

Modelación en sistemas dinámicos del cambio del uso del suelo por cultivos de palma de aceite para producción de biodiésel en Colombia

Dynamic systems modeling of land use change by oil palm cultivation for biodiesel production in Colombia

Karen Solangie Torres Bernate*, Laura Stephania Calderón Ruiz** y Sandra Cecilia Bautista Rodríguez***

Cómo citar:

Torres Bernate, K. S., Calderón Ruiz, L. S., & Bautista Rodríguez, S. C. (2020). Modelación en sistemas dinámicos del cambio del uso del suelo por cultivos de palma de aceite para producción de biodiésel en Colombia. *Ingeciencia*, 5, 7-23.

* Estudiante de octavo semestre de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Forma parte del semillero Econciencia. Correo: ktorresb1@ucentral.edu.co

** Estudiante de octavo semestre de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Forma parte del semillero Econciencia. Correo: lcalderonr@ucentral.edu.co

*** Doctora en Ingeniería Química, doctora en Ingeniería de Sistemas Industriales, magíster en Medio Ambiente y Desarrollo e ingeniera química de la Universidad Nacional de Colombia. Docente investigadora de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Universidad Central. Correo: sbautistar2@ucentral.edu.co

Resumen

La creciente demanda de la producción de aceite de palma ha implicado un cambio directo e indirecto en el uso del suelo, lo cual influye en el balance de la captura de carbono, principalmente por el cambio de bosques a tierras con cultivos de palma. Dado que Colombia es el primer productor de aceite de palma en América Latina y el quinto en el mundo, es necesario analizar la sostenibilidad de la producción en la etapa del cultivo. Para ello, se realizó una modelación en dinámica de sistemas con datos históricos entre 2012 y 2018. Se concluye que es necesario aumentar el rendimiento en la producción del aceite de palma y que el principal tipo de cambio de uso de suelo debe ser de tierras degradadas a tierras de palma, en lugar de aquellas que involucren tierras ganaderas. Además, el Gobierno debe incrementar la reforestación anual mínimo en 60%. Implementar estas alternativas no afecta la economía del sector palmero, de manera que es una alternativa sostenible que no genera pérdidas para la industria.

Palabras clave: bioenergía, biocombustible, cambio directo del suelo (LUC), deforestación, sostenibilidad.

Abstract

Increased demand for palm oil production has led to direct and indirect change in land use by influencing the balance of carbon capture mainly by switching from forests to land with palm crops. Because Colombia is the first palm oil producer in Latin America and the fifth in the world, it is necessary to analyze the sustainability of production at the growing stage. To this end, a dynamic modeling of systems with historical data was carried out between 2012-2018, thus concluded that palm oil yield should be increased, and the main rate of land use change should be from degraded land to palm land, not those involving livestock land. In addition, the government must increase the amount of land reforested annually by at least 60%. Implementing such alternatives does not affect the economy of the palm sector, being a sustainable alternative without generating losses for the industry.

Keywords: bioenergy, biofuel, deforestation, LUC, sustainability.

1. Introducción

A causa de la crisis energética mundial y de la escasez de los combustibles fósiles convencionales, se ha incentivado la fabricación de combustibles generadores de un menor impacto ambiental, como el biodiésel fabricado a partir de palma de aceite, cuyo cultivo ofrece beneficios económicos y, dependiendo del cambio del uso del suelo, aumenta la biodiversidad y mejora la calidad edáfica (Nahumb & Basto, 2018; Siregar *et al.*, 2019; Yui & Yeh, 2013). Gracias a estos beneficios, se han incrementado las hectáreas cultivadas con palma de aceite en los últimos años. Según cifras reportadas por Coral *et al.* (2019), en el 2018 el mayor productor de aceite de palma era Indonesia, con 41,5 millones de toneladas, seguido de Malasia, con 20,5 millones de toneladas, Tailandia, con 2,9 millones de toneladas, y Colombia, con 1,53 millones de toneladas.

No obstante, en Colombia este aumento ha traído consigo varios impactos ambientales, siendo uno de los más estudiados el desbalance en la captura de carbono asociado al *stock* del suelo. Este depende principalmente del tipo de cambio en el uso de la tierra, sobre todo aquel que involucra bosques y selvas, lo cual contribuye a que se incremente el efecto invernadero antropogénico (Henson *et al.*, 2012; Julio, 2017; Rojas & Castiblanco, 2018; Valencia-Botero *et al.*, 2014). Por lo tanto, esta investigación tiene como fin estudiar los posibles escenarios de la influencia del cambio en el uso del suelo asociado a la producción de biodiésel sobre la captura de carbono en Colombia con base en la modelación dinámica de sistemas. Para cumplir con este objetivo, se realizó una búsqueda sistemática de la literatura en la base de datos Scopus. A partir de allí, se realizó la estructuración del ciclo causal y del diseño de niveles y flujos en el software Vensim, con el fin de analizar la validación del modelo mediante la prueba MAPE y la sensibilidad a los cambios para construir escenarios de sostenibilidad.

2. Métodos

Se realizó una revisión sistemática de literatura por medio de reportes de investigación entre los años 2007–2020 en la base de datos Scopus. Posteriormente, se aplicó dinámica de sistemas para identificar el comportamiento temporal de la producción de aceite de palma en la etapa del cultivo para analizar la sostenibilidad a partir de la identificación del problema y las variables relacionadas, la definición de las relaciones causales, la construcción del modelo de niveles y flujos, y la simulación y validación del modelo.

3. Resultados y discusión

3.1 Descripción del problema

Debido al aumento de la población y de la demanda energética, se ha incrementado la cantidad de tierras para cultivos de palma de aceite (Bruinsma, 2009; Henson *et al.*, 2012; Rojas & Castiblanco, 2018). La promoción de estos monocultivos ha generado un reemplazo de tierras agrícolas y ganaderas, mediante la implementación de prácticas que empobrecen el suelo (Valencia-Botero *et al.*, 2014; Julio, 2017), lo cual ha ocasionado un

crecimiento tardío de cultivos de palma y una disminución del rendimiento en la producción del aceite de palma (Bruinsma, 2009; Rojas & Castiblanco, 2018).

