelo denominado GREET, como punto de referencia. Las emisiones en este caso, son similares a las emisiones de una planta sustituida por aceite pirolítico en lugar del carbón, debido a la eficiencia en la generación de electricidad. Las emisiones evitadas entran en un rango del 80% al 88% dependiendo del tipo de biomasa. El aceite producido por los desperdicios de la madera, muestra las emisiones más bajas, seguido por los sauces, árboles poplares, y el residuo de tala y remoción, emitiendo 100.86, 135.45, 151.71 y 163.24 gCO₂ eq/KWh.

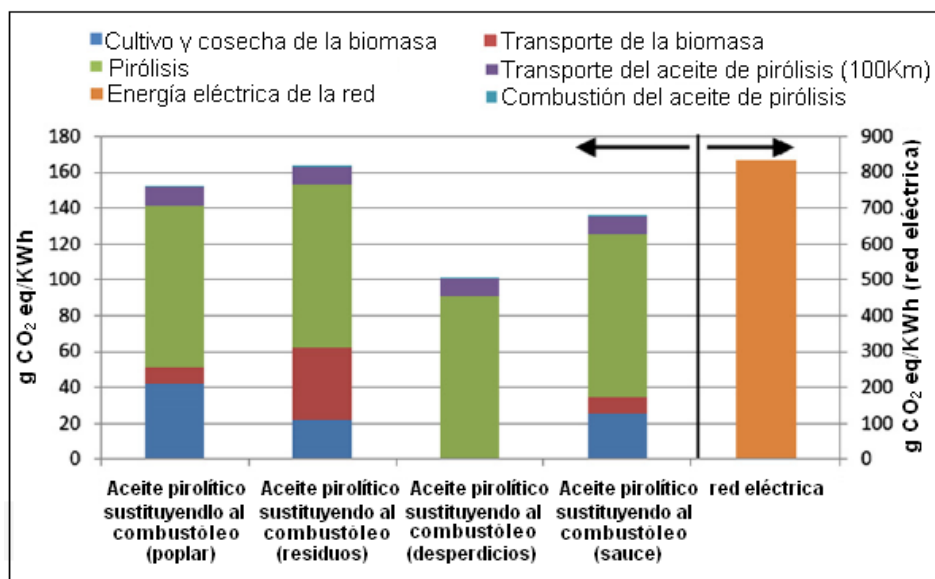


Figura 3.7 Análisis de ciclo de vida de las emisiones GEI en la combustión del aceite pirolítico en una planta de combustóleo (Fan y col., 2010)

3.4.3 Análisis de sensibilidad de la sustitución del aceite pirolítico

En los casos de sustitución, el aceite de pirólisis es producido y transportado a las plantas de generación eléctrica. Para hacer un caso de estudio de la sensibilidad, se tomó como ejemplo el desperdicio de madera como materia prima, para evaluar los efectos de la distancia recorrida por el transporte para la producción de electricidad con aceite pirolítico dentro de un rango de 50-200 Km, valor que fue modificado del caso base con 100 Km de distancia. El resultado del análisis de ciclo de vida de las emisiones se muestra en la Figura 3.8, los efectos de la distancia recorrida por el transporte pueden variar cuando mucho en un 20%, debido a los grandes impactos de la producción del aceite piróitico utilizando la electricidad de la red en los casos de sustitución.

La sensibilidad para las entradas de SRC fueron también analizadas, duplicando el fertilizante utilizado en el cultivo de árboles poplares y el ciclo de vida de las emisiones se incrementaron de 156.6 gCO₂ eq/KWh a 185 gCO₂ eq/KWh. Adicionalmente para determinar el impacto que tiene el consumo de la electricidad proporcionada por la red en la producción del aceite pirolítico, se mezclaron dos fuentes de información de dos diferentes estados respectivamente.

La electricidad proveniente de oeste de Virginia fue usado como el peor de los escenarios debido a que el carbón es la fuente de energía dominante (97.7%). La electricidad proveniente de Vermont representa el mejor escenario debido a que la mayor parte de la energía eléctrica es generada por fuentes que contienen menor contenido de carbón. (7.2% de biomasa, 21.2% de hidroenergía y

71.2% nuclear). Se asume que el aceite pirolítico es producido en Vermont y transportado a un estado vecino para desplazar al carbón como fuente de energía. El análisis de ciclo de vida de las emisiones de GEI, son 206 gCO₂ eq/KWh para el escenario de Virginia y 69.6 gCO₂ eq/KWh para el escenario de Vermont.

