



¿La palma aceitera (*Elaeis guineensis*) genera un impacto negativo sobre el suelo? Una revisión¹

Does the oil palm (*Elaeis guineensis*) generate a negative impact on the soil? A review

Hermes Pérez Hernández², Marcos Pérez Sato³

¹ Recepción: 14 de marzo, 2022. Aceptación: 14 de junio, 2022. Este trabajo forma parte de la colaboración entre investigadores de la Universidad Autónoma de Chiapas, México y la Benemérita Autónoma de Puebla, México.

² Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agrícolas, Carretera Costera y Pueblo de Huehuetán, Huehuetán, Chiapas, México. C.P. 30660. hermesph@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-5883-066X>).

³ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias, Tlatlauquitepec, Puebla, México. C.P. 73900. marcos.perez@correo.buap.mx (autor para la correspondencia, <https://orcid.org/0000-0001-5649-014X>).

Resumen

Introducción. La palma de aceite (*Elaeis guineensis*) es uno de los monocultivos perennes que se ha extendido a casi un poco más de diecinueve millones de hectáreas en el mundo, su expansión ha generado debate social, económico y político en diversos países tropicales. Una de las problemáticas que se ha discutido, es el impacto sobre las propiedades fisicoquímicas, biológicas y ecológicas del suelo. **Objetivo.** (i) Ofrecer un panorama actual de la expansión del cultivo de palma de aceite para una zona de la región Soconusco, Chiapas, México, (ii) documentar los efectos que provoca la palma de aceite sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo y (iii) presentar algunas propuestas de prácticas de manejo para incrementar la fertilidad y la abundancia de macroinvertebrados del suelo. **Desarrollo.** Se realizó la búsqueda de palabras clave en el apartado de “tópicos” dentro de la base de datos “Web of Science” del año 2009 hasta marzo del 2018. Se consultaron investigaciones que relacionan el cultivo de la palma de aceite con los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo. La literatura demuestra los efectos negativos que genera el monocultivo de palma de aceite sobre algunas propiedades fisicoquímicas del suelo y sobre la ecología y biología de la macrofauna edáfica. **Conclusión.** Se muestra evidencia de que el mal manejo del monocultivo de la palma de aceite tiene implicaciones ambientales. La integración de buenas prácticas de manejo sostenibles, podrían mitigar los daños al suelo.

Palabras clave: organismos de suelo, degradación del suelo, fertilidad del suelo, conservación de suelos.

Abstract

Introduction. Oil palm (*Elaeis guineensis*) is one of the perennial monocultures that has spread to almost a little more than nineteen million hectares in the world. Its expansion has generated social, economic, and political debate in various tropical countries. One of the problems that has been discussed is the impact on the physicochemical, biological, and ecological properties of the soil. **Objective.** (i) To provide a current overview of the expansion of



oil palm cultivation in an area of the Soconusco region, Chiapas, Mexico, (ii) to document the effects caused by oil palm on the physicochemical and biological properties of the soil, and (iii) to present some proposals for management practices to increase the fertility and abundance of soil macroinvertebrates. **Development.** The search for keywords was carried out in the “topics” section within the “Web of Science” database from the year 2009 to March 2018. Research that relates the cultivation of oil palm with physical parameters, soil chemicals, and biology was consulted. The literature demonstrates the negative effects generated by oil palm monoculture on some physicochemical properties of the soil and the ecology and biology of the edaphic macrofauna. **Conclusion.** Evidence is shown that the poor management of oil palm monoculture has environmental implications. The integration of good sustainable management practices could mitigate damage to the soil.

Keywords: soil organisms, soil degradation, soil fertility, soil conservation.

Introducción

La palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) cubre un área aproximada de veintiocho millones de hectáreas en el mundo, contribuye así en la producción global de los vegetales de aceite (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2019). Pero, grupos de ambientalistas, instituciones de investigación y ecologistas, han expresado su preocupación acerca de la expansión del cultivo y el efecto sobre la disminución de hábitats nativos, diversidad de plantas y animales (Savilaakso et al., 2014). Cuando se trata del manejo del cultivo, lo que continúa causando preocupación es la sostenibilidad ecológica del cultivo, pero no se ha logrado obtener un manejo sostenible, ya que no se han evidenciado casos en el que se integren prácticas de manejo amigables con el ambiente, se reporten altos rendimientos y al mismo tiempo se observe una mitigación del impacto ecológico del cultivo, sobre todo en la biota del suelo (Woittiez et al., 2017).

Con el fin de mitigar los problemas ecológicos y mejorar las formas de manejo en el cultivo, desde el 2007, se propusieron principios y criterios para evaluar los impactos ambientales en este agroecosistema (Roundtable on Sustainable Palm Oil, 2018). A pesar de los esfuerzos, se ha observado poco interés por parte de los productores para adoptar los principios y criterios sustentables en el cultivo, aun cuando se han planteado algunas propuestas derivadas de diversas investigaciones concernientes a los aspectos económico, social y ambiental (Moreno-Peñaranda et al., 2015).

Respecto a investigaciones en palma de aceite, se reportaron 502 publicaciones relacionadas con investigación medioambiental, donde la gran mayoría de los estudios se han examinado para el sudeste de Asia en los temas de biodiversidad vegetal y animal (Abram et al., 2014; Fitzherbert et al., 2008; Pardo Vargas et al., 2015; Wilcove et al., 2013). En algunos trabajos, se integra una serie de propuestas para reducir el impacto en la biodiversidad, identificar obstáculos y crear iniciativas que afectan la ecología, causado por el incremento de la superficie sembrada de palma de aceite (Fitzherbert et al., 2008).

En otros estudios, se han abordado aspectos relacionados con los servicios ecosistémicos (Dislich et al., 2017) y algunas propuestas de prácticas agroecológicas en la palma (Bessou et al., 2017). La información disponible sobre el impacto en las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, es escasa.

El manejo agronómico requiere de mucha atención, es un conjunto de actividades que afectan la función, la calidad y la salud de los agroecosistemas (Vinhai-Freitas et al., 2017) y sobre todo las interacciones complejas que afectan los procesos y funciones del suelo (Larson & Pierce, 1991). Por lo que, parámetros fisicoquímicos y biológicos han sido propuestos para medir la calidad e integridad del suelo en diversos sistemas agrícolas y forestales (Mesa-Pérez et al., 2016) y se han utilizado para medir la calidad del suelo en el agroecosistema palma de aceite (Bessou et al., 2017; Carron, Auriac et al., 2015; Carron, Pierrat et al., 2015).

A pesar de las evidencias sólidas de los efectos negativos provocados por la palma de aceite, investigaciones reportan efectos nulos sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo (Gray & Lewis, 2014), así como para los aspectos ecológicos (Azhar et al., 2017). Por tal motivo, la presente investigación tiene como objetivos: (i) presentar un panorama actual de la expansión del cultivo de palma de aceite para una zona de la región Soconusco, Chiapas, México, (ii) documentar los efectos que provoca la palma de aceite sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo. Además, con la intención de enriquecer la discusión (iii), presentar algunas propuestas de prácticas de manejo para incrementar la fertilidad y la abundancia de macroinvertebrados del suelo, con la finalidad de mitigar los impactos ecológicos sobre suelo, como estrategia dentro de un manejo sustentable del cultivo.

Estudios argumentan que la palma de aceite es una especie que para fines económicos no puede ser intercalada con otros cultivos de interés alimenticio, ya que, por su cobertura, la poca o nula luminosidad que llega a la superficie del suelo, no es suficiente para el crecimiento y desarrollo de otros cultivos (Lahmar & Ruellan, 2007). No obstante, experimentos demuestran que la palma puede combinarse con actividades agrícolas y forestales (Gomes et al., 2021). Investigadores han demostrado que como resultado del sistema agroforestal, se incrementa el ingreso familiar, se recuperan áreas degradadas y se reduce la emisión de gases de efecto invernadero (Santos da Silva et al., 2018). Aunque como monocultivo, las raíces de las plantas de palma se entrelazan, lo que provoca compactación del suelo, competencia de nutrientes y estrangulamiento de las raíces en los cultivos comestibles. En este mismo sentido, se reporta que las plantaciones de palma contaminan ríos y costas por el arrastre de productos químicos (Lahmar & Ruellan, 2007; Salamat et al., 2021), contribuyen a la pérdida de la biodiversidad, pérdida del hábitat, alteran la cadena alimenticia, entre otros (Khatun et al., 2017).

Consideraciones para la presentación de la información en la presente revisión de literatura

Con la intención de responder el primer objetivo, se presenta la literatura relacionada con la expansión del cultivo *E. guineensis* en el mundo, México y estado de Chiapas. Se incluyen imágenes que demuestran la zona ocupada por el cultivo en una localidad de la región Soconusco, Chiapas durante el año 2002 y la expansión del cultivo en la actualidad (2020). Las imágenes abarcan parcelas de diversos ejidatarios de la comunidad el Arenal, municipio de Acapetahua, Chiapas. La ubicación geográfica de la comunidad es 15°10'22,49" de latitud norte y 92°42'03,25" de longitud oeste, con altura variable de 8 a 13 m s.n.m. Para la identificación de la expansión del cultivo en la zona, se utilizó el programa Google Earth a una altura del ojo de 2,6 km.

Con la finalidad de responder al segundo objetivo de esta investigación (documentar los efectos que provoca la palma de aceite sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo), en la presente revisión se realizó la búsqueda de palabras en el apartado de "tópicos" dentro de la base de datos "Web of Science" para los últimos diez años (2009 hasta marzo del 2018). Se consultaron investigaciones las cuales relacionan el cultivo de la palma de aceite con los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo. Por lo tanto, aunque la búsqueda de palabras fue en inglés, las palabras claves utilizadas fueron: "palma de aceite", "suelo", "propiedades físicas" "propiedades químicas", "propiedades biológicas", "biodiversidad", "organismos" y "macroinvertebrados". En la cadena de búsqueda, se utilizaron los operadores booleanos "AND" y "O".

La palma de aceite en el mundo, en México, Chiapas y las políticas que promueven el establecimiento de palma en México

E. guineensis, la planta más utilizada para la producción de aceite es nativa de África tropical. A nivel mundial, la superficie sembrada incrementó de 7,5 millones de ha en 1994 a casi 19 millones de ha en el 2014. La producción

aumentó de 13,5 millones de t en 1990 a 155,8 millones de t en 2014. El cultivo tiene presencia en 43 países de los cuales Indonesia y Malasia son los principales productores, en conjunto estos países suministran la mitad del producto básico a nivel mundial (FAO, 2019). En el 2014, Indonesia produjo 32,5 millones de t de aceite de palma en crudo y exportó el 80 % del total. La eficiencia en cuanto a producción y bajo costo, convierte el aceite vegetal de palma como el cultivo más atractivo en el mundo (Sheil et al., 2009) y el más rentable en los climas tropicales (Basri Wahid et al., 2005).

