

Evaluación ambiental mediante algoritmo de reducción de residuos WAR de la producción de aceite y biochar a partir de aguacate criollo en el Norte de Colombia

Tamy Herrera-Rodríguez, Vianny Parejo-Palacio, & Ángel González-Delgado

Grupo en Nanomateriales e ingeniería de procesos asistida por computador (NIPAC), Departamento de Ingeniería Química, Facultad de ingeniería, Universidad de Cartagena, Colombia.



Para citaciones: T. Herrera-Rodríguez, V. Parejo-Palacio, Á. González-Delgado, "Evaluación ambiental mediante algoritmo de reducción de residuos WAR de la producción de aceite y biochar a partir de aguacate criollo en el Norte de Colombia", *Ing-NOVA*, vol. 2, no. 1, pp. 11-22, Ene. 2023.
<https://doi.org/10.32997/rin-2023-4259>

Recibido: 26 de octubre de 2022

Revisado: 26 de diciembre de 2022

Aprobado: 10 de enero de 2023

Autor de correspondencia:

Ángel González Mercado

agonzaled1@unicartagena.edu.co

Editor: Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

Copyright: © 2023. T. Herrera-Rodríguez, V. Parejo-Palacio, Á. González-Delgado. Este es una editorial de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



RESUMEN

En el norte de Colombia la producción y cultivo de aguacate de variedad criollo-antillano (*Laurus persea* L) se centra en la región de los Montes de María; no obstante, parte importante de esa producción se desecha debido a la falta de infraestructura para la distribución, comercialización y valorización. Por otro lado, el consumo de este genera residuos como la cáscara y la semilla, que pueden ser aprovechables gracias a su composición. Lo anterior, ha motivado la búsqueda de alternativas de valorización de residuos que mejoren la sustentabilidad de la cadena de procesamiento; por lo tanto, resulta necesario evaluar la viabilidad de la producción a gran escala de aceite de aguacate y el aprovechamiento de residuos como la semilla bajo las condiciones del Norte de Colombia. En este trabajo se evaluó desde el punto de vista ambiental el proceso de extracción de aceite y biochar de aguacate (*Laurus persea* L), a partir de la pulpa y la semilla, respectivamente. La evaluación ambiental se realizó mediante el software WARGUI, el cual tiene en cuenta flujos másicos y propiedades de las sustancias que intervienen en el proceso, evaluándolo bajo 4 categorías atmosféricas y cuatro toxicológicas. Luego de modelar los procesos se obtuvo una producción de aceite de aguacate de 1.000,01 t/año y 504,78 t/año de biochar. Los resultados obtenidos posibilitaron evaluar el comportamiento de los procesos bajo el criterio ambiental, obteniéndose impactos totales de salida de 60 PEI/h, además se observó que los casos 2 y 4 tienen los mayores impactos en las categorías HTPI y TTP. Los impactos de salida totales indican que el proceso es amigable desde el punto de vista ambiental lo que hace atractivo el montaje de una planta de valorización de residuos del cultivo de aguacate al norte de Colombia.

Palabras clave: Aceite de aguacate; biochar; algoritmo WAR; impactos ambientales.

Environmental evaluation by WAR algorithm of oil and biochar production from Creole avocado in North-Colombia

ABSTRACT

In the north of Colombia, the production and cultivation of avocado of the Creole-Antillean variety (*Laurus Persea* L) are located in the Montes de María region; however, an important part of this production is discarded due to the lack of

infrastructure for distribution, marketing, and valorization. On the other hand, avocado consumption generates waste such as the peel and seed, we can take advantage of this waste due to its valuable composition, this motivated the seek for waste valorization alternatives to improve the sustainability of the processing chain. Therefore, it is necessary to evaluate the feasibility of large-scale production of avocado oil obtention and make the most of wastes as seed under the conditions of northern Colombia. In this work, the process of extracting oil and biochar from avocado (*Laurus persea* L), from the pulp and seed, respectively, was evaluated from the environmental point of view using the WAR algorithm. After modeling the processes, an avocado oil production of 1.000,01 t/y and 504,78 t/y of biochar was obtained. The results obtained made it possible to evaluate the behavior of the processes under the environmental criteria, obtaining total output impacts of 60 PEI/h, it was also observed that cases 2 and 4 have the greatest impacts in the HTPI and TTP categories.

Keywords: Avocado oil; biochar; algorithm WAR; Environmental impacts.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia se posesiona como un importante productor de aguacate (*Persea Americana Mill*) en latino América con una oferta diversa, algunas de ellas corresponden a la raza antillana (variedad Lorena y criolla) y guatemalteca (variedad Hass) [1, 2]. En el departamento de Bolívar y la región de los Montes de María se estima una producción de 35.000 toneladas anuales de aguacate de variedad criollo-antillano (*Laurus persea* L) [3]; sin embargo, en los últimos años en la región se ha observado el deterioro y pudrición de las raíces y por consiguiente la muerte de los árboles de aguacate, debido a la presencia de hongos, el mal estado en el que se encuentran las vías, así como la falta de estrategias de comercialización, estandarización y de mejores prácticas productivas en la zona [4]. Lo anterior conlleva al deterioro de las frutas, ocasionando diversos problemas a la comunidad, tales como: la generación de residuos agrícolas y lixiviados que desmejoran la calidad del aire, agua y suelos de la población [5].