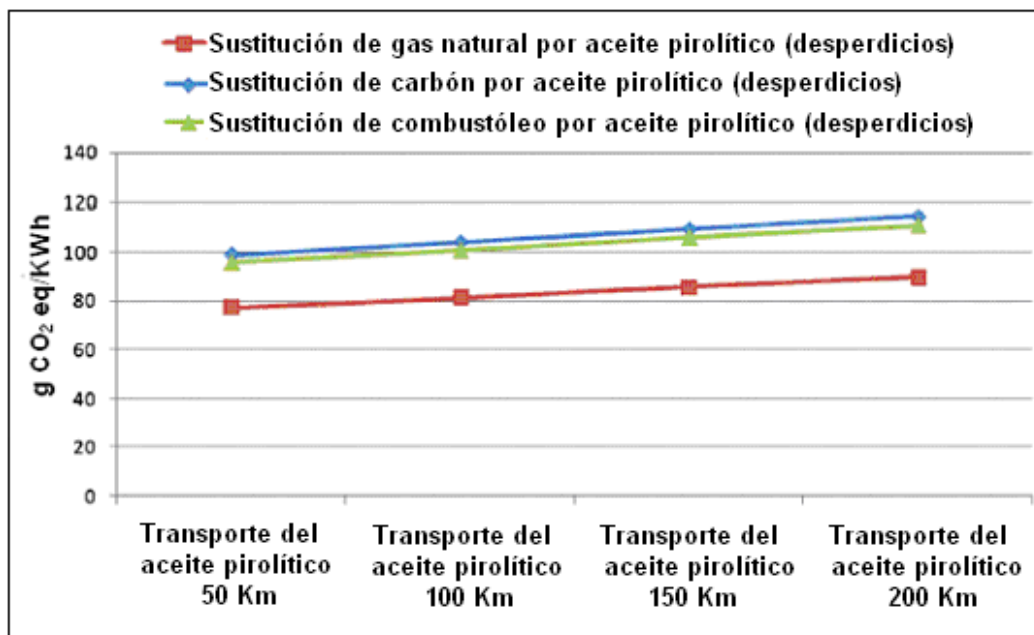


Figura 3.8 Análisis de ciclo de vida de las emisiones de GEI de la combustión del aceite de pirolítico en sustitución del carbón, con diferentes distancias de transporte (Fan y col., 2010)

Las emisiones de GEI para los casos CD1 Y CD2 y se muestran en la Figura 3.9. El cultivo de la materia prima, exhibe la emisión más grande de gases GEI para la SRC y los impactos menores corresponden al transporte de la misma.

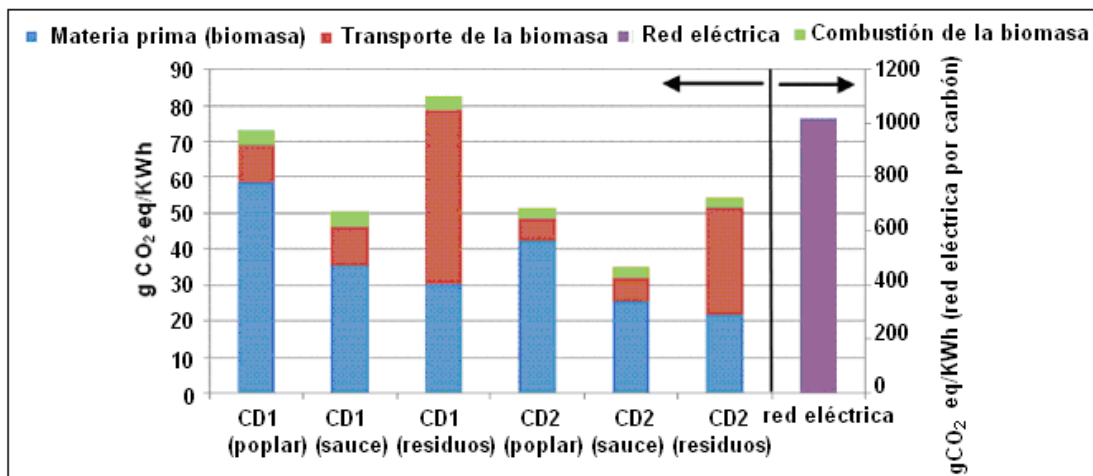


Figura 3.9 Análisis de ciclo de vida de la combustión directa de la biomasa (Fan y col., 2010)

Para los residuos de tala y remoción, el transporte es la etapa de mayor emisión de GEI. En todos los casos, la combustión de la biomasa emite relativamente pocas emisiones de gases GEI, en el caso de CD2 que es el de mayor eficiencia, muestra menos emisiones que el caso de CD1. Ambos

casos CD1 Y CD2 muestran más de un 90% en emisiones evitadas de GEI comparadas a las emisiones que genera una planta alimentada por carbón.