En el sudeste de Asia, la disponibilidad de tierra es limitada para nuevos establecimientos de palma de aceite, por lo que América Latina ha abierto nuevas fronteras para la expansión del cultivo, entre el 2001 al 2014 incrementó la superficie sembrada (ha) en un 9 % por año (FAO, 2019). Existe preocupación sobre los riesgos ante una expansión similar al continente asiático y la posible mitigación de los impactos ambientales (Craven, 2011), ya que para la creación de nuevas áreas para el cultivo de palma de aceite se ha recurrido a la deforestación de bosques (Fitzherbert et al., 2008; Carron, Auriac et al., 2015; Carron, Pierrat et al., 2015; Furumo & Mitchell Aide, 2017a).

La opinión de investigadores es coherente y toman en cuenta los cambios del clima para la producción de la fruta de la palma. Argumentan que en países de América Latina y Malasia cuentan con condiciones ideales para el crecimiento y desarrollo de la palma, incluso duplicar las cosechas en las próximas décadas, aunque las estimaciones de producción pueden alterarse por el cambio climático (Abubakar et al., 2022; Paterson et al., 2017; Paterson & Lima, 2017). La variabilidad en la intensidad y duración de las lluvias, afecta la producción de fruta y calidad del aceite (Abubakar et al., 2022). Para Indonesia, a través de un simulador llamado “Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM)” estimaron el crecimiento de plantación del cultivo (Akram et al., 2022). Los resultados sugieren que para una plantación de 0 a 8 años, se requieren entre 2500 mm y 3900 mm de riego anual, necesidades de riego que a largo plazo pueden afectar los niveles freáticos de diversas regiones tropicales del mundo, es más, el problema de la falta de riego puede ser mayor, ya que las estimaciones no toman en cuenta las necesidades de riego para la producción de fruta fresca (Akram et al., 2022; Subramaniam et al., 2020).

Para América Latina, se reportó que de una muestra de 342 032 ha de plantaciones, el 79 % proviene de tierras de cultivo y el 56 % de pastos para ganado (Furumo & Mitchell Aide, 2017b). Mientras que, en una evaluación a escala mundial, se afirma que solo el 2 % de la expansión de nuevas plantaciones de palma surgieron a partir de la deforestación en la región de Centro América y el Caribe, durante el periodo de 1989 al 2013 (Vijay et al., 2016).

En México, para el año 2015, se reportó una superficie sembrada de casi 108 690 ha. Del territorio mexicano, Chiapas es el estado con mayor expansión de palma de aceite con una superficie aproximada a los 45 435 ha (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2019). En la región Soconusco Chiapas, se estima una superficie de 18 649 ha, es la zona con más plantaciones del estado. En este sentido, la mayoría de los terrenos en los cuales se han establecido plantaciones de palma, corresponden a espacios que han sido plantados con cultivos de maíz, frijol, plátano, cacao, mango y áreas de pasto. En este caso, es una situación contrastante para otras áreas de Indonesia y Brasil, en donde los bosques naturales son remplazados por la palma de aceite (Potapov et al., 2019; Vijay et al., 2016). No obstante, el hecho de que las plantaciones de palma no hayan sido establecidas en áreas de bosques, no quiere decir que queda libre de generar algún impacto ambiental. Con base en esta idea, aún cuando la región es reconocida por sus producciones altas en el campo, no está exonerada de que con el tiempo sus recursos (suelo, agua, etc.) se vean empobrecidos de nutrimentos y contaminados por el uso de pesticidas y fertilizantes químicos, como los reportes que dan evidencia para la región de Asia (Paing Tan et al., 2014).

Los cambios en el uso de suelo para la localidad el Arenal en el municipio de Acapetahua, que forma parte de la región Soconusco, Chiapas, México, se muestra en la Figura 1. Se comparó la fotografía de satélite del año 2002 y 2020 (Google Earth, 2020), lo que evidenció la ampliación de nuevas zonas de cultivo de palma para esa localidad. De acuerdo con datos recabados, para el año 2006 la localidad el Arenal pasó de tener una superficie sembrada de 870,0 ha a 1725 ha para el año 2009, lo que corresponde a un incremento del 98,3 % en tan solo tres años. Hoy en día, la superficie sembrada para dicha localidad es de 2350 ha.

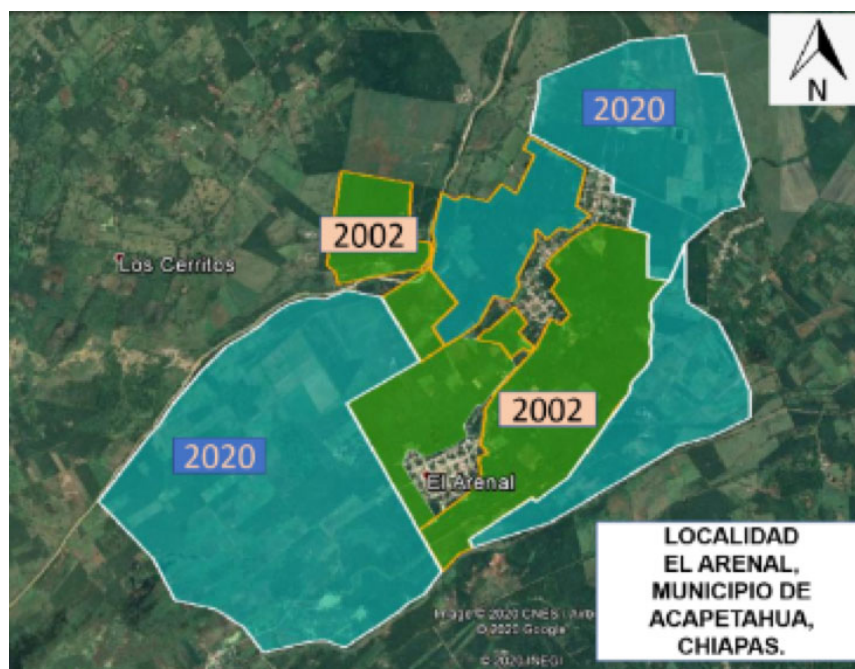


Figura 1. Panorámica de la superficie sembrada de palma de aceite de acuerdo con las imágenes de Google Earth en el 2002 (verde oscuro) y 2020 (azul claro) en la localidad El Arenal, municipio de Acapetahua, Chiapas, México.

Figure 1. Panoramic view of the area planted with oil palm according to Google Earth images in 2002 (dark green) and 2020 (light blue) in El Arenal, municipality of Acapetahua, Chiapas, Mexico.

Con base en preguntas directas aplicadas a los representantes de la localidad, el cambio del uso de suelo pasó de pastizal a palma de aceite y el incremento de la superficie sembrada se extendió no solo para la localidad el Arenal, sino también para diferentes localidades y rancherías del municipio de Acapetahua, Chiapas.

La expansión del cultivo en México resultó de una iniciativa política del gobierno federal y estatal, a través de los programas de apoyo para el campo desde el año 2003 al 2014 (Santacruz de León et al., 2014). Dentro del programa de apoyo federal del año 2011, se otorgaron cuatro tipos de subsidios: establecimiento de viveros, establecimiento y mantenimiento pre-productivo de nuevas plantaciones, mantenimiento pre-productivo y mantenimiento de plantaciones en producción (Cámara de Diputados, 2011). En los cuatro apoyos, el programa exigía la aplicación de los llamados “paquetes tecnológicos”, en los cuales consideraban la aplicación de fertilizantes químicos y pesticidas, además del acompañamiento de asesoría técnica, que en la práctica se centraban en dar seguimiento al control administrativo del subsidio y financiamiento otorgados por los bancos, de cada uno de los socios y de las sociedades de producción rural. Bajo este esquema de apoyo surgen las preguntas ¿Por qué el gobierno federal impulsó este tipo de apoyos? Este cuestionamiento se responde con lo investigado por Fletes-Ocón y Bonano (2015), donde argumentan que la implementación del programa de expansión de la palma buscaba formas de justificar sus acciones respecto a las carencias en condiciones socioeconómicas y políticas de Chiapas.

El arraigado problema de pobreza, aunado a la inestabilidad de precios del maíz y la preocupación por el uso de cultivos para la producción de etanol, fueron los justificantes para la expansión de la palma. A partir de ello, surgen otras preguntas, ¿El gobierno pudo erradicar la pobreza y con la superficie sembrada y cosechada a ocho años de la implementación del programa, se abasteció el mercado nacional e internacional de etanol?, ¿El gobierno sabía de los alcances o impactos ambientales que podía generar el establecimiento de nuevas plantaciones de palma?, ¿Dentro

de la justificación de los programas de apoyo, se planteó un manejo agronómico y sustentable del cultivo? En la realidad, los programas de apoyo apartaban al eje ambiental de lo económico y social, ya que los productores se interesaron más por la compra de insumos químicos, adquisición de equipos y herramientas, plantas para ampliar la superficie sembrada, entre otros. Lo anterior podría estar relacionado con el objeto del programa de apoyo (Cámara de Diputados, 2011), acuerdo por el que se emiten los lineamientos específicos para la operación del proyecto transversal trópico húmedo, que tenían como objetivo incrementar la situación económica y social, para impulsar y fomentar la inversión privada y social en las zonas del trópico húmedo y subhúmedo del territorio nacional.

Efecto de la palma de aceite sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo

Se define la calidad del suelo como la capacidad permanente que tiene para funcionar como un ecosistema vivo que sustenta la productividad biológica y mantiene la calidad ambiental, de tal forma que se promueva la salud vegetal, animal y humana (Coutris et al., 2012). Con base en lo antes indicado, se han presentado propuestas de indicadores que incluyen las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, para su aplicabilidad en el contexto de la agricultura sustentable (Astier-Calderón et al., 2002; Vallejo-Quintero, 2013). Las propiedades físicas, tales como la capacidad de almacenamiento de agua disponible para la planta, densidad aparente (D_a) e infiltración del agua, son aspectos importantes de la calidad del suelo (Moebius et al., 2007; Pulido-Moncada et al., 2018).