Este cambio en el uso del suelo incentiva además la deforestación de bosques y selvas (Bruinsma, 2009; Henson *et al.*, 2012; Julio, 2017; Rojas & Castiblanco, 2018; Valencia-Botero *et al.*, 2014), lo cual genera un desbalance en la captura de carbono, que según Hanaki y Portugal (2018) y Brinkmann Consultancy (2009) proviene de la conversión de tierras forestales a cultivos energéticos. Este fenómeno contribuye al efecto invernadero antropogénico y al calentamiento global porque impide el proceso fotosintético y como consecuencia se genera una acumulación de CO₂ en la atmósfera (Valencia-Botero *et al.*, 2014).

No obstante, según Siregar *et al.* (2018), algunos cambios directos del suelo (LUC) están relacionados con el incremento económico de los palmicultores en países en desarrollo, debido a que contribuyen a la creación de empleo y al crecimiento económico de la región. Sin embargo, dado que, a mayor crecimiento económico, menor cantidad de bosques, es necesario analizar escenarios de sostenibilidad mediante iniciativas de deforestación cero en Colombia (Ideam & Minambiente, 2017).

3.2 Definición de las variables del modelo

Las variables identificadas para establecer las relaciones de causalidad se asocian por medio de 11 niveles, 23 flujos y 47 variables auxiliares. Dichas relaciones de proporcionalidad directa se presentan como bucles de retroalimentación positiva (R), es decir, que refuerzan el cambio original, y bucles balanceados (B) en caso de que el efecto de retroalimentación se oponga al cambio original y permita un equilibrio.

Los datos históricos entre 2012-2018 se tomaron de fuentes oficiales del DANE, Fedebiocombustibles, Fedepalma y artículos de revisión. Se tuvieron en cuenta aspectos sociales, económicos y ambientales con el fin de evaluar la sostenibilidad de la producción de aceite de palma (AP) para la generación de biodiésel en la etapa del cultivo. Las coberturas estudiadas corresponden a tierras degradadas (TD), tierras ganaderas (TG), tierras agrícolas estacionarias (TAE), tierras agrícolas perennes (TAP), tierras de bosque (TB) y tierras con palma de aceite (TP); además, otras variables importantes son el cambio directo del suelo (LUC) y el cambio indirecto del suelo (ILUC).

3.3 Definición de los diagramas de ciclos causales

La producción de biodiésel influye en la demanda de aceite de palma, por lo cual, cuando aumenta la población (Yu *et al.*, 2011) y la producción de biodiésel tiene un alza, la demanda de aceite de palma crecerá, y esta a su vez influirá directamente en el incremento de las tierras de cultivo con palma de aceite (figura 1).

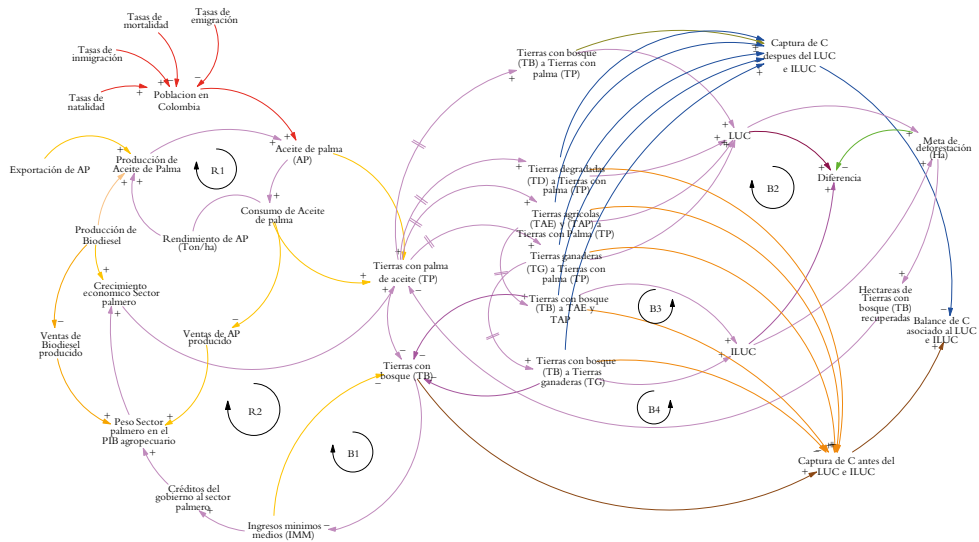


Figura 1. Ciclo causal.
Fuente: elaboración propia.

R1: se evidencia que, si aumenta la producción de biodiésel, hay un incremento en la producción de aceite de palma, lo cual influye en la cantidad de aceite de palma acumulada y en su consumo. Por lo tanto, el rendimiento del AP depende de su consumo y producción.

R2 y B1: la reducción de ingresos aumenta los créditos financieros del sector palmero, lo que a su vez mejora la capacidad financiera del propietario. Esto genera una relación directamente proporcional con el peso del sector palmero en el Producto Interno Bruto (PIB) agropecuario, el cual, al incrementarse, produce un mayor crecimiento económico e incentiva la adecuación de tierras para cultivos de palma de aceite. No obstante, al elevar estos ingresos, se acrecientan las tasas de deforestación, de manera que se crea un bucle de retroalimentación positiva, tal como lo menciona Siregar (*et al.*, 2018) (**B1**).