3.4.4 Ventajas de la pirólisis

Se realizó una comparación en la generación de electricidad, por combustión directa de la biomasa, en plantas convencionales de cogeneración de combustible fósil, por TGCC, y generador de diésel estacionario, para determinar las emisiones de GEI y las emisiones evitadas comparadas con las plantas de generación de electricidad convencionales (Fan y col., 2010) Los resultados se muestran en la Figura 3.10. El aceite pirolítico combinado en las plantas de combustible fósil, (carbón, gas natural y combustóleo) tienen las mayores emisiones, aunque las emisiones son significativamente menores que las emisiones por combustión de aceite pirolítico en sustitución de los combustibles fósiles

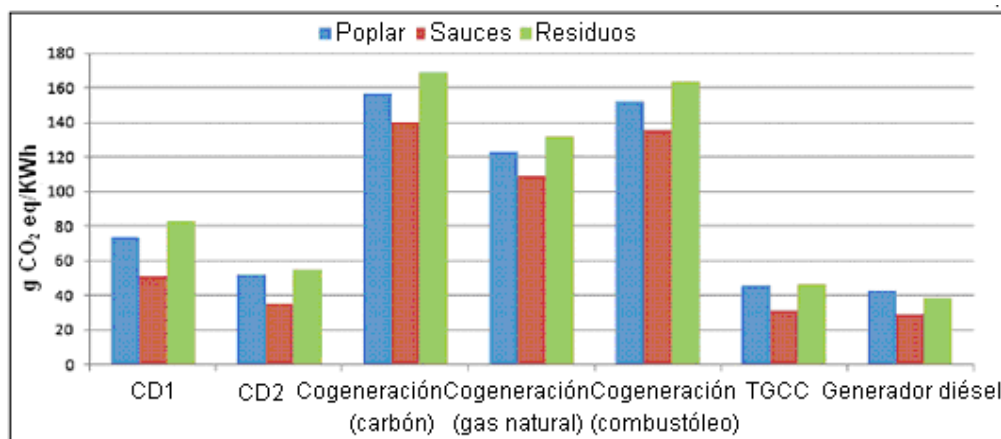


Figura 3.10 Análisis de ciclo de vida de las emisiones GEI en la generación de electricidad por combustión directa de la biomasa y combustión del aceite pirolítico (Fan y col., 2010)

El mayor contribuidor en el análisis de ciclo de vida de las emisiones fue la electricidad usada en la planta de pirólisis. Las emisiones de combustión directa de la biomasa en turbinas de vapor, residen entre las emisiones generadas por cogeneración de aceite pirolítico y combustibles fósiles y la combustión del aceite pirolítico en plantas de TGCC y generador diésel estacionario, en este caso las emisiones se deben principalmente al cultivo, cosecha y transporte de la materia prima.

3.5 Contaminantes en el proceso de digestión

Se realizó un estudio en Tailandia comparando dos esquemas: Incineración y digestión (Wirawat y Shabbir, 2006). El esquema propuesto para la digestión se muestra en la Figura 3.11. Las emisiones al aire, agua y suelo, recursos y materiales usados como consumo de energía fueron calculadas en este estudio. Las categorías de impacto consideradas son, potencial de calentamiento global (PCG), acidificación (AP), potencial de eutroficación (PE), potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférico (PACO), potencial de oxidación fotoquímico (POF), metales pesados, desecho sólido a relleno sanitario y consumo de recursos energéticos. Los resultados se muestran en la Tabla 3.8.

En la digestión, la acidificación producida por las actividades del mismo proceso de digestión fue pequeña y por tanto, fue fácilmente compensada con las emisiones evitadas por el fertilizante natural y la producción de electricidad. Las emisiones evitadas por la producción de fertilizante fueron casi cuatro veces más que de la producción de electricidad, La digestión tiene ahorros energéticos grandes debido a la producción de fertilizante (70%) y a la producción de electricidad.