Las propiedades químicas, tales como el contenido de nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio, son esenciales para la nutrición de plantas, además de los nutrimentos menores y de la materia orgánica (MO) que es esencial y está vinculada con diversas propiedades y funciones del suelo (Bot & Benites, 2005; Neumann et al., 2014). En realidad, falta mucho por investigar, conocer y comprender los impactos que la palma de aceite puede generar al suelo (Carron, Auriac et al., 2015; Carron, Pierrat et al., 2015), aun cuando persisten las políticas públicas de algunos gobiernos de países en desarrollo y emergentes en regiones tropicales que promueven cada vez más el cultivo de palma, a pesar de las presiones de organizaciones no gubernamentales (Pirker et al., 2016).

El número de investigaciones con la búsqueda de palabras “palma de aceite”, “suelo” “propiedades” se muestra en la Figura 2. Se encontraron 146 investigaciones para el periodo 2009 hasta el 30 de septiembre del 2020; solamente entre los años 2015, 2016 y 2017 se publicaron 87 trabajos. Los documentos en los que se han publicado corresponden a: artículos de investigación, actas, artículos de revisión, capítulos de libro y material de redacción (Figura 3). Además, en la Figura 4, se muestra por grupo de palabras, otra perspectiva de las investigaciones en palma y la relación con el suelo. Lo anterior, pone de manifiesto la importancia que debe de brindarse a la investigación ecológica y ambiental generada por el manejo agronómico de la palma en los últimos años.

Los impactos en las propiedades fisicoquímicas del suelo provocados por el cultivo de la palma, continúan siendo evidentes. Como monocultivo, la palma de aceite durante dos generaciones (plantaciones de quince y tres años, primera y segunda generación, respectivamente) puede dar como resultado pérdidas de carbono, en consecuencia, contribuye a un aumento en la concentración de CO_2 atmosférico, por tanto, una aceleración en el cambio climático (Dhandapani et al., 2020). Además, se generan cambios en las propiedades fisicoquímicas de la turba, un material orgánico que ha sido utilizado por pequeños productores de Malasia y otras partes del Sudeste Asiático. En efecto, se informó que, para el cultivo de palma de segunda generación, el análisis de suelo reveló un aumento de la turba ($0,43 \text{ g cm}^{-3}$), un valor cercano al límite superior descrito por la FAO para turba tropical (Dhandapani et al., 2019).

Ante un mal manejo agronómico del cultivo de palma, los suelos disminuyen su calidad. La evidencia es reportada por Dhandapani et al. (2019), quienes revelaron una disminución en la MO, $C_{\text{orgánico}}$, N_{total} y temperatura, mientras que el pH y la D_a aumentaron en plantaciones de segunda generación comparado con un bosque con turba y cultivos intercalados de palma de aceite y piña. Además, se reveló que los cambios en las propiedades del suelo tuvieron efectos negativos en la abundancia relativa de bacterias Grampositivas en palma de aceite y no en sistema

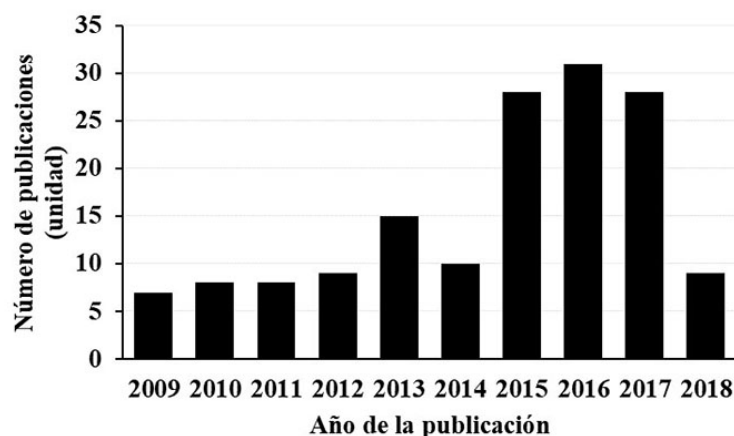


Figura 2. Número de publicaciones por año que relacionan las palabras “palma de aceite”, “suelo” y “propiedades” en los títulos de las investigaciones consultadas en la base de dato “Web of Science”. El acceso a la base de datos fue a través de una cuenta institucional, El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur, CONACyT, México).

Figure 2. Number of publications per year that relate to the words “oil palm”, “soil”, and “properties” in the titles of the research consulted in the “Web of Science” database. Access to the database was through an institutional account, “El Colegio de la Frontera Sur” (Ecosur, CONACyT, Mexico).

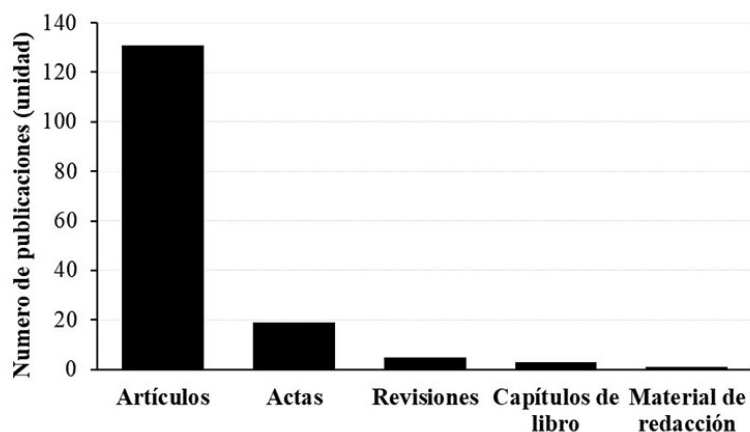


Figura 3. Número de publicaciones por tipo de documento que relacionan las palabras “palma de aceite”, “suelo” y “propiedades” en los títulos de las investigaciones consultadas en la base de datos “Web of Science”. El acceso a la base de datos fue a través de una cuenta institucional, El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur, CONACyT, México).

Figure 3. Number of publications by type of document that relate the words “oil palm” and “properties” in the titles of the research consulted in the “Web of Science” database. Access to the database was through an institutional account, “El Colegio de la Frontera Sur” (Ecosur, CONACyT, Mexico).

de bosque. En otro estudio, se destacó que el inadecuado manejo del monocultivo, que incluyen aplicaciones excesivas de fertilizantes, resulta en altos costos de producción y contaminación del suelo. Los investigadores reportaron que posterior a veinticinco años de aplicación de fertilizantes en palma de aceite, se redujo el contenido de N_{total} y $C_{orgánico}$, aunado, se alteró la abundancia de las bacterias Firmicutes y Bacteroidetes, microbios benéficos que suprimen enfermedades en el suelo. En suelos de bosques secundarios, los análisis de suelo indicaron todo lo contrario (Salamat et al., 2021).

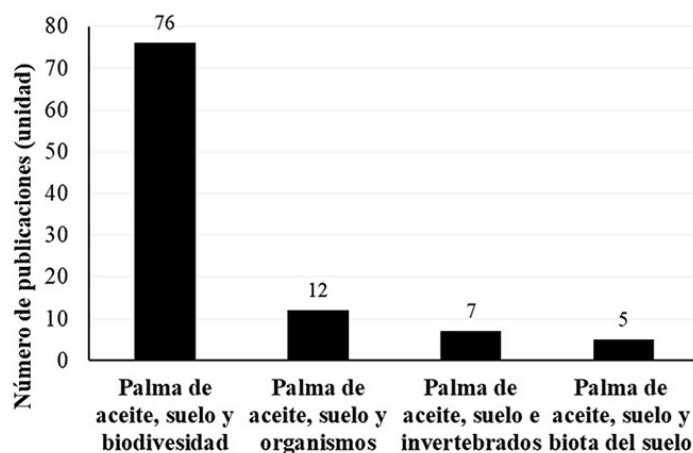


Figura 4. Número de publicaciones que relacionan al cultivo de palma de aceite con la biodiversidad, organismos del suelo, invertebrados y biota del suelo entre los títulos de las investigaciones consultadas en la base de dato “Web of Science”. El acceso a la base de datos fue a través de una cuenta institucional, El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur, CONACyT, México).

Figure 4. Number of publications that relate oil palm cultivation with biodiversity, soil organisms, invertebrates, and soil biota among the titles of the research consulted in the “Web of Science” database. Access to the database was through an institutional account, “El Colegio de la Frontera Sur” (Ecosur, CONACyT, Mexico).

Los cambios en la degradación de suelo se han comparado entre un bosque y una parcela de palma. Para algunos casos, los autores encontraron que la erosión del suelo en palma de aceite no mostraba cambios con respecto a un bosque (Sivakumar & Stefanski, 2007). En contraste, se reportó que la capacidad de intercambio de cationes (CIC), pH, así como la presencia de lombrices de tierra fue mayor en el suelo en palma de aceite de veintidós años comparada con otras parcelas forestales. Pero, en el suelo en palma de aceite hubo poca capacidad de retención de humedad (Nadeesha & Weerasinghe, 2016). En contraste, en una investigación con plantaciones de seis, doce y dieciocho años, se encontraron valores altos de CE, Ca y Mg intercambiable, azufre disponible y $C_{\text{orgánico}}$ a profundidades de 0 a 60 cm en comparación con áreas de barbecho adyacentes. También, los autores indicaron que el $N_{\text{disponible}}$, P, Ca y Mg intercambiables, así como S y B, no cambiaron con la edad de la plantación (Behera et al., 2020).

Se sugiere que las prácticas de manejo que incluyen la incorporación de hojarasca y residuos de racimos de fruta vacía (RFV), abonos orgánicos, incorporación de cultivos de cobertura y menos aplicaciones de insumos químicos, dan como resultado el mantenimiento de la calidad e integridad del suelo en palma de aceite (Dhandapani et al., 2020; Formaglio et al., 2021; Mardegan et al., 2022; Rahman et al., 2021). En contraste, cuando se evaluaron los parámetros del suelo en diferentes edades de palma se observaron marcadas diferencias. En una parcela de palma de veinte años se presentaron variaciones en el contenido de $C_{\text{orgánico}}$, N_{total} , P, Ca, Mg y K disponible, los cuales podrían atribuirse a la demanda de nutrimentos de la planta y a las prácticas de manejo por más de quince años sin la adición de fertilización química y orgánica (Ogeh & Osiomwan, 2012). Asimismo, para la región Soconusco, Chiapas México, se reportó una disminución de macro y micronutrientes en parcelas adultas de palma de aceite de quince años comparadas con parcelas de tres años (Velázquez-González et al., 2013).