Los residuos del procesamiento industrial del aguacate representan el 21- 30 % en peso del fruto, como resultado se generan grandes cantidades de desechos con compuestos bioactivos y aceites esenciales que no son aprovechados, algunos son usados para la elaboración de compostaje o alimento para ganado, pero podrían ser transformados en productos de mayor valor agregado [6]. Debido a lo anterior, cada vez más se conocen formas de aprovechamiento del aguacate a nivel industrial, la pulpa puede ser aprovechada para la obtención de diversos productos, principalmente en la extracción de aceite; lo cual, puede llevarse a cabo a través de distintos métodos, bien sean mecánicos, termomecánicos, enzimáticos o de extracción con solventes [7]. De acuerdo con esto, para la extracción de aceite de aguacate existe una amplia gama de solventes que pueden ser empleados, tales como: hexano, etanol, cloroformo, acetato de etilo, entre otros; cada uno ofrece un porcentaje de extracción de aceite y unas condiciones de proceso distintas [8].

Por otra parte, las industrias encargadas de procesar frutas y verduras deben lidiar diariamente con la generación de altas cantidades de residuos agroindustriales y los efectos negativos asociados al manejo inadecuado de los mismos; por tanto, resulta necesaria la generación de alternativas integradas de biorrefinerías para la valorización de estos residuos ya que contienen componentes de valor agregado como carbohidratos, proteínas, lípidos, entre otros [9].

Existen metodologías de evaluación de procesos desde el punto de vista ambiental, una de ellas es el análisis mediante el algoritmo de reducción de residuos. Montoya y colaboradores evaluaron el impacto del proceso de obtención de alcohol carburante a partir del aprovechamiento de residuos de la caña de azúcar y maíz, determinaron que la obtención de alcohol a partir de maíz genera impactos potenciales menores que el alcohol a partir de caña de azúcar, debido a que se produce una menor cantidad de vinazas [10]. Aguilar y González evaluaron mediante WAR el proceso de producción de microperlas de quitosano modificadas con TiO₂ y magnetita observando que la generación de impactos potenciales ambientales es negativa, lo que se atribuye a la transformación de sustancias de alto impacto en sustancias de menor impacto [11]. Meramo y colaboradores, desarrollaron la evaluación ambiental y exergética del proceso de producción de quitosano a partir del exoesqueleto de camarón en Colombia, obteniendo impactos totales generados negativos para todos los casos propuestos [12].

La presente investigación estudia y evalúa la sostenibilidad de alternativas de aprovechamiento del aguacate mediante la obtención de productos de valor agregado a partir de la pulpa y semilla, usando como materia prima los frutos maduros de la región de los Montes de María, que no son atractivos para consumo. Para ello se emplearán herramientas de ingeniería de procesos asistida por computador con la cual se evalúa el proceso desde el punto de vista ambiental, con el objetivo de identificar que tan contaminante resulta el aprovechamiento del aguacate (*Laurus persea L*) a nivel industrial evaluado bajo condiciones del Norte de Colombia.

2. Materiales y métodos

- A. Descripción del proceso: inicia con el lavado del aguacate con una solución de hipoclorito de sodio (corriente 2) para eliminar las impurezas, luego se separa la pulpa de la cáscara (corriente 6) y la semilla (corriente 8), la pulpa (corriente 7) es enviada a la etapa de homogenización, mientras que la cáscara y la semilla se envían a una etapa de lavado para retirar la pulpa remanente (corriente 17), el agua resultante del lavado se centrifuga separando el agua de la pulpa, la cual se envía a la etapa de homogenización junto con la pulpa que inicialmente se separó (corriente 7). Después la pulpa se seca a 70 °C con el fin de retirar el contenido de humedad presente en ella [13] y posteriormente se realiza la extracción con hexano manteniendo una temperatura de 70 °C [13], la corriente resultante (corriente 23) se centrifuga obteniéndose pulpa residual y una mezcla aceite-hexano (corriente 25), la mezcla se destila obteniéndose una corriente con hexano recuperado (corriente 28), parte de este se recircula a la etapa de extracción (corriente 30), y el aceite obtenido (corriente 27) se refrigera a 18 °C para evitar la oxidación de sus componentes [14]. Los bloques en verde presentados en la Figura 1 corresponden a las etapas anteriormente descritas correspondientes al proceso de obtención de aceite de aguacate.

Mientras que los bloques en amarillo representan las etapas para la producción de biochar a partir de la semilla de aguacate.