B2: el incremento de tierras para cultivo de palma de aceite genera una relación directamente proporcional respecto a la conversión de tierras degradadas, tierras agrícolas y tierras ganaderas a monocultivos de palma de aceite, lo cual aumenta el LUC (Bautista *et al.*, 2019). Asimismo, crecen los incentivos para la conservación de bosques, debido a la pérdida de la biomasa vegetal y del 45% del carbono contenido en el suelo por deforestación. En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, dentro de su Estrategia Integral de Control a la Deforestación y Gestión de los Bosques, incentiva llegar a la meta de deforestación cero reduciendo 32,4 Mt de emisiones de CO₂ eq para 2030, con el fin de incrementar las tierras de bosque recuperadas y disminuir las tierras de cultivo con palma de aceite (Ideam & Minambiente, 2017; Siregar *et al.*, 2018).

B3 y B4: el incremento de las tierras con palma de aceite genera un aumento en la conversión de tierras agrícolas y ganaderas a monocultivo, lo cual ocasiona que las tierras de bosque pasen a ser tierras agrícolas (**B3**) y ganaderas (**B4**). Esto eleva el ILUC, las estrategias de conservación de bosques, las hectáreas boscosas recuperadas y la limitación del crecimiento de las tierras con palma.

3.4 Definición del modelo formal en dinámica de sistemas

El modelo de niveles y flujos se compone de cuatro submodelos: el *primer submodelo* corresponde a aspectos sociales. Este, a su vez, se conecta con el *segundo submodelo*, que se refiere a aspectos económicos y que relaciona la cantidad de AP y el crecimiento económico del sector palmero, el cual es influido por los créditos financieros, el peso del sector palmero al PIB agropecuario, las ventas de biodiésel y de AP, la exportación de AP, los ingresos mínimos medios de los palmicultores y el PIB per cápita. Mediante el flujo de los cultivos de TP, este submodelo se conecta con el *tercer submodelo*, relacionado con los LUC e ILUC estudiados, los cuales soportan las respectivas tasas de conversión. Específicamente, en las tasas de conversión se resalta la importancia de la diferencia entre el LUC, ILUC y la influencia del factor externo en la meta de máxima deforestación. Este, a su vez, se conecta con el *cuarto submodelo*, que se refiere al balance de la captura de carbono mediante los factores de captura por cada LUC e ILUC relacionados antes, durante y después de las transformaciones en relación (figura 2).

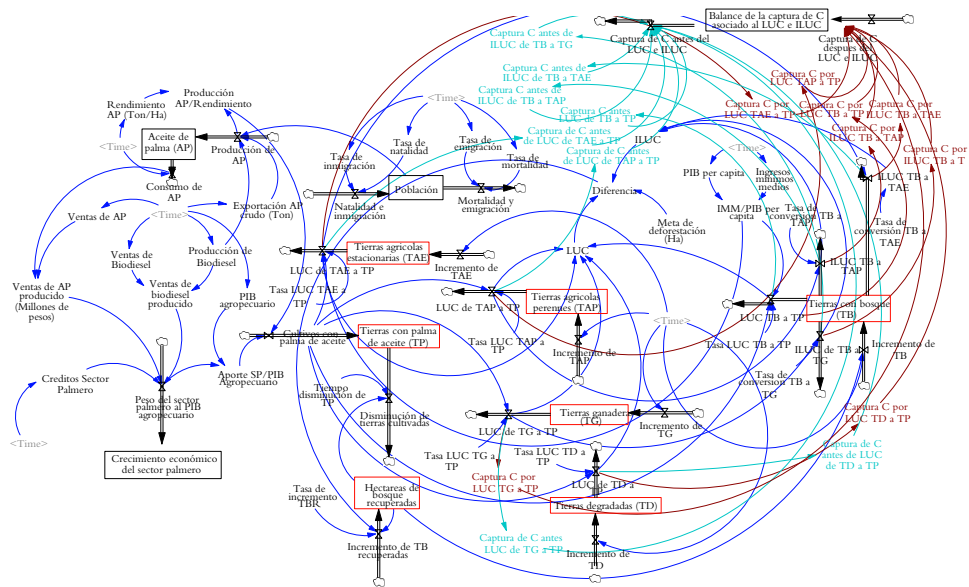


Figura 2. Simulación de niveles y flujos.
Fuente: elaboración propia.

3.5 Validación del modelo

Se visualizó que la mayoría de MAPE están por debajo del 30%, por lo tanto, según Bautista *et al.*, (2019), Siregar *et al.* (2018) y Kim y Kim (2016), las relaciones causales y las ecuaciones cumplen con las condiciones de validación, y, por lo tanto, el modelo representa adecuadamente el comportamiento del sistema (tabla 1).

Tabla 1. Validación dinámica del modelo mediante MAPE

Indicadores principales	MAPE (2011-2018)
Consumo de AP	2,40 %
Producción de AP	5,52 %
Producción de Biodiésel	2,02 %
Exportación de AP (t)	13,36 %
Créditos sector palmero	11,55 %
Ventas de biodiésel	8,18 %
Ventas de AP producido (millones de pesos)	3,48 %
Peso del sector palmero al PIB agropecuario	13,69 %
PIB agropecuario	12,51 %
Rendimiento AP (t/ha)	5,69 %
Cultivos con palma de aceite	4,27 %

Fuente: elaboración propia.

3.6 Definición de escenarios de análisis del modelo

3.6.1 Escenario línea base

Para la línea base se considera que las condiciones, tendencias y funciones encontradas entre 2012 y 2018 seguirán el mismo comportamiento durante el período de análisis (2018-2025). La simulación se realiza desde el año 2011 (tiempo 0) hasta el 2025 (tiempo 14) en años.

3.6.2 Escenario en condiciones sostenibles

El escenario sostenible se construye teniendo en cuenta los valores de las variables exógenas que no representen una amenaza a las hectáreas de bosque natural, tierras agrícolas e ingresos monetarios del sector palmero (tabla 2).