En cuanto a la compactación del suelo, se menciona que la estructura de las raíces juega un rol importante en la compactación del suelo, según cultivo. El suelo de palma de aceite mostró una mayor resistencia mecánica de 5,6 kg m² en comparación con plantaciones comerciales de teca (3,38 kg m²) y cacao (3,19 kg m²); no obstante, en áreas de potrero la resistencia mecánica fue de 4,02 kg m² (Akinde et al., 2020). Para el cultivo de palma, se sugiere que debido al paso de vehículos recolectores de fruta y el entrelazado de las raíces (Lahmar & Ruellan, 2007) y, en el caso de potrero, debido al pastoreo de ganado, la resistencia mecánica del suelo será mayor (Lahmar & Ruellan, 2007).

Otras investigaciones indican que la necesidad de compactación aplicada al suelo puede ser una técnica factible para evitar pérdidas de agua por infiltración en suelos arenosos. Se propuso una nueva técnica para mejorar la distribución vertical del riego en plantaciones de palma con suelo franco-arenoso. La compactación del suelo se incrementó con el mayor número de pases de maquinaria (los niveles fueron de tres a cinco pases), lo que provocó una mayor Da ($1,8 \text{ g cm}^{-3}$) en comparación con áreas sin aplicación de la técnica. Si bien, el aumento de la compactación disminuye la tasa de infiltración vertical, es necesario evaluar a largo plazo las propiedades químicas del suelo y la repercusión en la alteración de la biodiversidad del suelo (Al-Esawi et al., 2021).

Efecto de la palma de aceite sobre los organismos: biota del suelo

La producción agrícola depende de muchos servicios ecosistémicos, la polinización, el control biológico de plagas y la descomposición de la materia orgánica, se encuentran entre los más importantes (Gray & Lewis, 2014). Hay evidencia de que el incremento de la superficie sembrada del cultivo de palma de aceite en áreas tropicales del mundo, ha sido una de las principales causas de los cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, lo que implica una disminución o pérdida de biodiversidad y un mal funcionamiento de las relaciones tróficas del suelo (Azhar et al., 2017; Barnes et al., 2014; Ocampo-Peñuela et al., 2018), incremento en las emisiones de carbono (Carlson et al., 2012), además de otros servicios ecosistémicos, como la erosión, la fertilidad de suelos o la mitigación de eventos extremos (Dislich et al., 2017). De los pocos estudios realizados en palma, casi todos los organismos estudiados muestran una menor riqueza de especies comparado con los bosques (Dislich et al., 2017; Savilaakso et al., 2014), situación que es más evidente en Malasia e Indonesia, países con mayor superficie cultivada en el mundo (Pardo Vargas et al., 2015), sin restar importancia a los impactos ambientales provocados por las deforestaciones que se documentan en países como Brasil, Colombia, Ecuador y Honduras por la conversión de zona de bosques a monocultivo de palma de aceite (Furumo & Mitchell Aide, 2017b; Vijay et al., 2016).

Los organismos del suelo desempeñan un papel vital en las funciones del ecosistema, como la modificación de la estructura del suelo, la regulación de la descomposición de la MO, mejoran la productividad de los cultivos y la mineralización de nutrientes, influenciados por las propiedades del suelo (Bessou & Marichal, 2015); además, por sus alta sensibilidad a perturbaciones, los convierte en buenos indicadores del impacto humano sobre el ambiente (Lavelle & Spain, 2001). Se proponen a diversos taxones como indicadores de la calidad e integridad del suelo (Santorufu et al., 2012), pero sobre todo para medir los cambios que se generan por el uso de suelo en cultivos comerciales, como es el caso de la palma de aceite, que tanta polémica social y ambiental ha generado en el sudeste de Asia, Centro y Sudamérica (Vijay et al., 2016).

Existe escasa información del impacto del cultivo de la palma sobre la biota de suelo, sobre todo en aspectos relacionados con el manejo agronómico (aplicación de pesticidas, agroquímicos, mecanización durante la cosecha y el efecto del crecimiento radicular sobre la compactación del suelo). Lo anterior respalda la idea, de que las prácticas de manejo aplicadas al suelo en el tiempo y espacio, tienen la capacidad de mejorar las condiciones para la alimentación de la fauna y química del suelo, en última instancia, puede contribuir a una producción sostenible (Tao et al., 2016). En este contexto, las interacciones entre las propiedades físicas, químicas y biológicas son fuertes y complejas y por lo tanto, es necesario continuar con la evaluación en cultivo de palma de aceite (Carron, Auriac et al., 2015).

Respecto a la biodiversidad de macroinvertebrados del suelo, poco se ha documentado sobre la evaluación en el cultivo de palma de aceite y de lo que se sabe, es que la pérdida de la biodiversidad varía significativamente entre los diferentes taxones y microhábitats dentro de la palma de aceite (Foster et al., 2011). Dentro de las evaluaciones, se encontró mayor abundancia y riqueza de macroinvertebrados en la selva tropical que en el cultivo de palma de aceite, con ausencia notable de los órdenes Coleoptera y Hemiptera, que pudo ser el resultado de la desaparición de hábitats naturales y a la sensibilidad a los plaguicidas para el combate del escarabajo rinoceronte (*Oryctes rhinoceros*) (Mercer et al., 2014). Basado en que un aumento o exceso de fertilizantes en el cultivo palma, estos provocan cambios en

la comunidad microbiana, la aplicación de $124, 3 \text{ kg N ha}^{-1}$ + sulfato de amonio, provocó una reducción bacteriana en comparación con la parcela control. Además, la adición del fertilizante nitrogenado disminuyó el pH, C_{total} y el índice de solubilidad del pirofosfato (Ling Lau et al., 2022). Nuevamente, los hallazgos proporcionan evidencia de los cambios fisicoquímicos y biológicos del suelo que se ocasiona ante un mal manejo del cultivo.

La diversidad morfológica y la riqueza de larvas del orden Odonata, fueron afectadas por el cultivo de palma de aceite en comparación con áreas boscosas. La investigación sugiere que los cambios en los rasgos de las especies están en función de la estructura de los ecosistemas (Pereira Mendes et al., 2019). La estrategia de colocar islas de plantas y árboles en el interior de la parcela de palma incrementa la biodiversidad de los organismos. Después de un año, en la hojarasca se encontraron seis familias nuevas de 48 muestreadas, para el caso del muestreo en la hierba, se encontraron 47 familias nuevas de 58. En otros informes, se ha documentado una relación positiva entre fragmentos de bosques y riqueza de especies en palma de aceite circundantes (Lucey et al., 2014).

Se demostró que las replantaciones del cultivo de palma (tres y siete años después de la replantación), afectaron la abundancia y la composición de la macrofauna en comparación con plantaciones del primer ciclo, es decir, plantaciones de veinticinco a veintisiete años. Por lo tanto, se sugiere que la conversión de bosques a palma de aceite, así como la replantación de la palma, contribuyen en la pérdida de la biodiversidad de la macrofauna subterránea del suelo (Ashton-Butt et al., 2019). En un estudio similar, se informó que la diversidad hormigas y termitas (bioturbadores) fue mayor en el bosque primario que en el bosque talado o en la plantación de palma. En plantaciones de palma, la bioturbación se basó en un número menor de especies, lo que generó preocupaciones, ya que puede resultar en una pérdida de la biodiversidad en plantaciones de palma (Tuma et al., 2019). En otra investigación, se reportaron resultados contrastantes, en la cual, la diversidad de los organismos fue mayor en los cultivos de palma de aceite en comparación con las parcelas con pastos y hierbas (Ogedegbe & Ekwuonwu, 2014).

Otros informes demuestran que la expansión de la palma de aceite puede ocasionar un cambio en la estructura de la comunidad del suelo. Por ejemplo, para la provincia de Jambi, Indonesia, la palma contribuyó entre cuatro y treinta veces la abundancia y biomasa de lombrices exóticas (*Pontoscolex corethrus*), en comparación con la selva tropical. De hecho, las lombrices de tierra registradas son consideradas como invasoras, a tal grado de que, en un futuro, puedan afectar la biodiversidad nativa (Potapov et al., 2021).

La problemática de disminución de la biodiversidad puede ser solucionada a través de un sistema de restauración ecológica, por ejemplo, colocar islas de árboles o núcleos de reclutamiento que sirvan para mantener y atraer diversidad de insectos y plantas (Teuscher et al., 2016). Se sugiere que bosques adyacentes al cultivo de palma pueden ser una alternativa, dado que permiten activar servicios ecosistémicos, por ejemplo, en un caso particular se encontró que los escarabajos cumplen sus funciones ecológicas, con una movilización de estiércol y mayor diversidad de estos organismos en cultivos de palma (Gray et al., 2016).

Prácticas de manejo para el incremento de la fertilidad y biota del suelo

Los principales aportes de nutrientes provienen de fertilizantes, cal, plantas fijadoras de nitrógeno y compost/mantillo (Dislich et al., 2017). Los mayores aportes provienen de fertilizantes químicos, aunque las dosis y frecuencias depende de los requerimientos del cultivo, la edad del árbol, las condiciones del suelo, los tipos de fertilizantes disponibles y de la cantidad y época de precipitación (Comte et al., 2012). Generalmente, se recomienda la aplicación frecuente de fertilizante a dosis bajas para terrenos arenosos o en parcelas con pendientes donde puede existir el riesgo de pérdidas de nutrientes por escorrentía o lixiviación. En tales áreas, se recomienda una aplicación anual de fósforo insoluble en agua, mientras que, para los fertilizantes solubles, se sugieren aplicar en dosis bajas, varias veces al año en parcelas jóvenes (Goh et al., 2016). Algunos autores recomiendan una dosis de N que varían de 48 a 90 kg/ha/año para palmas inmaduras (Choo et al., 2011) y de 56 a 206 kg/ha/año para palmas maduras (Pardon et al., 2016).

En algunas parcelas han reducido el uso de fertilizantes químicos por los aportes de residuos de cosecha. En muchos casos no se da continuidad a esta práctica, ya que los productores no observan resultados a corto plazo en las mejoras de producción (mayor peso de racimos). En este sentido, se presentan algunas evidencias del efecto que provocan los residuos de la cosecha de palma de aceite sobre la recuperación de la fertilidad del suelo en el mismo cultivo.