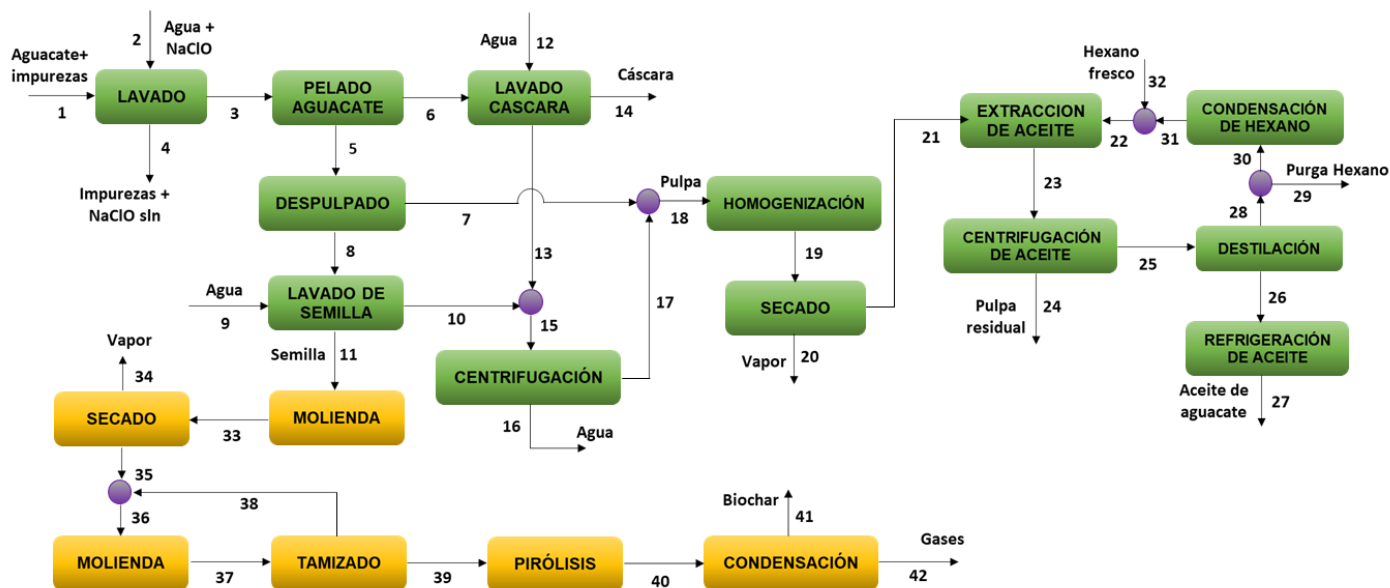


Figura 1. Diagrama del proceso de obtención de aceite de aguacate y biochar a partir de pulpa y semilla.

Como se observa en la Figura 1, la semilla resultante del lavado (corriente 11) se envía a una etapa de molienda para disminuir su tamaño previo a la reducción de humedad durante el secado, en esta etapa ingresa una corriente de aire a 110 °C [15]. La semilla deshidratada (corriente 35) se envía nuevamente a un molino para reducir el tamaño de partícula del material, la corriente resultante se tamiza recirculando al molino la semilla (corriente 38) que no tiene el tamaño deseado y el resto (corriente 39) se envía a la etapa de pirólisis donde se obtienen productos en fase sólida correspondiente al biochar (corriente 42) que es el producto de interés y volátiles (corriente 41). El reactor de pirólisis se trabajó a 400 °C, temperatura a la que se obtiene una mayor conversión de biomasa en biocarbón sin el uso de catalizador [16]. Finalmente se obtuvo que a partir de 10.605 toneladas de aguacate es posible obtener 1.000,01 t/año de aceite de aguacate a partir de la pulpa y 504,78 t/año de biochar a partir de la semilla de este mismo fruto. La composición química de la pulpa y la semilla del aguacate se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición aproximada de la pulpa y semilla del aguacate (%p/p) [17].

Constituyente (%)	Pulpa	Semilla
Humedad	78,24 ± 2,54	56,04 ± 2,58
Lípidos	15,39 ± 1,56	1,87 ± 0,31
Carbohidratos	4,17 ± 1,37	33,17 ± 2,73
Proteína	1,01 ± 0,18	1,95 ± 0,16
Ceniza	0,66 ± 0,09	1,87 ± 0,24
Fibra	0,53 ± 0,16	5,10 ± 1,11

- B. Algoritmo de reducción de residuos WAR: es una metodología desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, para determinar el potencial de impacto ambiental (PEI) de un proceso químico. Este permite determinar qué proceso es mejor desde el punto de vista de la generación de PEI en el proceso, en función de los desechos de salida y el consumo energético. El

algoritmo WAR calcula el PEI, en función de 8 categorías diferentes [18, 19], considerando características de las sustancias como dosis y concentración letal (LD_{50} y LC_{50} , respectivamente), potencial de calentamiento global, peso molecular, número CAS, fórmula, entre otras [20].