Tabla 2. Escenario base vs. escenario sostenible

Variable exógena crítica	Valor en línea base	Valor en escenario sostenible
Tasa LUC TAE a TP	23,7 %	20,73 %
Tasa LUC TG a TP	45,9 %	22,95 %
Tasa LUC TB a TP	5,9 %	0 %
Tasa LUC TD a TP	3,6 %	35 %
Rendimiento AP (t/ha)	3,07 - 4,04 t/ha	3,07 - 8,08 t/ha
PIB agropecuario	4e+10 - 1,1e+11 (millones de pesos colombianos)	4e+10 - 2,2e+11 (millones de pesos colombianos)
Tasa de incremento TBR	Aumento del 20 % de las tierras recuperadas de bosque anualmente.	Crecimiento del 80 % de las tierras recuperadas de bosque anualmente.

Fuente: elaboración propia.

3.7 Simulación del modelo y análisis de resultados

3.7.1 Simulación del escenario línea base

El comportamiento del AP se muestra en las figuras 3 y 4. Allí se evidencia que la producción es mayor al consumo, ya que el peso de la población colombiana en la ecuación que determina el crecimiento de la producción de AP es muy bajo. La exportación de AP establece el comportamiento y la cantidad de AP que se fabrica en el país (figura 4), de manera que determina la tendencia de la producción de AP. En consecuencia, el consumo per cápita del AP puede ser bajo, pero su exportación es bastante grande.

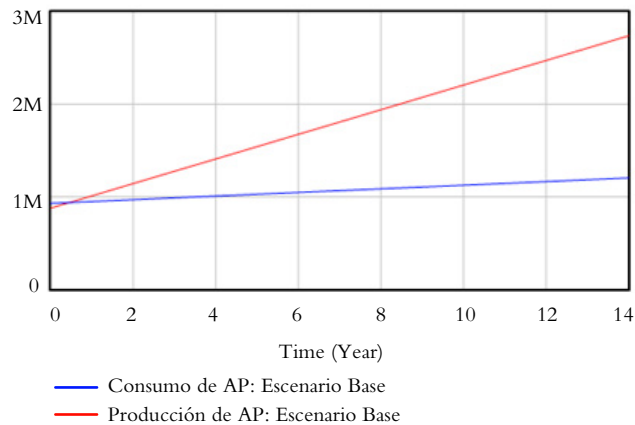


Figura 3. Modelación de aceite de palma en Colombia: consumo vs. producción (en megatoneladas).

Fuente: elaboración propia.

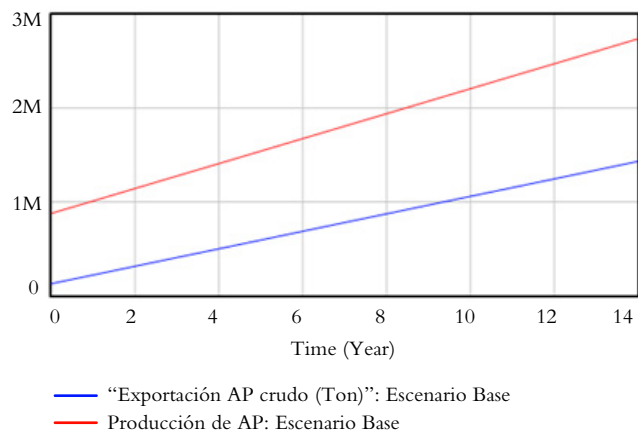


Figura 4. Modelación de aceite de palma en Colombia: exportación vs. producción (en megatoneladas).

Fuente: elaboración propia.

A partir de la simulación se pudo ver que las TP se incrementarán conforme avance el tiempo, iniciando con 415 250 ha hasta llegar a 747 243 ha (figura 5). Por otro lado, se evidencia que el mayor LUC es aquel que involucra TG. Al respecto, según Castiblanco *et al.* (2013) y Ramírez-Contreras *et al.* (2020), la tasa de conversión de TG en Colombia

equivale al 45,9% de las TP en el país —siendo el LUC más representativo—, comenzando en 190600 ha y finalizando con 342985 ha. También se encontró que el LUC que involucra bosque natural representa el 5,9% de las TP: inició con 24499 ha y terminó con 44087 ha (figura 6).

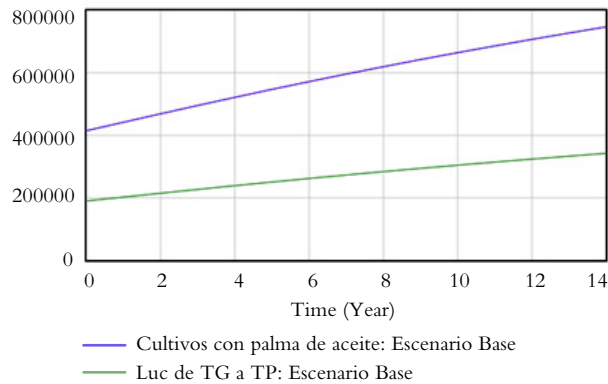


Figura 5. Modelación de los LUC por tipo de cobertura: cultivos con palma de aceite vs. LUC de TG a TP (en hectáreas).

Fuente: elaboración propia.

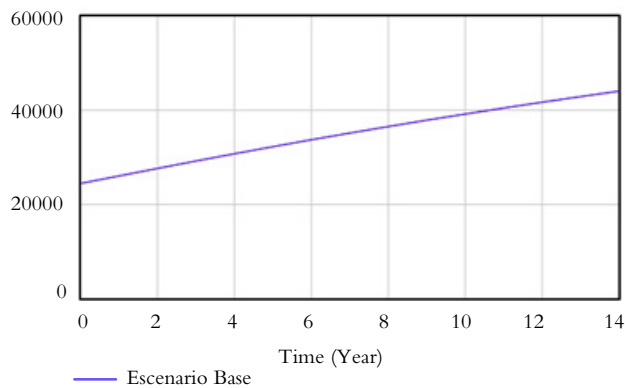


Figura 6. Modelación de los LUC por tipo de cobertura: LUC TB a TP (en hectáreas).