Los RFV y el desecho del afluente de palma de aceite (por sus siglas en inglés POME; palm oil mill effluent), se han utilizado en los suelos del cultivo de palma y se ha observado que mejoran la fertilidad del suelo, especialmente en suelos pobres en materia orgánica (Bessou et al., 2017; Carron, Pierrat et al., 2015; Singh et al., 2010; 2011). Se han realizado diversas investigaciones para evaluar los posibles efectos de POME sobre los suelos, aun cuando se sabe que los desechos tienen un efecto ambiental adverso cuando se utilizan sin el tratamiento POME (Ebana et al., 2017). Por ejemplo, en una revisión se expusieron varios ejemplos sobre el uso de los residuos de cosecha como el RFV, la cáscara del fruto de la almendra, POME, la fibra que se genera después del prensado, ramas y troncos y su contribución como mejoradores de suelo (Bessou et al., 2017). En esta línea, se demostró que los POME mejoran la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos, con un incremento en el pH, CE, N, P y Fe comparado con parcelas control (Nwoko & Uwike, 2016). También, con la aplicación de POME a razón de 10, 20 y 30 t ha⁻¹ después de tres semanas de aplicación, aumentó el nivel del carbono orgánico del suelo, N, P y K en el suelo (Akinyele & Fatoye, 2013). Por otra parte, se encontraron diferencias significativas entre la aplicación de afluentes y el control en los parámetros pH, MO, N_{total}, K, Mg y P disponible, mientras que los valores de Na, Ca y CE del suelo no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos (Iyakndue et al., 2017). En otro experimento, las aplicaciones en suspensión de 100 mL, 200 mL y 300 mL de POME después de catorce días, se observó un cambio positivo en los parámetros fisicoquímicos del suelo (N, P, K, Ca, Mg y Na) (Ebana et al., 2017).

Con respecto al uso de los residuos de hojas y tallos de palma (frondas) y los RFV, se ha documentado que después de los procesos de compostaje, se originan productos como biocarbón, cenizas y compost, considerados recursos orgánicos importantes para mejorar la fertilidad de los suelos (Anyaocha et al., 2018). De hecho, se destaca que la aplicación de biocarbón a las áreas forestales incrementó la retención de humedad del suelo, estabilidad de los agregados a través del tiempo, incrementó la porosidad y a su vez redujo la Da del suelo. Además, el compuesto orgánico favoreció la CIC, concentración de fósforo y potasio disponibles (Li et al., 2018).

Se demostró que las frondas incrementaron los contenidos de C_{total}, N_{total}, Ca y Mg en micrositios de plantaciones de diez años (Paing Tan et al., 2014). Por ejemplo, cuando agregaron RFV comparado con otras prácticas de manejo, se observó mayor actividad de la biota del suelo y mejoramiento en las propiedades químicas del suelo (aumento del pH, mejoramiento de los agregados y disminución de la Da del suelo) (Tao et al., 2018). Con la intención de evaluar las propiedades bioquímicas del suelo y comparar los efectos entre productos químicos convencionales y orgánicos, se demostró que la aplicación de fertilizantes sintéticos (NPK) y dolomita provocaron una mayor saturación de bases, cationes intercambiables y P disponibles, comparado con la aplicación de residuos de hojas y tallos (frondas) entre hileras en una parcela de palma. No obstante, el apilamiento de las frondas promovió la porosidad del suelo, con una disminución de la lixiviación de K, Mg, Na, y P total en las frondas apiladas que en las áreas fertilizadas. Los autores sugieren que el manejo de fertilización del cultivo y la sincronización de frondas permitirá reducir la lixiviación de nutrientes y lograr así un paso crucial en el manejo adecuado del suelo (Kurniawan et al., 2018).

Otros estudios indican que la abundancia y diversidad de algunos organismos del suelo, tales como del orden Clitelata, Coleoptera y Dermaptera, se ven favorecidos por la aplicación de residuos de palma de aceite, lo que sugiere así la importancia de la conservación de la macrofauna del suelo, debido al rol funcional en la descomposición de la MO e interacciones con otras especies en la cadena trófica (Carron, Pierrat et al., 2015). En efecto, en un estudio de quince años (Sumatra, Indonesia), se demostró que la aplicación continua de RFV, promovió la actividad de alimentación de la fauna del suelo, con aplicación baja (210 kg/árbol/año + 0,02 kg/árbol/año de urea) y aplicación media de RFV (420 kg/árbol/año + 0,04 kg/árbol/año de urea), comparado con

aplicaciones de fertilizantes químicos (1,75 kg/árbol/año de urea, 0,5 kg/árbol/año de superfosfato triple de calcio, 2,5 kg/árbol/año de muriato de potasio y 0,05 kg/árbol/año de Dolomita [CaMg(CO₃)₂]). Además, la densidad de ácaros fue mayor con los tratamientos de baja y alta aplicación de RFV (630 kg/árbol/año + 0,06 kg de urea/árbol/año), comparado con la aplicación de fertilizantes químicos (Tao et al., 2018).

Las diferentes prácticas de manejo del suelo tienen la capacidad de crear complejidad espacial en la actividad de alimentación de la fauna del suelo y las propiedades químicas del suelo. Pero, hay diferentes reacciones en la actividad microbiana, dado que se han observado diferencias entre especies de organismos en cuanto a la disminución de sus poblaciones (Iyakndue et al., 2017). Aun cuando los resultados se observan a mediano y largo plazo, además de las condiciones climáticas y del suelo de los sitios de plantación, las prácticas de incorporación de residuos de cosecha o generación de materia seca siguen siendo desconocidos, sin embargo, es una práctica que puede ser importante para la intensificación sostenible de la palma de aceite, pero acompañada con prácticas que incluyen el manejo de nutrimentos, el manejo del dosel y manejo de la cosecha (Tao et al., 2017), aunque se sugiere que la eficiencia de los residuos en el cultivo de palma dependerá de la aplicación controlada (Nwoko & Uwike, 2016).

En las plantaciones de palma de aceite, las hierbas no deseadas compiten por nutrimentos, humedad y luz solar y eventualmente causan disminución del rendimiento de hasta un 20 % (Sahid et al., 1992; Samedani et al., 2015). Por lo que, una de las recomendaciones técnicas clásicas de carácter agronómico, es establecer en los lotes de cultivo una cobertura vegetal previa a la siembra, para tener efectos benéficos sobre la palma y el agroecosistema en general, ya que se genera un incremento de un 10 % en el rendimiento (Samedani et al., 2015). Pero en agroecosistemas perennes pocos estudios han intentado determinar el efecto de los cultivos de cobertura en la comunidad de malezas (Baumgartner et al., 2008).

En la localidad Tomé-Açu, estado de Pará, en la región de la amazona en Brasil, se condujo un experimento en un sistema agroforestal que incluye palma de aceite, monocultivo de palma y un bosque secundario. Los resultados demostraron que el índice de gestión de carbono (CMI, por sus siglas en inglés) fue mayor en el sistema agroforestal en comparación con el monocultivo. Al parecer, el sistema de manejo, principalmente la incorporación o mantenimiento de la MO, promueve la fertilidad y la biodiversidad del suelo. Por lo tanto, los autores sugieren que la palma de aceite integrada en un sistema agroforestal puede conducir a una sostenibilidad del cultivo (Gomes et al., 2021).

La aplicación de biofertilizantes y pequeñas cantidades de fertilizantes químicos, han promovido cambios en el crecimiento de la palma y en la biota del suelo. Por ejemplo, se reportó que la aplicación de biofertilizante al 100 % (compuesto por los grupos *Proteobacteria*, *Basidiomycota*, *Ascomycota*, *Trichoderma* e *Hypocrea*) y biofertilizante (los mismos organismos) + 30 % de fertilizante químico, incrementaron la biodiversidad de hongos benéficos del suelo. No obstante, debido a la acción combinada de biofertilizante y fertilizante químico, las cantidades de N y K fueron significativamente mayor en comparación con el tratamiento control. Por tanto, la aplicación equilibrada y suficiente de biofertilizantes y componentes químicos, permiten la supervivencia de organismos beneficiosos, en adición, se mejora la fertilidad del suelo (Zainuddin et al., 2022).

Se han reportado experimentos donde fueron evaluados diferentes tipos de coberturas dentro de las parcelas de palma de aceite. En Malasia, se evaluó la combinación de cultivos de cobertura como *Axonopus compressus*, *Calopogonium caeruleum* + *Centrosema pubescens*, *Mucuna bracteata*, *Pueraria javanica* + *Centrosema pubescens* y el control (Glifosato). Los investigadores reportaron que, el tratamiento control o deshierbe fue el que presentó el rendimiento más bajo, además de la supresión y disminución de la materia seca de las malezas (Samedani et al., 2015).

Una evaluación con cinco especies de leguminosas promisorias como coberturas vivas, destacaron que el índice de cobertura fue favorecido por la mejora en las condiciones de humedad del suelo, sin embargo, de las especies evaluadas, *Desmodium ovalifolium* mostró un índice de cobertura elevado y estable. Al respecto, se sugiere que el uso de coberturas vegetales, para mantener la superficie del suelo cubierta con residuos de cultivo o cultivos de cobertura, es una alternativa en palma de aceite (Barrios-Maestre et al., 2011).

Otro estudio evaluó la especie *Mucuna bracteata* en una pendiente de entre el 15 al 25 %. Los resultados demostraron que la cobertura vegetal disminuyó la erosión, aumentó la infiltración y evitó la pérdida de nutrientes en una plantación de palma de entre siete y veinticinco meses de edad (Satriawan et al., 2015). Con la práctica de cultivos de cobertura + fertilizantes orgánicos, se disminuyó la escorrentía y la erosión entre 23,73 % y 27,29 %, al igual que la práctica técnica de conservación como sedimentos más el cultivo de cobertura y fertilizante orgánico, que resultó ser efectivo para controlar la escorrentía y la erosión entre 45,81 y 45,63 % en comparación con las parcelas control (Satriawan et al., 2015). Otros informes revelaron que la cobertura vegetal permitió una reducción de la pérdida de suelo en un $41,7 \pm 5,7$ % ($2,85 \pm 2,10$ t ha⁻¹), en comparación con el control (suelo desnudo) que presentó valores de pérdida de suelo de $73,60 \pm 4,00$ % ($5,26 \pm 3,20$ t ha⁻¹) (Sahat et al., 2016). En el Cuadro 1, se presenta un resumen de diferentes actividades de gestión para mejorar las condiciones de suelo en palma de aceite.

Cuadro 1. Resumen de actividades o prácticas de gestión para la mejora de la calidad del suelo en plantaciones de palma de aceite.

Table 1. Summary of activities or management practices to improve soil quality in oil palm plantations.