El software tiene en cuenta cuatro categorías atmosféricas y cuatro toxicológicas. Dentro de las atmosféricas se encuentra el ODP o Potencial de agotamiento de ozono, el cual mide la tasa de reacción de un compuesto con ozono usando como referencia la tasa de reacción del ozono con el triclorofluorometano (CFC-11), por su parte, el GWP o Potencial de calentamiento global, mide la cantidad de radiación que puede absorber un compuesto, comparada con la cantidad que absorbe el dióxido de carbono (CO_2); la categoría PCOP o Potencial de oxidación fotoquímica mide la tasa de reacción de un compuesto con hidroxilo usando como referencia la reacción del etileno con el mismo y el AP o Potencial de acidificación que cuantifica la tasa de liberación de H^+ del dióxido de azufre (SO_2); estas categorías corresponden a las Ec. (1), (2), (3) y (4), respectivamente [21].

$$ODP = \frac{\delta[O3]i}{\delta[O3]FCKW - 11} m_i \quad (1)$$

$$GWP = \frac{\int_0^t a_i c_i(t) dt}{\int_0^t a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt} m_i \quad (2)$$

$$PCOP = \frac{\frac{a_i}{b_i(t)}}{\frac{a_{C_2H_4}}{b_{C_2H_4}(t)}} m_i \quad (3)$$

$$AP = \frac{(Vi/Mi)}{(V_{SO_2}/M_{SO_2})} \quad (4)$$

Por su parte, para el cálculo de los impactos toxicológicos se tiene las categorías HTPI o Potencial de toxicidad por ingestión, HTPE o Potencial por exposición dérmica, ATP o Potencial de toxicidad acuática y TTP o Potencial de toxicidad terrestre los cuales pueden ser determinados al aplicar las Ec. (5), (6), (7) y (8) [21]. El ATP mide la concentración letal que causa la muerte del 50 % de una muestra de peces (carpitas cabezonas), a su vez el HTPE se determina para sustancias químicas que existen como gas a temperatura de 273 K y 1 atmósfera de presión, a algunas sustancias se le asignan valores umbrales (TLV) según lo recomienda la OSHA o NIOSH; por último, el ATP y el HTPI mide la dosis oral letal que causa la muerte del 50 % de una muestra de ratas.

$$HTPI = \frac{1}{LD_{50}} \quad (5)$$

$$HTPE = \frac{1}{TLV} \quad (6)$$

$$ATP = \frac{1}{LC_{50}} \quad (7)$$

$$TTP = \frac{1}{LD_{50}} \quad (8)$$

Resultados y discusión

Para la evaluación ambiental se establecieron 4 casos de estudio, con el fin de observar el comportamiento ambiental del proceso al considerar o no ciertas variables; el caso 1 no tiene en cuenta los impactos del producto ni de la fuente de energía; el caso 2 tiene en cuenta los impactos de los productos; por su parte el caso 3, considera solo los efectos de la fuente de energía y, por último, el caso 4 considera los efectos de la fuente de energía y del producto en el proceso. La evaluación ambiental se realizó mediante WAR, para ello se identificaron las sustancias (agua, hexano, ácidos grasos, material lignocelulósico, nitrógeno, cenizas, isofitol, hipoclorito de sodio, entre otros) que intervienen en la obtención de aceite y biochar, así mismo sus flujos másicos. Fue necesario incluir a la base de datos del simulador el compuesto oleato, este tiene una fórmula y masa molecular parecidos al ácido oleico, al software se agregó su fórmula $C_{18}H_{33}O_2$, masa molecular $281,45 \text{ g/mol}$ y número Cas #115 – 06 – 0 [22], en la literatura no se reportan valores toxicológicos para el oleato por lo que se asumió que la dosis letal y la concentración letal son iguales a las del ácido oleico. Así mismo, se consideró el consumo energético del proceso el cual fue de $3.255,47 \text{ MJ/h}$.

En la literatura no se tienen datos sobre la toxicidad de la semilla de aguacate, se sabe que esta biomasa se compone de hemicelulosa, celulosa, lignina, extractivos y cenizas, debido a esto se simuló como xilosa, uno de los compuestos del cual está formada la hemicelulosa [23]. En la Figura 2 es posible observar los impactos totales generados (Igen) y de salida (Isal) por hora del proceso de obtención de biochar y aceite a partir del aguacate (*Laurus persea L*). Se obtienen impactos de salida de 60 PEI/h e impactos generados de -107 PEI/h , esto se debe a que en el proceso algunas sustancias no se aprovechan tales como la pulpa sin grasa, parte del hexano, gases, vapor y agua. Si se comparan los impactos con los reportados en el proceso de obtención de biodiesel ($4,83 \times 10^4 \text{ PEI/h}$) [24], el presente estudio tiene impactos mucho menores. Así mismo, Los valores negativos en los impactos generados indican una disminución en los impactos potenciales, pues algunas sustancias contaminantes son recirculadas al proceso [25], en este caso parte del hexano, enviándose a la etapa de extracción de aceite. Además, se deben al aprovechamiento de residuos como semilla y pulpa descartada.