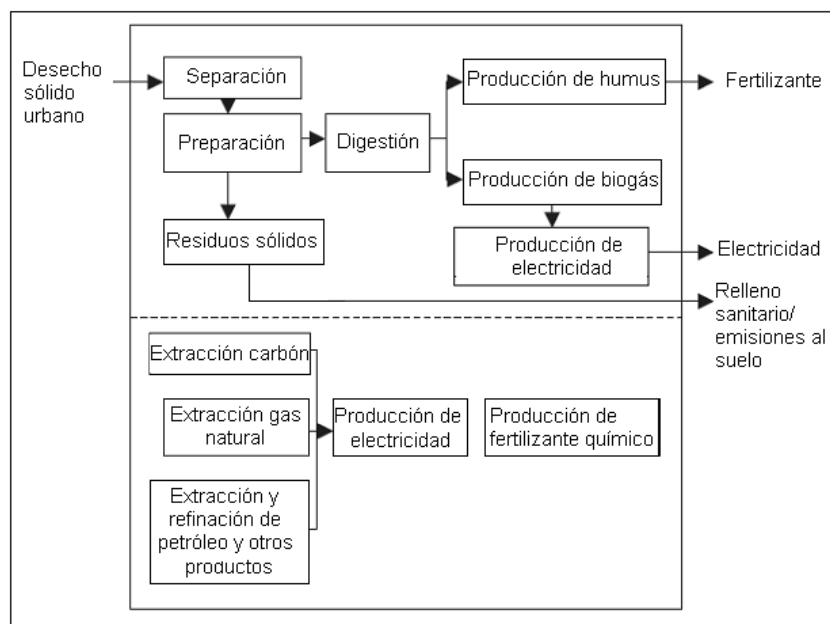


Figura 3.11 Proceso de digestión (Wirawat y Shabbir, 2006)

Tabla 3.8 Evaluación del proceso de digestión en su impacto ambiental (Wirawat y Shabbir, 2006)

Categoría de impacto	Impacto total	Producción de		
		Digestión	Electricidad (MW)	Producción de fertilizantes
PCG (KgCO ₂ eq)	-276	-	-76	-200
AP (Kg SO ₂ eq)	-1.57	0.00951	-0.324	-1.25
PE (KgPO ₄ eq)	7.37	11.2	-0.317	-3.77
POF (KgC ₂ H ₄ eq)	-0.0253	9.31x10 ⁻⁷	-0.0208	-0.00444
PACO (KgCFC ⁻¹¹)	1.9x10 ⁻⁵	-	-1.8x10 ⁻⁵	-1.1x10 ⁻⁶
Metales pesados (KgPb eq)	-0.00358	4.85x10 ⁻⁸	-5.7x10 ⁻⁵	-0.00352
Consumo de energía (MJ PCM)	-3,580	-	-1,070	-2,510
Generación de desecho a relleno (Kg)	372	374	-0.057	-1.54

Los residuos sólidos en la digestión fueron de materias que no son digeridas como plásticos, metales, hules y vidrio. Estos desechos se esperan ser dispuestos en rellenos sanitarios. Por otro lado en la Agencia de Manejo de Energía Ambiental Francesa se realizó un estudio para identificar el mejor método para utilizar el biogás a partir de la degradación anaerobia, combustible, energía térmica o electricidad. Para llevar a cabo este estudio, se aplicó el análisis de ciclo de vida (ADEME, 2007).

3.5.1 Categoría de impacto

Los impactos ambientales estudiados son:

- Consumo de energía primaria no renovable (EPNR)
- Potencial de calentamiento global (PCG)
- Acidificación del aire (AA)
- Potencial de eutroficación (PE)

Los impactos relacionados a la presencia de metales pesados o bacterias patógenas en la composta no fueron considerados en este estudio.

3.5.2 Métodos para utilizar el biogás

La Tabla 3.9, muestra los resultados de los 4 indicadores de impactos ambientales que fueron estudiados en el trabajo de Francia para cada método de utilización del biogás (ADEME, 2007). Las figuras negativas (en gris débil) muestran que las emisiones de la producción de biogás son más bajas que las emisiones evitadas debido a la combustión de energías no renovables. Las figuras positivas (en gris fuerte) muestran que las emisiones de la producción de biogás son más altas que las emisiones evitadas debido a la combustión de energías no renovables. Las figuras en negritas muestran el mejor método de utilización del biogás por cada indicador.