Sitio de estudio	Actividad o práctica de manejo	Resultados	Referencia
Perusahaan Perkebunan London Sumatra Indonesia	Siembra de leguminosas como cultivo de cobertera en los primeros años. Posterior a los 15 años de establecimiento, se adicionaron 26 t ha ⁻¹ de RFV.	Incremento del C _{orgánico} , mayor rendimiento por ha e incremento de la biomasa vegetal y radicular en comparación con parcelas sin manejo.	Rahman et al. (2021)
Godavari, Andhra Pradesh, India	Posterior a los 13 años del establecimiento de palma y durante 6 años consecutivos, se aplicó mantillo (<i>mulching</i> en inglés) como cubierta al suelo.	Mejoras en el C _{orgánico} , CEC, mayor contenido disponible de N, P, K, M y B. Los cambios se compararon con parcelas de palma sin la adición de mantillo.	Manorama et al. (2021)
Tailandia, Pará, Brasil	Adición de RFV, control biológico de plagas y enfermedades, baja frecuencia de desbrozadora para el control de malezas (siete veces al año).	Las concentraciones de C y N fueron mayores en palma orgánica a una profundidad de 0-10 cm en comparación con cultivo convencional. De acuerdo con los autores, los resultados sugieren que la gestión orgánica en el cultivo influye en la MO y promueven el secuestro de C y N.	Mardegan et al. (2022)
Batanghari, Jambi, Indonesia	Aplicaciones reducidas de fertilización, deshierbe mecánico e incorporación de MO.	Después de 1,5 años de manejo, hubo una mayor tasa de C _{extraíble} y C _{orgánico} . También, se promovió el incremento de la biomasa microbiana. Los resultados sugieren que la incorporación de MO promueve la dinámica de la biota y una mayor fertilidad del suelo.	Formaglio et al. (2021)
Tomé-Açu, Pará, Brasil	Apilado de hojas en sistema agroforestal que incluye la palma y otros cultivos. Adición de fertilizantes orgánicos e inorgánicos en bajas dosis.	El porcentaje de colonización de micorrizas fue 3 veces mayor en el sistema agroforestal en comparación con el área de monocultivo.	da Silva Maia et al. (2021)

En general, todas las prácticas o mejoras agronómicas aplicadas al cultivo de palma pueden tener un efecto preponderante en las propiedades fisicoquímicas e incremento de la biodiversidad del suelo. Es necesario tener presentes que los bosques, selvas o sistemas integrados, incrementan los servicios ecosistémicos, incomparables a los monocultivos mal manejados. Por tanto, surge la necesidad de que instituciones, centros de investigación, investigadores, técnicos y alumnos, divulguen la información recabada en campo y se aplique en pequeña, mediana y grande escala en plantaciones de aceite.

Conclusiones

Si bien el cultivo de palma de aceite tiene impacto económico y social en comunidades tropicales, la expansión del cultivo genera dudas sobre el impacto ambiental en términos de deforestación y disminución de la calidad del suelo, en específico, sobre el mantenimiento de la fertilidad y biodiversidad de organismos sobre y dentro del suelo.

Con base a los diversos estudios reportados en este documento, hasta el momento no se ha logrado obtener un manejo sostenible del cultivo de palma de aceite, puesto que no se han logrado integrar prácticas de manejo que permitan incrementar la producción del cultivo y las prácticas de manejo para mantener la calidad e integridad física del suelo.

Referencias

- Abram, N. K., Xofis, P., Tzanopoulos, J., MacMillan, D. C., Ancrenaz, M., Chung, R., Peter, L., Ong, R., Lackman, I., Goossens, B., Ambu, L., & Knight, A. T. (2014). Synergies for improving oil palm production and forest conservation in floodplain landscapes. *PLoS ONE*, 9(6), Article e95388. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095388>
- Abubakar, A., Yusoff Ishak, M. & Ahmad Makmom, A. (2022). Nexus between climate change and oil palm production in Malaysia: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, Article 262. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09915-8>
- Akinyele, S. A., & Fatoye, O. A. (2013). Effect of oil palm effluents and fiber on selected soil properties, carbon, nitrogen, potassium and phosphorous. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 6(2), 5–7. <https://bit.ly/3GPk3gu>
- Akinde, B. P., Olakayode, A. O., Oyedele, D. J., & Tijani, F. O. (2020). Selected physical and chemical properties of soil under different agricultural land-use types in Ile-Ife, Nigeria. *Heliyon*, 6(9), Article e05090. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05090>
- Akram, H., Levia, D. F., Herrick, J. E., Lydiasari, H., & Schütze, N. (2022). Water requirements for oil palm grown on marginal lands: A simulation approach. *Agricultural Water Management*, 260, Article 107292. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107292>
- Al-Esawi, J. S. E., Wayayok, A., Al-Ogaidi, A. A., Rowshon, M. K., Fikri Abdullah, A., & Abdullahi, S. (2021). Effect of soil compaction and palm oil application on soil infiltration rate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(3), Article 04020044. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001534](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001534)
- Anyaoaha, K. E., Sakrabani, R., Patchigolla, K., & Mouazen, A. M. (2018). Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.022>

- Ashton-Butt, A., Willcock, S., Purnomo, D., Suhardi, Aryawan, A. A., Wahyuningsih, R., Naim, M., Poppy G. M., Caliman J. P., Peh K. S. H., & Snaddon, J. L. (2019). Replanting of first-cycle oil palm results in a second wave of biodiversity loss. *Ecology and Evolution*, 9(11), 6433–6443. <https://doi.org/10.1002/ece3.5218>
- Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M., & Etchevers-Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605–620. <https://bit.ly/3OxTuOW>
- Azhar, B., Saadun, N., Prideaux, M., & Lindenmayer, D. B. (2017). The global palm oil sector must change to save biodiversity and improve food security in the tropics. *Journal of Environmental Management*, 203, 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.021>
- Barnes, A. D., Jochum, M., Mumme, S., Haneda, N., Farikhah Farajallah, A., Heru Widarto, T., & Brose, U. (2014). Consequences of tropical land use for multitrophic biodiversity and ecosystem functioning. *Nature Communications*, 5, Article 6351. <https://doi.org/10.1038/ncomms6351>
- Barrios-Maestre, R., Fariñas, J., Silva-Acuña, R., & Sanabria, D. (2011). Comportamiento de cinco especies de leguminosas como cobertura viva en palma aceitera en el estado Monagas, Venezuela. *Idesia*, 29(2), 29–37. https://idesia.uta.cl/index.php?option=com_volumenes&view=d&aid=643&vid=45
- Basri Wahid, M. B., Akmar Abdullah, S. N., & Henson, I. E. (2005). Oil palm-achievements and potential. *Plant Production Science*, 8(3), 288–297. <https://doi.org/10.1626/pp.8.288>
- Baumgartner, D. U., de Baan, L., Nemecek, T., Pressenda, F., & Crépon, K. (2008, November 12–14). *Life cycle assessment of feeding livestock with European grain legumes* [Conference session]. Proceedings of the 6th international conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector. Zurich, Switzerland. <https://edepot.wur.nl/8243>
- Behera, S. K., Shukla, A. K., Suresh, K., Manorama, K., Mathur, R. K., Kumar, A., Harinarayana, P., Prakash, C., & Tripathi, A. (2020). Oil palm cultivation enhances soil pH, electrical conductivity, concentrations of exchangeable calcium, magnesium and available sulphur and soil organic carbon content. *Land Degradation & Development*, 31, 2789–2803. <https://doi.org/10.1002/ldr.3657>
- Bessou, C., & Marichal, R. (2015). Soil fertility, evolving concepts and assessments. In M. J. Webb, P. N. Nelson, C. Bessou, J. P. Caliman, & E. S. Sutarta (Eds.), *Sustainable management of soil in oil palm plantings: Proceedings of a workshop held in Medan, Indonesia* (pp. 53–59). Australian Center for International Agricultural Research. https://agritrop.cirad.fr/579051/7/chap_579051.pdf
- Bessou, C., Verwilghen, A., Beaudouin-Ollivier, L., Marichal, R., Ollivier, J., Baron, V., Bonneau, X., Carron, M.P., Snoeck, D., Naim, M., & Caliman, J. P. (2017). Agroecological practices in oil palm plantations: examples from the field. *Oilseeds and Fats Crops and Lipids*, 24(3), Article D305. <https://doi.org/10.1051/ocl/2017024>
- Bot, A., & Benites, J. (2005). *The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production*. Food & Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a0100e/a0100e00.htm#Contents>
- Cámara de Diputados (2011, mayo 04). *Acuerdo por el que se emiten los lineamientos específicos para la operación del proyecto transversal trópico húmedo*. *Diario Oficial de la Federación*. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5188289&fecha=04/05/2011
- Carlson, K. M., Curran, L. M., Ratnasari, D., Pittman, A. M., Soares-Filho, B. S., Asner, G. P., Trigg, S.N., Gaveau, D.A., Lawrence, D., & Rodrigues, H. O. (2012). Committed carbon emissions, deforestation, and community land conversion from oil palm plantation expansion in West Kalimantan, Indonesia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(19), 7559–7564. <https://doi.org/10.1073/pnas.1200452109>