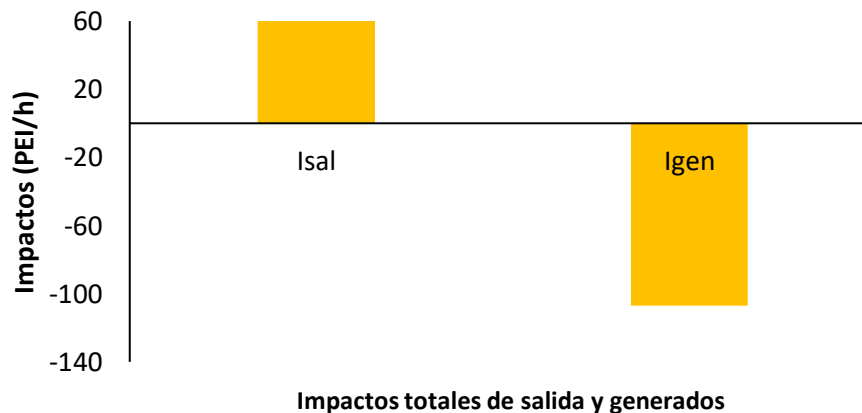


Figura 2. Impactos de salida y generados por unidad de tiempo para el proceso de obtención de aceite y biochar.

La Figura 3 representa los impactos de salida y generados por kilogramo de producto correspondientes a $0,38 \text{ PEI/kg.p}$ y $-0,68 \text{ PEI/kg.p}$, respectivamente, conservando el comportamiento antes descrito, es decir, los impactos de salida son mayores que los generados. Los impactos de salida se deben a que en el proceso el proceso de pirólisis se obtienen gases que no son aprovechados. Mientras que los impactos de generados indican que desechos como la semilla y la pulpa que no es atractiva para consumo humano están siendo aprovechados para la obtención de productos de valor agregado como aceite y biochar. Montoya y colaboradores evaluaron el proceso de obtención de etanol a partir de desechos del cultivo de la caña y el maíz obteniendo impactos de salida aproximadamente de $0,32 \text{ PEI/kg.p}$ $0,32$ para el etanol obtenido a partir de maíz y $0,41 \text{ PEI/kg.p}$ para el proceso de producción de etanol mediante el aprovechamiento de residuos de la caña de azúcar [10], es decir en ambas rutas se tienen bajos impactos de salida por kilogramo de producto indicando que la extracción de etanol es ambientalmente viable.

De acuerdo con esto, es posible deducir que el proceso de obtención de aceite y biochar de aguacate es amigable desde el punto de vista ambiental.

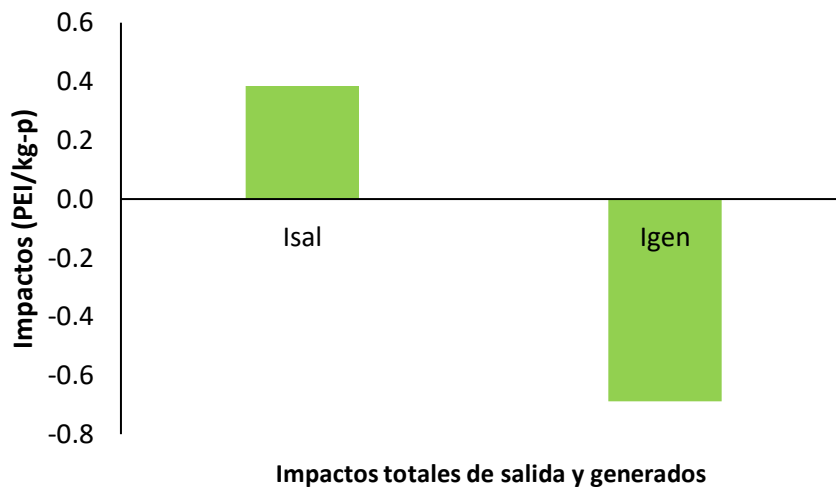


Figura 3. Impactos de salida y generados por kg de producto para el proceso de obtención de aceite y biochar.

En la Figura 4 se tiene en cuenta el efecto de los casos 1, 2, 3 y 4 en las categorías atmosféricas y toxicológicas para el proceso evaluado. Se observa que las categorías ATP y PCOP tienen los mayores impactos ($0,153 \text{ PEI/kg.p}$ y $0,0749 \text{ PEI/kg.p}$, respectivamente) en el caso 1 en comparación con el resto de las categorías. Para el caso 2, las categorías donde se incrementan los impactos de salida corresponden a HTPI y TTP ambas categorías toxicológicas con impactos iguales ($2,35 \text{ PEI/kg.p}$). Los impactos en las categorías HTPI y TTP están relacionadas con el efecto que tienen las sustancias como el hexano, al ser inhaladas por los humanos o al entrar en contacto con los ecosistemas terrestres. El hexano es una sustancia que se evapora y que entra en contacto con el oxígeno presente en el aire y el agua provocando contaminación, así mismo, puede depositarse en el suelo [26]. Con respecto a la categoría AP se tienen 0 PEI/kg.p , puesto que los casos evaluados (1 y 2) no tienen en cuenta la fuente de energía y no se generan sustancias que provoquen la acidificación de los ecosistemas.