Tabla 3.9 Mejor uso del biogás según su impacto ambiental (ADEME, 2007)

Uso del biogás (procedimiento sustituido)	Energía primaria			
	no renovable MJ	gCO ₂ eq	gSO ₂ eq	gPO ₄ eq
Calor (aceite)	-13	-1,390	1.5	0.59
Calor (gas natural)	-8.6	-1,141	4.0	0.74
Electricidad	-9.8	-327	3.8	0.76
Cogeneración (aceite)	-20	-920	3.2	0.72
Cogeneración (gas natural)	-18	-800	4.4	0.80
Carburante (autobús con diésel)	-7.0	-1,176	-4.7	0.11
Carburante (autobús con gas natural)	-7.8	-1,297	3.0	0.70
Carburante (camión de desechos con gas natural)	-5.1	-1,020	-4.9	0.10
Carburante (camión de desechos con diésel)	-7.8	-1,299	3.0	0.70
Carburante (auto con diésel)	-7.4	-1,241	1.2	0.54
Carburante (auto con gasolina)	-13	-1,566	0.88	0.56
Carburante (auto con gas natural)	-7.8	-1,336	3.0	0.70

El impacto ambiental al utilizar biogás es menor cuando está comparado al uso de la energía no renovable. Para ambas aplicaciones de energía (calor y combustible), la utilización del biogás demuestra una ventaja en términos de consumo de la energía primaria no renovable y del potencial del calentamiento del planeta (por 100 años). Incluyendo las emisiones de los gases efecto invernadero de la separación y colección del desecho en el cálculo no altera esta ventaja. La utilización del biogás demuestra una ventaja en términos de acidificación del aire solamente si substituye el combustible diésel para un autobús o un auto. El uso del biogás evita la emisión de los compuestos de sulfuro que contienen los combustibles diésel. La utilización del combustible del biogás en un autobús o un carro emite menos óxidos de nitrógeno que la utilización del diésel.

Las diversas aplicaciones del biogás tales como combustible para los autobuses o los carros de la basura que substituya el combustible diésel son las más interesantes en lo referente a los 4 indicadores (potencial del calentamiento del planeta, acidificación del aire, eutroficación y consumo de la energía primaria). Para los impactos en potencial del calentamiento del planeta, la acidificación del aire y la eutroficación, las diversas aplicaciones del biogás como combustible aparecen como más positivas que bajo la forma de cogeneración y electricidad. Esta tendencia es menos obvia para los impactos en la acidificación y la eutroficación del aire si el combustible substituido es gas natural.

El uso del biogás en la cogeneración es especialmente interesante para el consumo de la energía no renovable primaria. En relación con la energía no renovable primaria (del impacto), la cogeneración es el uso más preferible, pues permite alcanzar un de alto rendimiento debido a la producción de electricidad y de calor. En relación con los otros impactos, la cogeneración no tiene un buen punto ambiental que el uso del biogás para la producción de calor substituyendo al producido

por el aceite combustible. Los impactos evitados debido a la producción combinada del calor y de electricidad son más bajos que los impactos evitados por la producción de calor solamente. Esto asume que 100% del calor producido está utilizado. Si la demanda del calor de un cliente externo es igual para ambos procedimientos (producción y cogeneración de calor), el uso del biogás en una cogeneración es más interesante en términos de emisiones de gas del calentamiento del planeta debido a la producción evitada de electricidad.

La producción de electricidad es el procedimiento en desventaja para “el impacto efecto invernadero”. Los impactos evitados dependen principalmente de la producción eléctrica nuclear que emite relativamente pocos gases del calentamiento del planeta. Este método de producción tiene sin embargo algunos impactos específicos no incluidos en este estudio, especialmente la producción de desechos radioactivos. Si el biogás se puede utilizar para sustituir la producción de electricidad de una central eléctrica de gas natural, este método de la utilización llega a ser muy interesante en términos de su contribución del calentamiento del planeta. En este caso, el método de la utilización del biogás basado en la producción de electricidad es mejor que su utilización como combustible en los carros con la sustitución del diésel. Para las otras categorías del impacto, el uso del biogás en la producción eléctrica permite evitar el consumo de energía y después la producción de calor (con la sustitución de gasolina y aceite), la cogeneración y el uso de combustible (que substituye la gasolina en un coche).

3.5.3 Beneficios del biogás

3.5.3.1 Beneficios humanos

3.5.3.1.1 Salud

Algunas de las ventajas sobre salud con la puesta en marcha de plantas del biogás son: Reducción de la exposición al humo en el ambiente de interior, reducción en las infecciones respiratorias agudas en la población de todas las edades, índices mejorados de mortalidad infantil, reducción de enfermedades en los ojos, reducción de las concentraciones de monóxido de carbono, formaldehído y partículas suspendidas en los ambientes de interior (Pandey, 1984).