Fuente: elaboración propia.

Para modelar el ILUC, se tuvo en cuenta la información suministrada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por su sigla en inglés). De acuerdo con esta institución, en los últimos seis años la deforestación por ganadería en el Amazonas fue del 49% y del 20% en tierras agrícolas. Teniendo en cuenta lo anterior, se asumió que el ILUC de TG, TAE y TAP a tierras de bosque (TB) sería igual al LUC multiplicado por las tasas mencionadas, con la única variación de que para las tierras agrícolas perennes y estacionarias, la tasa reportada por la FAO estaría repartida en 10% para TAP y 10% para TAE. De esta forma, se evidenció que el ILUC de TB a TG es el más grande, pues alcanzó las 168063 ha en el último año modelado (figura 7).

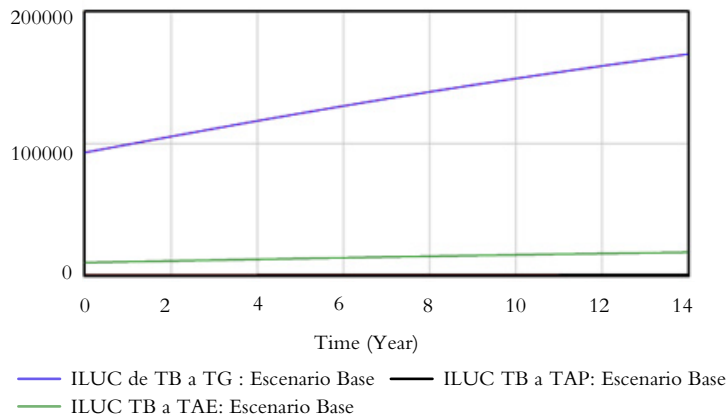


Figura 7. Modelación de los ILUC producto del LUC a TP (en hectáreas).

Fuente: elaboración propia.

Aunque la captura de carbono por hectárea (tC/ha) que incluye todos los LUC es positiva, al observar aquellos LUC e ILUC que involucran TB (figuras 8-11), se cuantifica que, al cambiar de TB a TP, el suelo pasa de capturar 6,50 millones de tC/ha a 3,83 millones de tC/ha. De manera similar ocurre cuando se da un ILUC de TB a TP producto de la conversión del 49% de TG que pasaron a ser TP, ya que estas capturaban 24,7 millones de tC/ha y, según el modelo, capturarán solo 1,05 millones de tC/ha. Asimismo, al tener un ILUC de TB a TAE, en el que solo se tiene en cuenta el 10% del Luc a TP, estas tierras pasan de capturar 2,61 millones de tC/ha a 74 380 tC/ha, y cuando se involucra un ILUC de TB a TAP, en el que este representa solo el 10% del LUC TAP a TP, la tierra pasa de capturar 154 306 tC/ha a 30 233 tC/ha.

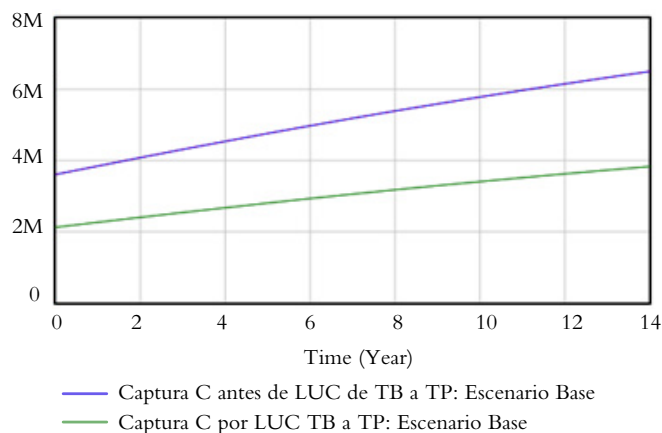


Figura 8. Modelación de la captura de C antes y como consecuencia de LUC de TB a TP (en millones de tC/ha).

Fuente: elaboración propia.

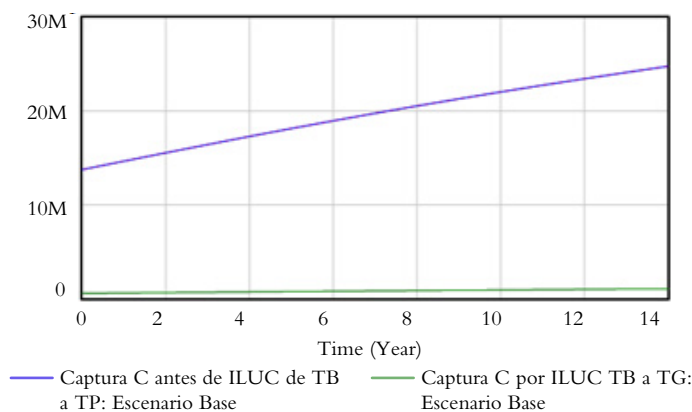


Figura 9. Modelación de la captura de C antes y como consecuencia de ILUC de TB a TG (en millones de tC/ha).

Fuente: elaboración propia.

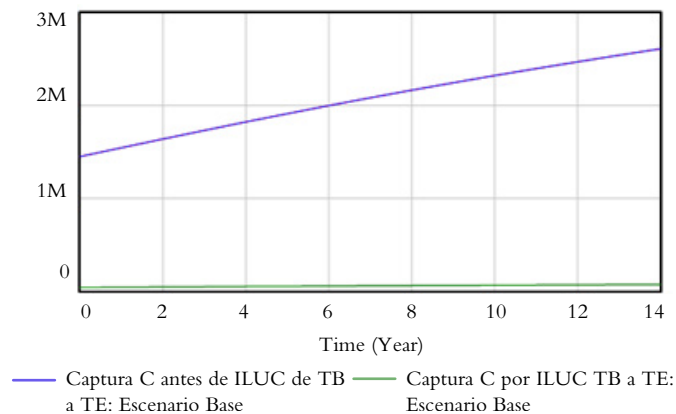


Figura 10. Modelación de la captura de C antes y como consecuencia de ILUC de TB a TAE (en millones de tC/ha).