Teniendo en cuenta el efecto de incluir en el proceso la corriente de producto y la fuente de energía (casos 3 y 4) se tienen los mayores PEI/kg-p para las categorías ATP, TTP, HTPI, AP y PCOP como lo muestra la Figura 4. Para el caso 3 los impactos son mayores específicamente en las categorías ATP y PCOP (0,154 y 0,0749 PEI/kg.p, respectivamente), para el caso 4 también se generan mayores impactos especialmente en las categorías toxicológicas como HTPI, TTP y ATP (2,35 PEI/kg.p, 2,35 PEI/kg.p y 0,445 PEI/kg.p, respectivamente), estos resultados pueden justificarse debido a que hay corrientes de residuos que no están siendo aprovechadas, pero que tienen un alto potencial para ser usadas como fuente de energía para este u otros procesos, con el fin de que los impactos se reduzcan aún más. Por otro lado, para los casos 3 y 4 la categoría AP presenta impactos iguales para ambos casos (0,0218 PEI/kg.p).

Los resultados obtenidos se deben al uso de sustancias como hexano, en el proceso de extracción de aceite. Así mismo, al efecto que tiene incluir la fuente de energía y la corriente de producto en el análisis ambiental. Los resultados en las categorías atmosféricas GWP, ODP y AP, se deben al efecto que provoca el material producto de la combustión de la fuente de energía empleada para la obtención de los diferentes productos a partir de aguacate. Cabe aclarar que son impactos muy bajos ($3,79 \times 10^{-9}$ PEI/kg.p y $1,03 \times 10^{-3}$ PEI/kg.p, ODP y GWP, respectivamente).

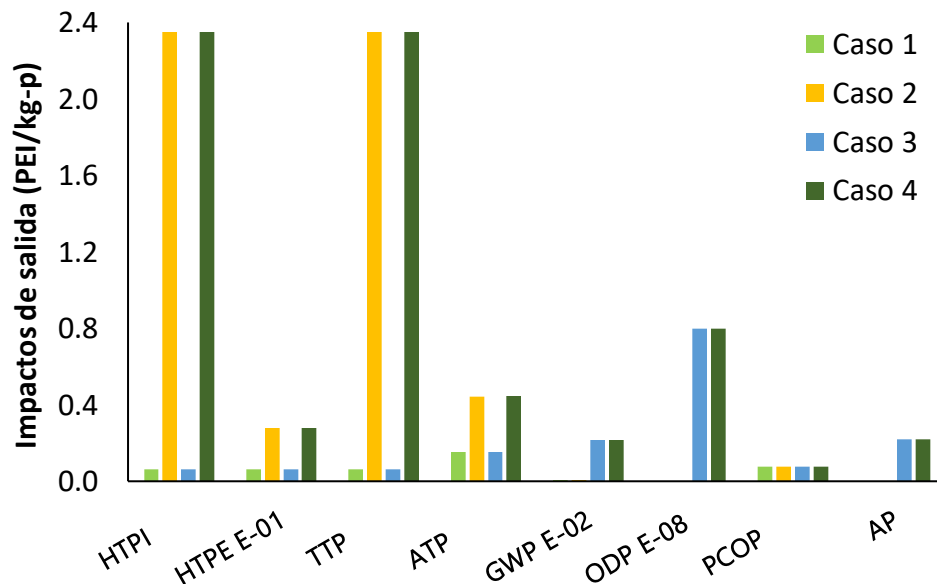


Figura 4. Impactos ambientales de salida por categoría para el proceso de obtención de aceite y biochar teniendo en cuenta 4 casos de estudio.

En la Figura 5 se muestran los impactos generados teniendo en cuenta la fuente de energía, en este caso se reportan los impactos por categoría al usar gas para cubrir los requerimientos energéticos. Se observó que la categoría de potencial de acidificación arroja los mayores impactos, el proceso usa más equipos en comparación con el proceso de obtención de solo aceite de aguacate, especialmente para realizar procesos de transferencia de masa y energía, como secados, condensaciones, enfriamientos, entre otros.

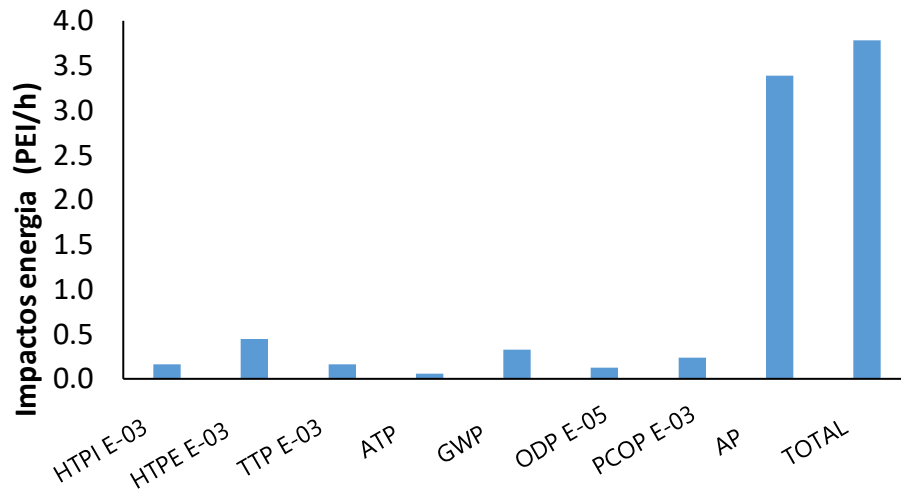


Figura 5. Impactos por categoría teniendo en cuenta el efecto del gas como fuente de energía en el proceso de obtención de aceite y biochar de aguacate.