3.5.3.1.2 Higiene

Debido a la carencia de la colección y del tratamiento de las aguas residuales en las infraestructuras de la zona de Santa Rosa, las excreciones humanas con su mal manejo y aguas residuales son problemas graves. Las enfermedades contagiosas tales como diarrea, cólera y tuberculosis, etc. son ocurrencias comunes en zonas rurales. Sin embargo, el uso de digestores ha ayudado a mejorar la situación de la higiene. Se estima que 77,000 hogares en Nepal rural, tienen baños conectados con las plantas del biogás (Bajgain y col., 2005).

3.5.3.1.3 Ventajas de ahorro en las amas de casa

Desde mujeres y niños están involucrados en la recolección de la leña, con el uso de los digestores, se ha podido reducir hasta 3 horas diarias del tiempo que pasaban en la recolección de leña (Dahal, 2005). Ésto es equivalente a un ahorro de más de 35,000 horas de trabajo de niños y mujeres por año versus las horas de trabajo de la instalación de 111,000 plantas del biogás en el país (EC, 2003).

3.5.3.1.4 Educación

Hay una escasez severa de energía térmica y eléctrica en zonas rurales. Ésto hace imposible para que los niños se involucren en actividades de educación por la tarde después de la puesta del sol. El establecimiento de digestores ha proporcionado la energía para más de 20,000 hogares en las

zonas rurales (EC, 2003). Esto ha proporcionado los medios convenientes para la lectura o el estudio incluso en la obscuridad.

3.5.3.1.5 Generación de empleo

Se emplean aproximadamente 11,000 personas en el sector del biogás. La distribución del empleo es como sigue: 6,000 técnicos, 2,700 administrativos/financieros, 800 promotores locales, y los repartidores. El efecto secundario del empleo en el sector del biogás se ha estimado para proporcionar el empleo para alrededor de las 65,000 personas adicionales por toda la nación de Nepal (Bajgain y col., 2005).

3.5.3.2 Ventajas económicas y ambientales

La demanda de la energía en una gran población conlleva a una gran presión sobre los recursos naturales y el ambiente, además de restricciones severas de desarrollo sostenible de esa área (Guo y col., 2006). El consumo de energía para una vivienda es un proceso de interacción entre el ambiente y la economía.

3.5.3.2.1 Reducción de los residuos

El método de la pirámide permite obtener una jerarquía para una estrategia de la gestión de desechos. Antes de la instalación de las plantas del biogás, las grandes cantidades de residuos de la agricultura se utilizaban en estufas de cocina, que causaron una gran contaminación de interior por el humo generado. Puesto que, 2.7 kilogramos de residuos de la agricultura se utilizan como sustrato en los digestores (110.000 toneladas de a escala nacional), se convierten a gas de metano, que es una forma de energía muy eficiente sin el humo y las partículas de hollín (EC, 2003).

3.5.3.2.2 Reducción del estiércol de animales

Hace varios años, el estiércol se utilizaba para aumentar la capacidad calorífica en el cocimiento de tabiques. En otras áreas el estiércol se secaba para después quemarlo como combustible sólido en las estufas de las áreas rurales. Como en el caso de los residuos agrícolas, el estiércol de ganado se convierte a una energía eficiente bajo la forma de gas de metano (BSP, 2006).

3.5.3.2.3 Reducción de la utilización de keroseno

El keroseno es ampliamente utilizado en Nepal y otros lugares, para cocinar y para otros propósitos de calentamiento. Debido a la instalación de las plantas del biogás, el uso del keroseno se ha reducido, en el caso de Nepal hasta por casi 7.7 millones de litros por año (BSP, 2006). Puesto que los productos petrolíferos algunos se importan, la reducción del uso del keroseno ha ahorrado aproximadamente US\$2.1 millones de dólares por año.

3.5.3.2.4 Reducción del uso de fertilizante químico

El digestor produce fertilizante orgánico con alto contenido de nitrógeno, potasio y fósforo. El fertilizante se puede utilizar en tierras de labranza como alternativa a los fertilizantes químicos. Los fertilizantes químicos se importan generalmente. Se ha estimado que hay un ahorro anual de 4,329 toneladas de nitrógeno y sustancias con fósforo y 2,109 toneladas de potasio debido a la instalación de los digestores. Ésto se traduce en un ahorro anual de US\$300,000 dólares (BSP, 2006).