- Carron, M. P., Auriac, Q., Snoeck, D., Villenave, C., Blanchart, E., Ribeyre, F., Marichal, R., Darminto, M., & Caliman, J. P. (2015). Spatial heterogeneity of soil quality around mature oil palms receiving mineral fertilization. *European Journal of Soil Biology*, 66, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2014.11.005>
- Carron, M. P., Pierrat, M., Snoeck, D., Villenave, C., Ribeyre, F., Marichal, R., & Caliman, J. P. (2015). Temporal variability in soil quality after organic residue application in mature oil palm plantations. *Soil Research*, 53(2), 205–215. <https://doi.org/10.1071/SR14249>
- Choo, Y. M., Muhamad, H., Hashim, Z., Subramaniam, V., Puah, C. W., & Tan, Y. (2011). Determination of GHG contributions by subsystems in the oil palm supply chain using the LCA approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(7), 669–681. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0303-9>
- Comte, I., Colin, F., Whalen, J. K., Grünberger, O., & Caliman, J. P. (2012). Agricultural practices in oil palm plantations and their impact on hydrological changes, nutrient fluxes and water quality in Indonesia: a review. *Advances in Agronomy*, 116, 71–124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394277-7.00003-8>
- Coutris, C., Joner, E. J., & Oughton, D. H. 2012. Aging and soil organic matter content affect the fate of silver nanoparticles in soil. *Science of the Total Environment*, 420, 327–333. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.01.027>
- Craven, C. (2011). The Honduran palm oil industry: Employing lessons from Malaysia in the search for economically and environmentally sustainable energy solutions. *Energy Policy*, 39(11), 6943–6950. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.028>
- da Silva Maia, R., Silva Vasconcelos, S., Barbosa Viana-Junior, A., Castellani, D. C., & Ryohei Cato, O. (2021). Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture. *Agroforestry Systems*, 95, 731–740. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00627-5>
- Dhandapani, S., Girkin, N. T., Evers, S., Ritz, K., & Sjögersten, S. (2020). Is Intercropping an Environmentally-Wise Alternative to Established Oil Palm Monoculture in Tropical Peatlands? *Frontiers in Forest and Global Change*, 3, Article 70. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00070>
- Dhandapani, S., Ritz, K., Evers, S., & Sjögersten, S. (2019). Environmental impacts as affected by different oil palm cropping systems in tropical peatlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 276, 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.02.012>
- Dislich, C., Keyel, A. C., Salecker, J., Kisel, Y., Meyer, K. M., Auliya, M., Barnes, A.D., Corre, M.D., Darras, K., Faust, H., Hess, B., Klasen, S., Knohl, A., Kreft, H., Meijide, A., Nurdiansyah, F., Otten, F., Pe'er, G., Steinebach, S., Tarigan, S., Tôle, M. H., Tschardtke, T., & Wiegand, K. (2017). A review of the ecosystem functions in oil palm plantations, using forests as a reference system. *Biological Reviews*, 92(3), 1539–1569. <https://doi.org/10.1111/brv.12295>
- Ebana, R. U. B., Edet, U. O., Ekanemesang, U. M., & Effiong, O. O. (2017). Physicochemical characterization of palm mill oil effluent and bioremediation of impacted soil. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 2(1), 1–9. <https://doi.org/10.9734/AJEE/2017/31221>
- Fitzherbert, E. B., Struebig, M. J., Morel, A., Danielsen, F., Brühl, C. A., Donald, P. F., & Phalan, B. (2008). How will oil palm expansion affect biodiversity? *Trends in Ecology & Evolution*, 23(10), 538–545. <http://doi.org/10.1016/j.tree.2008.06.012>
- Fletes-Ocón, H. B., & Bonanno, A. (2015). Respuestas a la crisis de la globalización neoliberal: intervención del Estado en la producción de aceite de palma en Chiapas, México. *Carta Económica Regional*, 27(116), 5–35. <https://bit.ly/3tW8DQC>

- Formaglio, G., Veldkamp, E., Damris, M., Tjoa, A., & Corre, M. D. (2021). Mulching with pruned fronds promotes the internal soil N cycling and soil fertility in a large-scale oil palm plantation. *Biogeochemistry*, *154*, 63–80. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00798-4>
- Foster, W. A., Snaddon, J. L., Turner, E. C., Fayle, T. M., Cockerill, T. D., Farnon Ellwood, M. D., Broad, G. R., Chung, A. Y. C., Eggleton, P., Vun Khen, C., & Yusah, K. M. (2011). Establishing the evidence base for maintaining biodiversity and ecosystem function in the oil palm landscapes of South East Asia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, *366*(1582), 3277–3291. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0041>
- Furumo, P. R., & Mitchell Aide, T. M. (2017a). Caracterización de la expansión de la palma de aceite para uso comercial en América Latina: cambio en el uso del suelo y comercialización. *Revista Palmas*, *38*(2), 27–48. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12123>
- Furumo, P. R., & Mitchell Aide, T. M. (2017b). Characterizing commercial oil palm expansion in Latin America: land use change and trade. *Environmental Research Letters*, *12*(2), Article 024008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5892>
- Goh, K. J., Mahamooth, T. N., Patrick, N. H. C., Teo, C. B., & Liew, Y. A. (2016). *Managing soil environment & its major impact on oil palm nutrition & productivity in Malaysia*. Sarawak Oil Palm Plantation Owners Association. http://soppoa.org.my/wp-content/uploads/2016/12/MEOA_Topic_2_Dr_Liew.pdf
- Gomes, M. F., Vasconcelos, S. S., Viana-Junior, A. B., Costa, A. N. M., Barros, P. C., Ryohei Kato, O., & Castellani, D. C. (2021). Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. *Land Degradation & Development*, *32*(15), 4313–4326. <https://doi.org/10.1002/ldr.4038>
- Google Earth. (2020). *Áreas de palma de aceite en la localidad el Arenal en el municipio de Acapetahua, Soconusco, Chiapas, México*. <https://earth.google.com>
- Gray, C. L., & Lewis, O. T. (2014). Do riparian forest fragments provide ecosystem services or disservices in surrounding oil palm plantations? *Basic and Applied Ecology*, *15*(8), 693–700. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2014.09.009>
- Gray, C. L., Simmons, B. I., Fayle, T. M., Mann, D. J., & Slade, E. M. (2016). Are riparian forest reserves sources of invertebrate biodiversity spillover and associated ecosystem functions in oil palm landscapes? *Biological Conservation*, *194*, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.12.017>
- Iyakndue, M. L., Brooks, A. A., Unimke, A. A., & Agbo, B. E. (2017). Effects of palm oil mill effluent on soil microflora and fertility in Calabar–Nigeria. *Asian Journal of Biology*, *2*(3), 1–11. <https://doi.org/10.9734/AJOB/2017/33015>
- Khatun, R., Hasan Reza, M. I., Moniruzzaman, M., & Yaakob, Z. (2017). Sustainable oil palm industry: The possibilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 608–619. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.077>
- Kurniawan, S., Corre, M.D., Rahayu Utami, S., & Veldkamp, E. (2018). Soil biochemical properties and nutrient leaching from smallholder oil palm plantations, Sumatra-Indonesia. *AGRIVITA journal Agricultural Science*, *40*(2), 257–266. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v40i2.1723>
- Lahmar, R., & Ruellan, A. (2007). Dégradation des sols et stratégies coopératives en Méditerranée : la pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable. *Cahiers Agricultures*, *16*(4), 318–323. <https://doi.org/10.1684/agr.2007.0119>
- Larson, W. E., & Pierce, F. J. (1991, September 15-21). *Conservation and enhancement of soil quality* [Conference session]. Proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World. Chiang Rai, Thailand.

- Lavelle, P., & Spain, A. V. (2001). *Soil ecology*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/0-306-48162-6>
- Li, Y., Hu, S., Chen, J., Müller, K., Li, Y., Fu, W., Lin, Z. & Wang, H. (2018). Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 18, 546–563. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1906-y>
- Ling Lau, S. Y., Midot, M., Peter Dom, S., Lieng Lo, M., Chin, M. -Y., Sie Jee, M., Lan Yap, M., Chaddy, A., & Melling, L. (2022). Application of ammonium sulfate affects greenhouse gases and microbial diversity of an oil palm plantation on tropical peat. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2022, Article 650. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.2022650>
- Lucey, J. M., Tawatao, N., Senior, M. J., Chey, V. K., Benedick, S., Hamer, K. C., Woodcock, P. Newton, R., Bottrell, R. J., & Hill, J. K. (2014). Tropical forest fragments contribute to species richness in adjacent oil palm plantations. *Biological Conservation*, 169, 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.11.014>
- Manorama, K., Behera, S. K., Suresh, K., Prasad, M. V., Mathur, R. K., & Harinarayana, P. (2021). Mulching and technological interventions avoid land degradation in an intensive oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) production system. *Land Degradation & Development*, 32(13), 3785–3797. <https://doi.org/10.1002/ldr.3886>
- Mardegan, S. F., de Castro, A. F., Noirtin Freitas Chaves, S. S., dos Santos Freitas, R. S., Sena Avelar, M., & Oliveira Teixeira Filho, F. A. (2022). Organic Farming Enhances Soil Carbon and Nitrogen Dynamics in Oil Palm Crops from Southeast Amazon. *Soil Science and Plant Nutrition*, 68(1), 104–113. <https://doi.org/10.1080/00380768.2022.2031285>
- Mercer, E. V., Mercer, T. G., & Sayok, A. K. (2014). Effects of forest conversions to oil palm plantations on freshwater macroinvertebrates: a case study from Sarawak, Malaysia. *Journal of Land Use Science*, 9(3), 260–277. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2013.786149>
- Mesa-Pérez, M. A., Echemendía-Pérez, M., Valdés-Carmenate, R., Sánchez-Elías, S., & Guridi-Izquierdo, F. (2016). La macrofauna edáfica, indicadora de contaminación por metales pesados en suelos ganaderos de Mayabeque, Cuba. *Pastos y Forrajes*, 39(3), 116–124. <https://bit.ly/3GGs0Vn>
- Moebius, B. N., van Es, H. M., Schindelbeck, R. R., Idowu, O. J., Clune, D. J., & Thies, J. E. (2007). Evaluation of laboratory-measured soil properties as indicators of soil physical quality. *Soil science*, 172(11), 895–912. <https://doi.org/10.1097/ss.0b013e318154b520>
- Moreno-Peñaranda, R., Gasparatos, A., Stromberg, P., Suwa, A., Hadi Pandyaswargo, A., & Puppim de Oliveira, J. A. (2015). Sustainable production and consumption of palm oil in Indonesia: What can stakeholder perceptions offer to the debate? *Sustainable Production and Consumption*, 4, 16–35. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2015.10.002>
- Nadeesha, S., & Weerasinghe T. K. (2016). Effects of oil palm cultivation on the properties of soil in some selected areas of Nagoda divisional secretariat in the Galle district, Sri Lanka. *International Journal of Agriculture, Forestry and Plantation*, 3, 114–118.
- Neumann, D., Heuer, A., Hemkemeyer, M., Martens, R., & Tebbe, C. C. (2014). Importance of soil organic matter for the diversity of microorganism involved in the degradation of organic pollutants. *The ISME Journal*, 8, 1289–1300. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.233>
- Nwoko, C.I.A., & Ukiwe, L.N. (2016). Physicochemical characteristics of soils treated with palm oil mill effluent in three localities in Imo State, Nigeria. *Pure and Applied Chemical Sciences*, 4(1), 1–8. <http://doi.org/10.12988/pacs.2016.5127>