Fuente: elaboración propia.

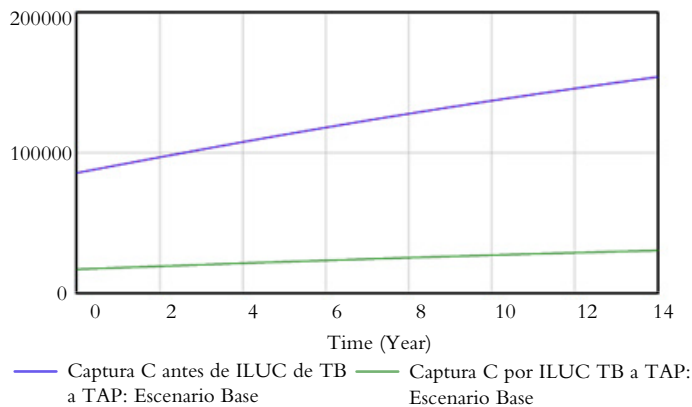


Figura 11. Modelación de la captura de C antes y como consecuencia de ILUC de TB a TAP (en millones de tC/ha).

Fuente: elaboración propia.

3.7.2 Simulación del escenario en condiciones sostenibles

Con esta simulación, la cantidad de ha necesarias para obtener las mismas toneladas de AP producidos en el escenario base disminuye a 373 622 ha (figura 12), debido al aumento del rendimiento del AP, el cual pasa de ser 3,49 t/ha a 8,08 t/ha (figura 13), de manera que, a mayor rendimiento del AP, menor cantidad de cultivos con palma de aceite.

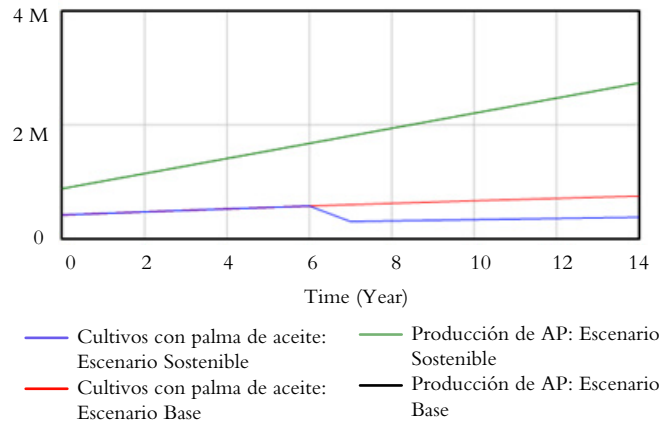


Figura 12. Modelación del escenario sostenible para las TP y producción de AP (en millones de hectáreas).

Fuente: elaboración propia.

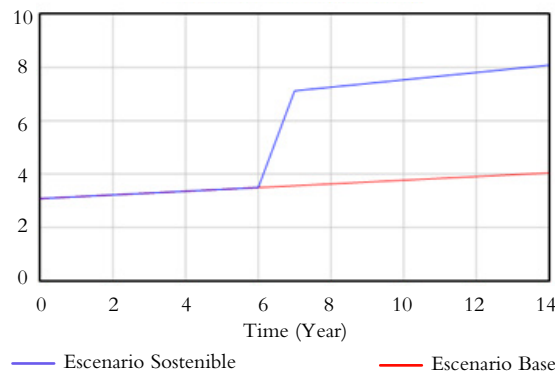


Figura 13. Comparación del rendimiento de AP entre el escenario base y el escenario sostenible (en toneladas por hectárea).

Fuente: elaboración propia.

Al disminuir la cantidad de ha con PA, los LUC se reducen. Debido a esto, se puede evidenciar que el mayor LUC disminuyó, ya que las TG a TP pasarían de ser 342 985 ha a 85 746 ha, y las TB a TP pasarían de ser 44 087 ha a 0 ha (figuras 14 y 17). No obstante, el escenario sostenible se planteó de tal manera que las tierras que dejaron de pasar a ser palma fueran reemplazadas por TD, por tal motivo el LUC de TD a TP pasa de ser 26 900 ha a 130 768 ha (figura 16). De este modo, al disminuir la cantidad de ha que pasan a palma provenientes de usos del suelo como TAE, TAP y TG, la cantidad de TB deforestadas por los ILUC disminuyen con respecto a las deforestadas en el escenario base, tal como se evidencia en la figura 15, donde el ILUC de TB a TG pasa de ser 168 063 ha a 42 016 ha.

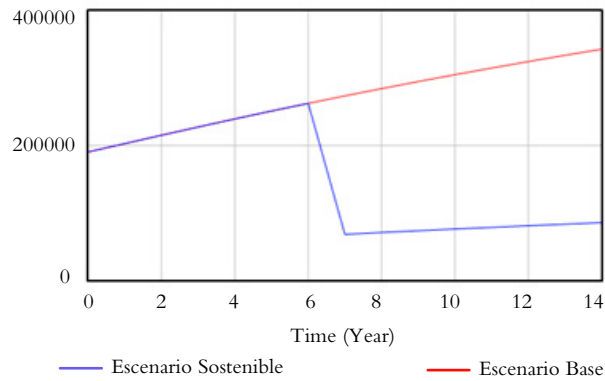


Figura 14. Modelación del escenario base vs. escenario sostenible para los LUC de TG a TP (en hectáreas).
Fuente: elaboración propia.