3.5.3.2.5 Reducción del consumo de leña

El carbón al quemarse directamente, no sólo emite gases de efecto invernadero y los contaminantes ambientales, tales como SO₂, CO, partículas suspendidas totales, sino también efectos negativos en el ambiente interior de la casa y en la salud de los residentes. Según una estimación reciente, casi

10,000 ha de bosque en la región llana meridional en Nepal se habían perdido debido a las actividades de la recolección de la leña en 2004 (MOES, 2006). Sin embargo, la instalación de las plantas del biogás o digestores ha ayudado a proteger el bosque. Por ejemplo, por cada hogar que ha instalado una planta del biogás tiene un ahorro anual de 2 toneladas de leña (EC, 2003). Ésto significa que hay un ahorro a escala nacional de más de 200,000 toneladas de leña por año.

3.6 Conclusiones

De los 4 procesos de transformación analizados, el mayor contaminante por unidad de energía obtenida, es la combustión alimentada por combustible fósil, de los combustibles fósiles analizados, el mayor contaminante es el carbón, con una emisión de 2.7×10^{-7} tonCO₂ eq/KJ_e, seguido de la combustión alimentada por carbón y biomasa con 2.5×10^{-7} tonCO₂ eq/KJ_e, con respecto a la combustión de biomasa, se aprecia una disminución muy marcada en la generación de emisiones, con 9.7×10^{-9} tonCO₂ eq/KJ_e, dicha disminución se debe a que a la biomasa se le considera con cero emisiones netas de bióxido de carbono cuando se reincorpora a su ciclo de vida natural, entre la producción y la combustión, sin embargo, otras etapas del ciclo de vida sí producen emisiones, como lo es el transporte o el pretratamiento de acondicionamiento.

El proceso de transformación que tiene las emisiones por debajo de la combustión de combustible fósil, es la gasificación del carbón con 2.2×10^{-7} tonCO₂ eq/KJ_e, cuando se alimenta la planta con biomasa únicamente, los niveles de emisión bajan significativamente, debido a las cero emisiones netas de bióxido de carbono, como sucede en el caso de la combustión, con una emisión de 5.0×10^{-9} tonCO₂ eq/KJ_e. Cuando la planta se alimenta dualmente, se toma en consideración, tanto la emisión del combustible fósil y la emisión de la biomasa.

Un factor clave en la generación total de emisiones, es la distancia de transporte de la biomasa como materia prima, a la planta o instalación de transformación. Según la IEA, el transporte de 2.9 millones de m³ de árboles talados, a una distancia de 120 Km, resulta en 24,400 ton de CO₂ emitido, mientras que la recolección y triturado del material solo 8,000 ton CO₂. En los primeros 50 Km de distancia de transporte se producen aproximadamente 78 gCO₂ eq/KWh y a los 200 Km la emisión aumenta a 90 gCO₂ eq/KWh, lo que implica que a mayor distancia más emisiones.

La digestión llevada a cabo en relleno sanitario es tan contaminante como la combustión de un combustible fósil, como lo es el combustóleo con 2.0×10^{-7} tonCO₂ eq/KJ_e. La pirólisis de los residuos sólidos resulta ser casi tan contaminante como la combustión de los residuos sólidos con 1.2×10^{-7} tonCO₂ eq/KJ_e y 1.3×10^{-7} tonCO₂ eq/KJ_e, respectivamente. Sin embargo las plantas pirolíticas tipo autosuficientes, son las que tienen menores emisiones, debido a que en este tipo de plantas, se produce tanto el aceite pirolítico como combustible y la electricidad obtenida al utilizar dicho combustible directamente, por lo que sus emisiones son del orden de 1.2×10^{-8} - 1.0×10^{-9} tonCO₂ eq/KJ_e. La emisión de la digestión en reactores con 9.0×10^{-8} tonCO₂ eq/KJ_e, queda colocado entre la cantidad de emisiones de los residuos en proceso pirolítico y la gasificación de los residuos en ciclo combinado, con 1.2×10^{-7} tonCO₂ eq/KJ_e y 4.9×10^{-8} tonCO₂ eq/KJ_e, respectivamente.