El impacto de la categoría AP es de $3,39 \text{ PEI/h}$, esto se debe a que la fuente de energía empleada puede generar sustancias contaminantes que contribuyen a la lluvia ácida [27], pero cabe resaltar que, en comparación con el carbón y el petróleo, el gas es una energía más amigable con el ambiente. Con respecto al Potencial de oxidación fotoquímica se tienen impactos bajos ($2,39 \times 10^{-4} \text{ PEI/h}$), al igual que para el potencial de calentamiento global ($0,32 \text{ PEI/h}$). Fernández y Orozco [28], realizaron una evaluación ambiental del proceso de producción de aceite de microalgas con distintos solventes obteniendo un AP de 473 PEI/h y un GWP de $45,7 \text{ PEI/h}$ para el proceso de extracción de aceite con hexano. Según Moncada et al., [29], los impactos ambientales arrojados por la categoría de potencial de oxidación fotoquímica se deben al uso de solventes en los procesos.

3. Conclusiones

La evaluación ambiental del proceso de obtención de aceite y biochar a partir de la pulpa y semilla del aguacate, respectivamente, permite identificar que el montaje de esta planta bajo condiciones de la región de los Montes de María es amigable con el medio ambiente. De acuerdo a los resultados el proceso es seguro, pero existen opciones de mejoras al aprovechar corrientes de salida de agua, vapor y demás residuos; ya que, los impactos de salida son mayores a los generados por unidad de tiempo (60 PEI/h y -107 PEI/h , respectivamente). Con respecto a los impactos por categoría es posible observar que el efecto de la fuente de energía incrementa los impactos en la categoría de potencial de acidificación AP, así mismo, el uso de solventes como el hexano para la extracción de aceite provoca impactos en las categorías toxicologías, debido a la volatilidad de la sustancia y al efecto que podría causar en los distintos ecosistemas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Cartagena por suministrar los equipos y software necesarios para concluir satisfactoriamente esta investigación.

Referencias

- [1] J. Solarte, M. Ortiz, D. Restrepo, A. Pérez, P. Peroza, and C. Cardona, "Influence of products portfolio and process contextualization on the economic performance of small- and large-scale avocado biorefineries," *Bioresour. Technol.*, vol. 342, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126060.
- [2] V. Peláez, and D. Núñez, "Potential exporter of Colombian avocado to South Korea," *Rev. Dig. Mundo Asia Pacífico*, vol. 9(17), pp. 90-103, 2020.
- [3] L. Mallarino, L. Tejada, M. Jiménez, Á. González, and L. Tejada, "Aprovechamiento sostenible del aguacate (*Laurus persea*) para la obtención de productos de valor agregado en los Montes de María en el departamento de Bolívar-Colombia," *Rev. Investig. Agropecu. y Desarro. Sosten.*, vol. 5, pp. 32–38, 2020.
- [4] M. Méndez, U. Humanez, J. Pérez, and C. Bertel, "Estrategias de distribución de la cadena productiva del Aguacate en los Montes de María," *Perspect. Socioec.*, vol. 1(2), 2015, <https://doi.org/10.21892/24627593.228>
- [5] M. Méndez, and R. Martínez, "Análisis descriptivo de la competitividad en la cadena productiva de aguacate en la región Montes de María: una aproximación desde el diamante de Porter," *Diálogo de saberes Cienc. Eco., Admin. y Cont.*. Vol. 4, 2020, <https://doi.org/10.21892/9789585547933.11>
- [6] P. Páramos, J. Granjo, M. Corazza, and H. Matos, "Extraction of high value products from avocado waste biomass," *J. Supercrit. Fluids*, vol. 165, 2020, doi: 10.1016/j.supflu.2020.104988.
- [7] F. Krumreich, C. Borges, R. Mendonça, C. Jansen, and R. Zambiasi, "Bioactive compounds and quality parameters of avocado oil obtained by different processes," *Food Chem.*, vol. 257, pp. 376–381, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.048>
- [8] A. Córdova, and C. Mendoza, "Revisión de literatura sobre el aprovechamiento de la semilla de mango para la extracción de aceite y sus potenciales aplicaciones en diversas industrias," *Ing. Indust.*, vol. 41, pp. 223–253, 2021, <https://doi.org/10.26439/ing.ind2021.n41.5547>
- [9] A. Del Castillo, P. Del Río, A. Pérez, R. Yáñez, G. Garrote, and B. Gullón, "Recent advances to recover value-added compounds from avocado by-products following a biorefinery approach," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 28, p. 100433, 2021, doi: 10.1016/j.cogsc.2020.100433.
- [10] M. Montoya, J. Quintero, Ó. Sanchez, and C. Cardona, "Environmental impact assessment for ethanol production process using the waste reduction algorithm", *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* [online], n.36, pp.85-95, 2006, ISSN 0120-6230.
- [11] E. Aguilar, and Á. González, "Evaluación ambiental de la producción de microperlas de quitosano modificadas con TiO₂ y magnetita usando el algoritmo de reducción de residuos (WAR)", *Rev. Ion*, vol. 34, n. 1, 2021.
- [12] S. Meramo, C. Alarcón, and Á. González, "Exergetic sensibility analysis and environmental evaluation of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia", *Journal of Cleaner Prod.*, vol. 248, 2020,