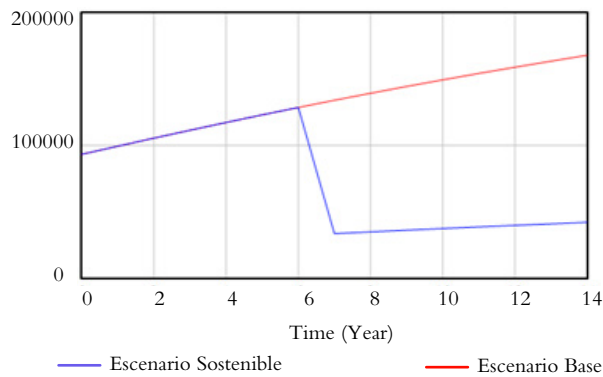


Figura 15. Modelación del escenario base vs. escenario sostenible para los ILUC de TB a TG (en hectáreas).
Fuente: elaboración propia.

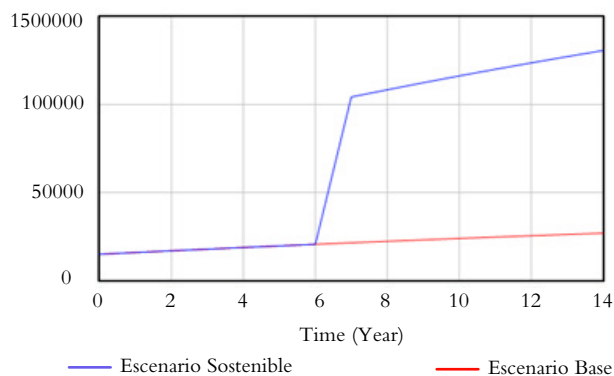


Figura 16. Modelación del escenario base vs. escenario sostenible para los LUC de TD a TP (en hectáreas).
Fuente: elaboración propia.

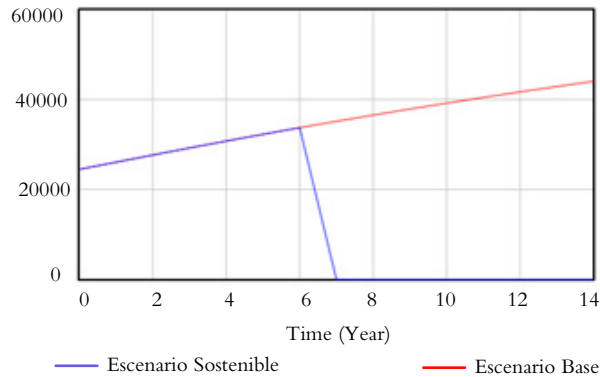
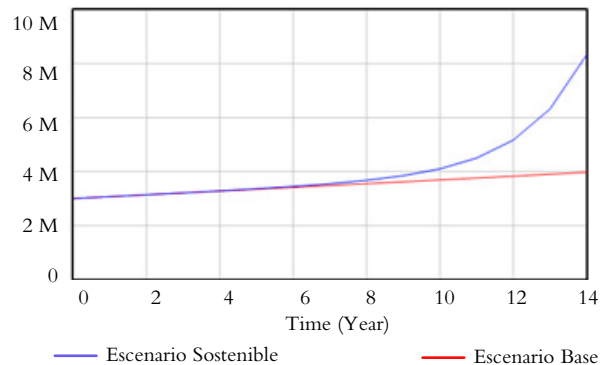


Figura 17. Modelación del escenario base vs. escenario sostenible para los LUC de TB a TP (en hectáreas).

Fuente: elaboración propia.

Al disminuir la cantidad de TP con respecto al escenario base, la captura de C disminuye, ya que esta pasa de $5,35e+07$ tC/ha a $2,63e+07$ tC/ha para el año 2025. No obstante, al implementarse las condiciones del escenario sostenible, el 50% de la captura total después de presentarse los LUC e ILUC a TP proviene de TD, mientras que en el escenario base la captura por este LUC representaba solo el 4% del total, y la captura se daba principalmente de los cambios de uso del suelo que involucraban tierras agrícolas y ganaderas, que a su vez generaban un efecto negativo sobre las TB. De esta forma, las hectáreas de bosque pasarían de ser $3,97e+06$ ha con las condiciones del escenario base, a $8,33e+06$ ha de bosque para el 2025 (figura 18), sin afectar el crecimiento económico del sector palmero (figura 19), todo esto mediante la reducción de las tasas que involucran LUC provenientes de tierras agrícolas o ganaderas, pero aumentando el cambio en el uso del suelo de TD a TP e incrementando la tasa de TB recuperadas anualmente en el 80%.



Figuras 18. Modelación del escenario base vs el escenario sostenible para el incremento de TB (en millones de pesos).

Fuente: elaboración propia.

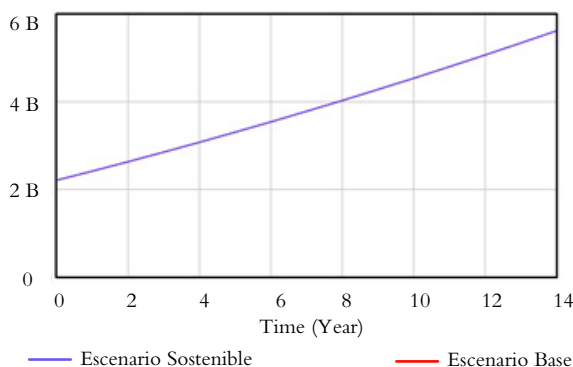


Figura 19. Modelación del escenario base vs el escenario sostenible para el peso del sector palmero al PIB agropecuario (en millones de pesos).

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusión

La modelación del escenario sostenible muestra que a medida que aumenta el rendimiento del aceite de palma, la cantidad de hectáreas necesarias para su producción disminuye. Al reducir las hectáreas con PA, decrecen los LUC que involucran tierras agrícolas y ganaderas, así como los efectos que tenían sobre las tierras de bosque. Se concluye que es posible continuar produciendo aceite de palma al ritmo actual sin generar consecuencias negativas sobre las TB; no obstante, es necesario incrementar el rendimiento del AP y debe existir un compromiso del sector palmero, ya que el principal tipo de LUC debe ser de TD a TP, y no aquellos que involucren tierras ganaderas.