Tabla 3.10 Comparativo de tecnologías en su generación de contaminantes

Tecnología	TonCO ₂ eq/KJ _e	Referencia
Combustión		
Carbón	2.7×10^{-7}	(Varun y col., 2008)
Combustóleo	2.0×10^{-7}	(Varun y col., 2008)
Gas natural	1.6×10^{-7}	(Varun y col., 2008)
Biomasa	9.7×10^{-9} - 2.3×10^{-8}	(Sims, 2002; Varun y col., 2008)
Biomasa y carbón	2.5×10^{-7}	(Fan y col., 2010)
Residuos urbanos	1.3×10^{-7}	(Zaman, 2010)
Gasificación		
Biomasa de madera	5.0×10^{-9} - 1.01×10^{-8}	(Sims, 2002)

Carbón (IGCC)	$1.9 \times 10^{-7} - 2.2 \times 10^{-7}$	(Varun y col., 2008)
Biomasa (10%)-carbón (90%)	1.02×10^{-8}	(Varun y col., 2008)
Biomasa residual (IBGCC con absorción química de CO ₂)	4.94×10^{-8}	(Varun y col., 2008)
Pirólisis		
Aceite pirolítico en planta TGCC y generador diésel	1.2×10^{-8}	(Fan y col., 2010)
Aceite pirolítico en planta con generador diésel	$1.0 \times 10^{-9} - 1.1 \times 10^{-8}$	(Fan y col., 2010)
Aceite pirolítico en planta convencional (carbón)	$2.8 \times 10^{-8} - 4.6 \times 10^{-8}$	(Fan y col., 2010)
Aceite pirolítico en planta convencional (gas natural)	$2.2 \times 10^{-8} - 3.6 \times 10^{-8}$	(Fan y col., 2010)
Residuos Urbanos	1.2×10^{-7}	(Khoo y col., 2009)
Digestión		
Desechos sólidos urbanos	$2.1 \times 10^{-8} - 9.0 \times 10^{-8}$	(Wirawat y col., 2006; ADEME, 2007)
Relleno sanitario	2.0×10^{-7}	(Khoo y col., 2010)

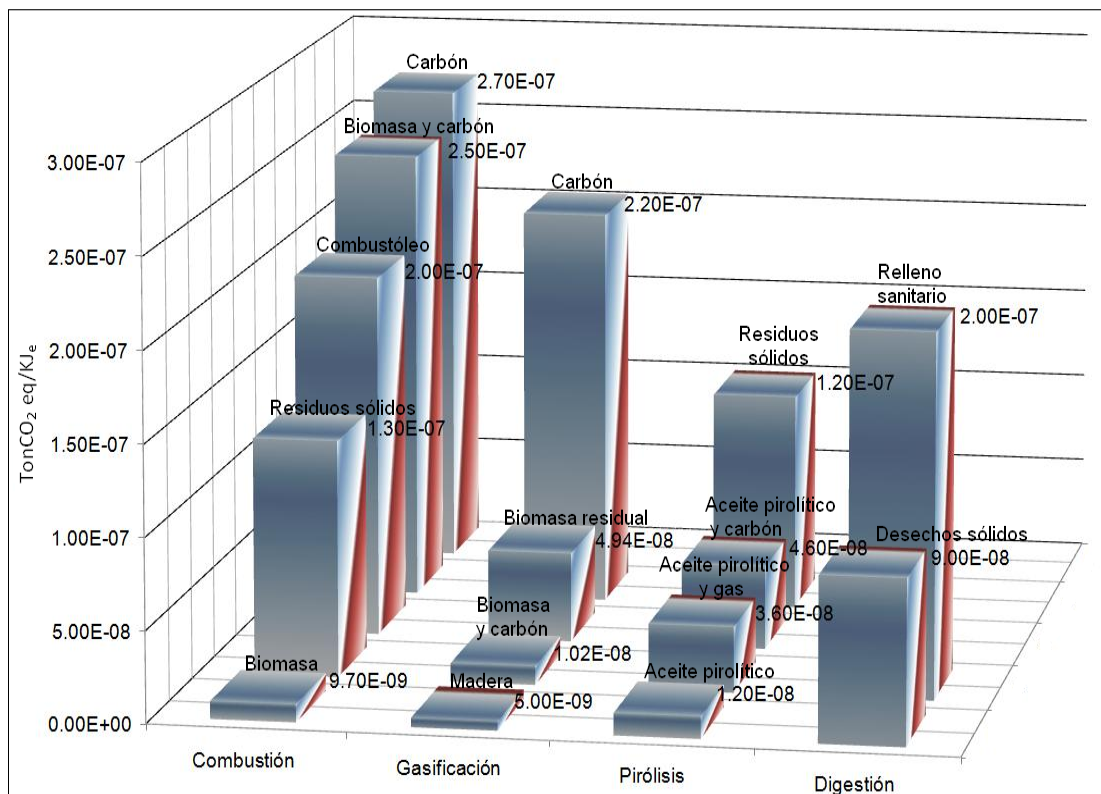


Figura 3.12 Diagrama de barras de los resultados comparativos de las tecnologías en la generación de contaminantes