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119285>

- [13] J. Ariza, F. López, J. Coyotl, M. Ramos, J. Diaz, and A. Martínez, "Effect of different extraction methods on the fatty acid profile in the avocado (*Persea americana* Mill. var. Hass) oil," *Rev. Venezolana Cien. y Tecno. de Alim.*, vol. 2(2), 2011.
- [14] A. Robayo, "Caracterización fisicoquímica de diferentes variedades de aguacate, *Persea americana* Mill. (Lauraceae) e implementación de un método de extracción del aceite de aguacate como alternativa de industrialización," Universidad Nacional de Colombia, 2016, <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59451>
- [15] J. Xue, T. Chellappa, S. Ceylan, and J. Goldfarb, "Enhancing biomass + coal Co-firing scenarios via biomass torrefaction and carbonization: Case study of avocado pit biomass and Illinois No. 6 coal," *Renew. Energy*, vol. 122, pp. 152-162, 2018.
- [16] H. Durak, and T. Aysu, "Effect of pyrolysis temperature and catalyst on production of bio-oil and bio-char from avocado seeds," *Rese. on Chem. Inter.*, vol. 41(11), pp. 8067-8097, 2014, doi: 10.1007/s11164-014-1878-0.
- [17] P. Bora, N. Narain, R. Rocha, and M. Queiroz, "Characterization of the oils from the pulp and seeds of avocado (cultivar: Fuerte) fruits", *Grasas y Aceites*, vol. 52, pp. 171-174, 2001.
- [18] A. Cardona, V. Marulanda, and D. Young, "Analysis of the environmental impact of butylacetate process through the WAR algorithm," *Chem. Eng. Scie.*, pp. 5839-5845, 2004.
- [19] W. Barrett, J. Van, and T. Martin, "Implementation of the waste reduction (WAR) algorithm utilizing flowsheet monitoring," *Comput. Chem. Eng.*, pp. 2680-2686, 2011.
- [20] T. Herrera, V. Parejo, and A. González, "Environmental Analysis of Avocado (*Laurus Persea* L.) Oil Production in North Colombia Using the Waste Reduction Algorithm," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 91, pp. 235-240, 2022, <https://doi.org/10.3303/CET2291040>
- [21] D. M. Young and H. Cabezas, "Designing sustainable processes with simulation: the waste reduction (WAR) algorithm," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 1354, pp. 1477-1491, 1999, doi: 10.1016/S0098-1354(99)00306-3.
- [22] Chemsrsc, "Oleate (CAS#:115-06-0) MSDS," 2022, https://www.chemsrc.com/en/cas/115-06-0_135849.html
- [23] J. Da Silva, R. Chaves, A. Da Silva, V. Cunha, and A. De Amorim, "Extracción, adición y caracterización de hemicelulosas de mazorcas de maíz para desarrollo de las propiedades de los papeles," *Simposio Internacional Sobre Materiales Lignocelulósicos*, 2013.
- [24] M. Montoya, "Evaluación integral de la eficiencia económica y ambiental de proceso para la obtención de biodiesel," Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [25] D. Cassiani-Cassiani, D. A. Meza-González, and Á. D. González-Delgado, "Environmental evaluation of agar production from macroalgae *Gracilaria* sp.," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 70, pp. 2005-2010, 2018, doi: 10.3303/CET1870335.

- [26] Department of health and human services, "Public health statement n-hexane CAS#: 110-54-3," Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. pp. 1–7, 1999, [Online]. Available: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp113-c1-b.pdf>
- [27] L. Barreto, "Nota técnica: Algunos elementos básicos sobre la lluvia acida. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales -IDEAM," 2019.
- [28] E. Fernández, and J. Orozco, "Evaluación ambiental de tres tipologías de producción de biodiesel a partir de aguas residuales utilizando el algoritmo WAR," Universidad de San Buenaventura Cartagena, 2015.
- [29] J. Moncada, J., Tamayo, and C. Cardona, "Techno-economic and environmental assessment of essential oil extraction from Oregano (*Origanum vulgare*) and Rosemary (*Rosmarinus officinalis*) in Colombia," *Journal of Cleaner Prod.*, vol. 112, pp. 172–181, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.067>