Asimismo, el gobierno debe elevar la cantidad de tierras reforestadas anualmente mínimo en 60% ya que, de no ser así, se anularía totalmente el beneficio sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al usar biocombustibles a partir de AP. Además, se evidenció que implementar este tipo de alternativas no afecta el crecimiento económico del sector palmero, por lo cual se convierte en una alternativa sostenible que no generan pérdidas para la industria. Por último, se recalca la necesidad de desarrollar estudios que cuantifiquen la influencia del ILUC sobre las TB, ya que hay un vacío de conocimiento porque tales estudios no existen en Colombia.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por permitirnos realizar esta investigación, a nuestras familias y a la profesora Sandra Cecilia Bautista por su acompañamiento y dirección en la ejecución de este trabajo.

Referencias

- Bautista, S., Espinoza, A., Narváez, P., Camargo, M., & Morel, L. (2019). A system dynamics approach for sustainability assessment of biodiesel production in Colombia: Baseline simulation. *Journal of Cleaner Production*, 213, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.111>
- Brinkmann Consultancy. (2009). *Greenhouse Gas Emissions from Palm Oil Production: Literature review and proposals from the RSPO Working Group on Greenhouse Gases* [Final Report]. <https://bit.ly/2k9oATa>
- Bruinsma, B. (2009). *Producción de biodiésel de palma aceitera y jatropha en la Amazona del Perú y el impacto para la sostenibilidad: Un análisis sostenible del ciclo de vida*. Agriterra y Conveagro. <https://bit.ly/3AArQMr>
- Castiblanco, C., Etter, A., & Aide, T. M. (2013). Oil palm plantations in Colombia: A model of future expansion. *Environmental Science & Policy*, 27, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.01.003>
- Coral Medina, J. D., Magalhães Júnior, A. I., Zamora, H. D., & Quijano Melo, J. D. (2019). Oil palm cultivation and production in South America: status and perspectives. On the Map: Oil Palm in South America. *Biofuels, Bioprod & Bioref*, 13(5), 1202–1210. <https://doi.org/10.1002/bbb.2013>
- Hanaki, K., & Portugal-Pereira J. (2018). The effect of biofuel production on greenhouse gas emission reductions. En K. Takeuchi, H. Shiroyama, O. Saito & M. Matsuura (Eds.), *Biofuels and Sustainability: Science for Sustainable Societies* (pp 53–71). Springer. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54895-9_6
- Henson, I. E., Ruiz Romero, R., & Romero, H. M. (2012). The greenhouse gas balance of the oil palm industry in Colombia: A preliminary analysis: II. Greenhouse gas emissions and the carbon budget. *Agronomía Colombiana*, 30(3), 370–378. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/28615>
- Ideam, & Minambiente. (2017). *Bosques Territorios de Vida: Estrategia integral de control a la deforestación y gestión de los bosques*. https://redd.unfccc.int/files/eic-dgb_bosques_territorios_de_vida_web.pdf
- Julio Meza, L. F. (2017). Análisis prospectivo de la cadena productiva de palma africana para obtención de biodiesel en Colombia [Tesis, Universidad de San Buenaventura]. Repositorio USB. <https://bit.ly/3Aivf1Y>
- Kim, S., & Kim, H. (2016). A new metric of absolute percentage error for intermittent demand forecasts. *International Journal of Forecasting*, 32(3), 669–679. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.12.003>
- Nahum, J. S., & Bastos dos Santos, C. (2018). Agricultura familiar e dendeicultura no município de Moju, na Amazônia paraense. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 27(1), 50–66. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n1.58081>
- Ramirez-Contreras, N. E., Munar-Florez, D. A., Garcia-Nuñez, J. A., Mosquera-Montoya, M., & Faaij, A. P. C. (2020). The GHG emissions and economic performance of the Colombian palm oil sector; current status and long-term

- perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 258, Article 120757. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120757>
- Rojas, J. C., & Castiblanco Rozo, C. (2018). Variabilidad espacial y análisis multitemporal sobre los cambios en las coberturas de la tierra ocasionados por la expansión del cultivo de la palma de aceite en los años 1985, 2000 y 2016 en el municipio de San Carlos de Guaroa (Colombia). *Gestión y Ambiente*, 21(1), 59-68. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n1.69096>
- Siregar, K., Tambunan, A., Sholihati, S., Wirawan, S., & Araki, T. (2019). Comparison of energy production, net energy balance, net energy ratio, and renewable index for biodiesel production from oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) and jatropha (*Jatropha curcas* L.) based on life cycle assessment. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 293, Article 01025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/293/1/01025>
- Siregar, P. G., Supriatna, J., Koestoer, R. H., & Harmantyo, D. (2018). System dynamics modeling of land use change in West Kalimantan, Indonesia. *Biotropia*, 25(2), 103-111. <https://doi.org/10.11598/btb.2018.25.2.792>
- Valencia-Botero, M. J., Rincón-Pérez, L. E., & Cardona-Alzate, C. A. (2014). Effect of change in land use due to oil palm cultivation for biodiesel production in Colombia. *Ingeniería y Universidad*, 18(1), 91-102. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.IYU18-1.ecut>
- Yu, W., Zang, S., Wu, C., Liu, W., & Na, X. (2011). Analyzing and modeling land use land cover change (LUCC) in the Daqing City, China. *Applied Geography*, 31(2), 600-608. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.11.019>
- Yui, S., & Yeh, S. (2013). Land use change emissions from oil palm expansion in Pará, Brazil depend on proper policy enforcement on deforested lands. *Environmental Research Letters*, 8(4), Article 044031. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/4/044031>