- Ocampo-Peñuela, N., Garcia-Ulloa, J., Ghazoul, J., & Etter, A. (2018). Quantifying impacts of oil palm expansion on Colombia's threatened biodiversity. *Biological Conservation*, 224, 117–121. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.05.024>
- Ogedegbe, O. B. A., & Egwuonwu, I. C. (2014). Biodiversity of soil arthropods in Nigerian Institute for oil palm research (NIFOR), Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 18(3), 377–386. <https://www.ajol.info/index.php/jasem/article/view/109849>
- Ogeh, J. S., & Osiomwan, G. E. (2012). Evaluation of the Effect of Oil Palm on some Physical and Chemical Properties of Rhodic paleudults. *Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences*, 20(1), 78–82. <https://www.ajol.info/index.php/njbas/article/view/81592>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). *FAOSTAT, datos*. <http://www.fao.org/faostat/es/#data>
- Paing Tan, N., Keng Wong, M., Yusuyin, Y., Bin Abdu, A., Iwasaki, K., & Tanaka, S. (2014). Soil characteristics in an oil palm field, Central Pahang, Malaysia with special reference to micro sites under different managements and slope positions. *Tropical Agriculture Development*, 58(4), 146–154. <https://doi.org/10.11248/jsta.58.146>
- Pardo Vargas, L. E., Laurance, W. F., Reuben Clements, G., & Edwards, W. (2015). The impacts of oil palm agriculture on Colombia's biodiversity: what we know and still need to know. *Tropical Conservation Science*, 8(3), 828–845. <https://doi.org/10.1177/194008291500800317>
- Pardon, L., Bessou, C., Netelenbos Nelson, P., Dubos, B., Ollivier, J., Marichal, R., Caliman, J. P., & Gabrielle, B. (2016). Key unknowns in nitrogen budget for oil palm plantations. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, Article 20. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0353-2>
- Paterson, R. R. M., & Lima, N. (2017). Climate change affecting oil palm agronomy, and oil palm cultivation increasing climate change, require amelioration. *Ecology and Evolution*, 8(1), 452–461. <https://doi.org/10.1002/ece3.3610>
- Paterson, R. R. M., Kumar, L., Shabani, F., & Lima, N. (2017). World climate suitability projections to 2050 and 2100 for growing oil palm. *The Journal of Agricultural Science*, 155(5), 689–702. <https://doi.org/10.1017/S0021859616000605>
- Pereira Mendes, T., Loureiro Benone, N., & Juen, L. (2019). To what extent can oil palm plantations in the Amazon support assemblages of Odonata larvae? *Insect Conservation and Diversity*, 12(5), 448–458. <https://doi.org/10.1111/icad.12357>
- Pirker, J., Mosnier, A., Kraxner, F., Havlík, P., & Obersteiner, M. (2016). What are the limits to oil palm expansion? *Global Environmental Change*, 40, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.007>
- Potapov, A. M., Klärner, B., Sandmann, D., Widyastuti, R., & Scheu, S. (2019). Linking size spectrum, energy flux and trophic multifunctionality in soil food webs of tropical land-use systems. *Journal of Animal Ecology*, 88(12), 1845–1859. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13027>
- Potapov, A., Schaefer, I., Jochum, M., Widyastuti, R., Eisenhauer, N., & Scheu, S. (2021). Oil palm and rubber expansion facilitates earthworm invasion in Indonesia. *Biological Invasions*, 23, 2783–2795. <https://doi.org/10.1007/s10530-021-02539-y>
- Pulido-Moncada, M., Lozano, Z., Delgado, M., Dumon, M., Van Ranst, E., Lobo, D., Gabriels, D., & Cornelis, W. M. (2018). Using soil organic matter fractions as indicators of soil physical quality. *Soil Use and Management*, 34(2), 187–196. <https://doi.org/10.1111/sum.12414>

- Rahman, N., Giller, K. E., de Neergaard, A., Magid, J., van de Ven, G., & Bech Bruun, T. (2021). The effects of management practices on soil organic carbon stocks of oil palm plantations in Sumatra, Indonesia. *Journal of Environmental Management*, 278, Article 111446. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111446>
- Roundtable on Sustainable Palm Oil. (2018). *Principles and criteria for sustainable palm oil production*. https://rspo.org/library/lib_files/preview/1079
- Sahat, S., Yusop, Z., Askari, M., & Ziegler, A. D. (2016). Estimation of soil erosion rates in oil palm plantation with different land cover. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 136, Article 012086. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/136/1/012086>
- Sahid, I., Hamzah, A., & Aris, P. M. (1992). Effects of paraquat and alachlor on soil microorganisms in peat soil. *Pertanika*, 15(2), 121–125. <https://core.ac.uk/download/pdf/42990255.pdf>
- Salamat, S., Hassan, M., Shirai, Y., Mohd. Hanif, A. H., Norizan, M. S., Mohd Zainudin, M. H., Mustapha, N. A., Mat Isa, M. N., & Abu Bakar, M. F. (2021). Effect of inorganic fertilizer application on soil microbial diversity in an oil palm plantation. *BioResources*, 16(2), 2279–2302. <https://bit.ly/3OydReT>
- Samedani, B., Juraimi, A. S., Rafii, M. Y., Sheikh Awadz, S. A., Anwar, M. P., & Anuar, A. R. (2015). Effect of cover crops on weed suppression in oil palm plantation. *International Journal of Agriculture & Biology*, 17(2), 251–260. http://fspublishers.org/published_papers/41353_..pdf
- Santacruz de León, E. E., Morales Guerrero, S., & Palacio Muñoz, V. E. (2014). Políticas de reconversión productiva de la palma de aceite. In B. Mata García (Ed.), *Palma de aceite en México: Política gubernamental e innovación tecnológica* (pp. 31–65). Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria.
- Santoruflo, L., Van Gestel, C. A., Rocco, A., & Maisto, G. (2012). Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. *Environmental Pollution*, 161, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.09.042>
- Santos da Silva, C. S., Furtado de Mendonça, B. A., Gervasio Pereira, M., Gomes de Araújo, E. J., & Castellani, D. C. (2018). Spatial dependency and correlation of properties of soil cultivated with oil palm, *Elaeis guineensis*, in agroforestry systems in the eastern Brazilian Amazon. *Acta Amazonica*, 48(4), 280–289. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201704423>
- Satriawan, H., Masrul Harahap, E., Rahmawaty & Karim, A. (2015). Effectiveness of soil conservation to erosion control on several land use types. *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)*, 61(2), 61–68. <https://sciendo.com/article/10.1515/agri-2015-0011>
- Savilaakso, S., Garcia, C., Garcia-Ulloa, J., Ghazoul, J., Groom, M., Guariguata, M. R., Laumonier, Y., Nasi, R., Petrokofsky, G., Snaddon, J., & Zrust, M. (2014). Systematic review of effects on biodiversity from oil palm production. *Environmental Evidence*, 3, Article 4. <https://doi.org/10.1186/2047-2382-3-4>
- Sheil, D., Casson, A., Meijaard, E., van Noordwijk, M., Gaskell, J., Sunderland-Groves, J., Wertz, K., & Kanninen, M. (2009). *The impacts and opportunities of oil palm in Southeast Asia: What do we know and what do we need to know?*. Center for International Forestry Research. <https://doi.org/10.17528/cifor/002792>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2019). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Singh, R. P., Embrandiri, A., Ibrahim, M. H., & Esa, N. (2011). Management of biomass residues generated from palm oil mill: Vermicomposting a sustainable option. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(4), 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.005>

- Singh, R. P., Hakimi Ibrahim, M. H., Esa, N., & Iliyana, M. S. (2010). Composting of waste from palm oil mill: a sustainable waste management practice. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 9, 331–344. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9199-2>
- Sivakumar, M. V. K., & Stefanski, R. (2007). Climate and land degradation – An overview. In M. V. K. Sivakumar, & N. Ndiang'ui (Eds.), *Climate and land degradation* (pp. 105–135). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72438-4_6
- Subramaniam, V., Hashim, Z., Kheang Loh, S., & Aziz Astimar, A. (2020). Assessing water footprint for the oil palm supply chain- a cradle to gate study. *Agricultural Water Management*, 237, Article 106184. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106184>
- Tao, H. H., Slade, E. M., Willis, K. J., Caliman, J. P., & Snaddon, J. L. (2016). Effects of soil management practices on soil fauna feeding activity in an Indonesian oil palm plantation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 218, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.012>
- Tao, H. H., Snaddon, J. L., Slade, E. M., Caliman, J. P., Widodo, R. H., & Willis, K. J. (2017). Long-term crop residue application maintains oil palm yield and temporal stability of production. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, Article 33. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0439-5>
- Tao, H. H., Snaddon, J. L., Slade, E. M., Henneron, L., Caliman, J. P., & Willis, K. J. (2018). Application of oil palm empty fruit bunch effects on soil biota and functions: A case study in Sumatra, Indonesia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 256, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.012>
- Teuscher, M., Gérard, A., Brose, U., Buchori, D., Clough, Y., Ehbrecht, M., Hölscher, D., Irawan, B., Sundawati, L., Wollni, M., & Kreft, H. (2016). Experimental biodiversity enrichment in oil-palm-dominated landscapes in Indonesia. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 1538. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01538>
- Tuma, J., Fleiss, S., Eggleton, P., Frouz, J., Klimes, P., Lewis, O. T., Yusah, K. M., & Fayle, T. M. (2019). Logging of rainforest and conversion to oil palm reduces bioturbator diversity but not levels of bioturbation. *Applied Soil Ecology*, 144, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.07.002>
- Vallejo-Quintero, V. E. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1), 83–99. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06>
- Velázquez-González, I. U., Pérez-Hernández, H., Sañudo-Torres, R. R., Ruelas-Ayala, R. D., & Felix-Herrán, J. A. (2013). Impacto del cultivo de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) sobre las propiedades físicas y químicas del suelo en la localidad de la Alianza, Mapastepec, Chiapas. *Revista Forestal Baracoa*, 32(2), 86–91.
- Vijay, V., Pimm, S. L., Jenkins, C. N., & Smith, S. J. (2016). The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity loss. *PLoS ONE*, 11(7), Article e0159668. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159668>
- Vinhal-Freitas, I. C., Corrêa, G. F., Wendling, B., Bobuľská, L., & Ferreira, A. S. (2017). Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. *Ecological Indicators*, 74, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.020>
- Wilcove, D. S., Giam, X., Edwards, D. P., Fisher, B., & Pin Koh, L. (2013). Navjot's nightmare revisited: logging, agriculture, and biodiversity in Southeast Asia. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(9), 531–540. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.04.005>

- Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2017). Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. *European Journal of Agronomy*, 83, 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>
- Zainuddin, N., Fahmi Keni, M., Syed Ibrahim, S. A., & Mohd Masri, M. M. (2022). Effect of integrated biofertilizers with chemical fertilizers on the oil palm growth and soil microbial diversity. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 39, Article 102237. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102237>