

Secuestro del carbono: un reto de la ganadería extensiva frente al cambio climático por gases de efecto invernadero

Carbon sequestration: A challenge of extensive livestock farming in the face of climate change due to greenhouse gases

Laura Alicia Polín-Raygoza¹ , Daniel Rodríguez-Tenorio¹ , Gustavo Campos-Ramírez¹ , Luis Humberto Díaz-García¹ , Daniel García-Cervantes¹ , Alberto Muro-Reyes^{1*} 

¹Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas", Carretera Panamericana Fresnillo-Zacatecas s/n, 98560, Gral. Enrique Estrada, Zacatecas, México.

*Autor para correspondencia: amuro@uaz.edu.mx

Fecha de recepción:

7 de octubre de 2023

Fecha de aceptación:

14 de enero de 2025

Disponible en línea:

27 de marzo de 2025

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



Reconocimiento-

NoComercial-

CompartirIgual 4.0

Internacional

(CC BY-NC-SA 4.0)

RESUMEN

El panorama frente al cambio climático no es nada alentador; ante tal problema ambiental, se debe hacer frente y buscar alternativas para mitigar los principales GEI (Gases de Efecto Invernadero), o al menos, los que tienen mayor impacto en dicho fenómeno. En la presente revisión, se hacen algunas consideraciones sobre la posibilidad de que los pastizales representan un importante reservorio potencial para almacenar carbono; ya que, a nivel mundial se cuenta con grandes extensiones. Sin embargo, este potencial probablemente depende de la manera en que se manejen los pastizales en los sistemas de pastoreo extensivo.

PALABRAS CLAVE

Pastizales, calentamiento global, producción de rumiantes.

ABSTRACT

The outlook regarding climate change is quite concerning. Given the severity of this environmental issue, it is crucial to explore and implement alternatives to mitigate the primary greenhouse gases (GHGs), especially those with the highest impact on this phenomenon. For these reasons, this review discusses the potential of grasslands as significant carbon reservoirs, given their vast global extent. However, this potential likely depends on how grasslands are handled in extensive grazing systems.

KEYWORDS

Grassland, global warming, ruminant production.

INTRODUCCIÓN

Un gran porcentaje de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) son de origen antropogénico, y los sistemas de producción agropecuarios, específicamente los bovinos, contribuyen en forma directa con hasta un ~37 % de las emisiones de metano (CH_4) y óxido nítrico (N_2O). Según la FAO (2018), en el caso del dióxido de carbono (CO_2), el aumento progresivo de las concentraciones en la atmósfera es debido principalmente a la explotación y consumo desmedido de combustibles fósiles como el petróleo, ya que su principal función es para sostener las actividades industriales y de transporte. No obstante, las concentraciones altas en la atmósfera de CO_2 provocan un desequilibrio en el ciclo del carbono, lo que es factor de impacto para el calentamiento global (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2018; Mehmood et al., 2020).

Si bien los rumiantes son considerados como los principales corresponsables del calentamiento global debido a las emisiones de GEI, no se les reconoce que coadyuvan a la eliminación del dióxido de carbono de la atmósfera mediante el consumo de la materia orgánica como forrajes y/o pastizales (Li et al., 2025); los cuales son degradados y transformados mediante su sistema digestivo eficiente en alimentos de valor biológico alto, como lo es la proteína de origen animal. Por esta razón, el secuestro de carbono en pastizales puede llegar a ser una propuesta que ayude a mitigar las tasas actuales de liberación de CO_2 , a consecuencia de las actividades humanas. De ahí que se consideren las especies endémicas de los pastizales naturales, adaptadas naturalmente a la altura, topografía y las condiciones climáticas de cada región, que presentarán mayor viabilidad en la mitigación de los efectos del cambio climático (Mgalula et al., 2021). Cada tipo de pastizal presenta diferente potencial de captura de CO_2 , dado a sus diferencias en la composición botánica principalmente; sin embargo, todos los pastizales contribuyen en la absorción de GEI desde la atmósfera, almacenando el carbono en los tejidos vegetales, en el follaje, tallo y sistema radicular.

Los ecosistemas vegetales como lo son los pastizales C4 son una fuente importante de captación natural para la disminución del bióxido de carbono liberado a la atmósfera, ya que el mecanismo de obten-

ción de la energía es mediante la fotosíntesis, el carbono es fijado en la estructura vegetal donde se mantiene almacenado por extensos periodos de tiempo, siendo esta su principal función basándose en las características de la vegetación y del manejo de la misma (López et al., 2018). El objetivo central del trabajo fue realizar una revisión del papel de los diferentes biomas y de los pastizales como sumideros de carbono, dado que los pastizales cubren aproximadamente el 40 % de la superficie terrestre del mundo (International Energy Agency y United Nations Industrial Development Organization [IEA y UNIDO], 2011; Laban et al., 2018; Lal, 2011; Millennium Ecosystem Assessment [MEA], 2005).

Cambio climático

El cambio climático es un hecho que aqueja desde hace décadas, y ha sido el resultado en gran medida por las perturbaciones del ser humano, como la demanda global de recursos, el crecimiento desmedido de la población y el uso de las energías derivadas del petróleo, así como un desarrollo de las tecnologías (Miranda, 2018). La evidencia científica documenta el cambio climático global, con aumentos en las temperaturas globales del aire y del mar, derretimiento de los glaciares y, por lo tanto, aumento del nivel medio del mar. Así, estos fenómenos y eventos se conocen colectivamente como cambio climático (CC).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) citó el comportamiento antropogénico como su origen dominante e incluso confirmó que vivimos en una nueva época geológica llamada Antropoceno (Equihua et al., 2016). El cambio climático global es uno de los principales problemas ambientales que enfrenta la sociedad mundial y que identifica principalmente el incremento de la temperatura promedio en el planeta, atribuible a acciones antropogénicas, con la producción desmesurada de GEI, sobre todo CO_2 , CH_4 y N_2O . En esta dinámica, el suelo como almacén de carbono orgánico juega un papel de suma importancia y es clave para su reducción. Este efecto de calentamiento continuará en ascenso en las próximas décadas y de ahí la preocupación mundial por este fenómeno (Hansen et al., 2023; Masson-Delmotte et al., 2019). Por otra parte, los humanos también liberan cantidades importantes de CO_2 por procesos metabólicos y se ha

estimado que una persona adulta genera un kilo de CO_2 al día; también los suelos agrícolas generan grandes cantidades, originado por los microorganismos en estos suelos, pero con variaciones de acuerdo al tipo de cultivo (Blasco y Burbano, 2015).

Las investigaciones demuestran que la concentración de CO_2 pasó de 280 a más de 360 mg kg^{-1} en los últimos 200 años; el 50 % de este aumento, se registró desde 1950, con una tasa de 0.08 mg kg^{-1} por año (Möller y Oelβne, 2019). Esto se atribuyó a que la incorporación de CO_2 en la atmósfera entre los últimos 20-25 años, tuvo como origen en un 75 %, la quema de combustibles fósiles y el 25 % restante, originado por los cambios en el uso de suelo, particularmente en la deforestación (Burbano-Orjuela, 2018).

En este escenario, se prevé que la temperatura media de la superficie de la Tierra aumente entre 1.4 y 5.8 °C durante el siglo XXI (Hansen et al., 2023; Lal, 2003). Los patrones regionales de temperatura, precipitaciones y frecuencia de fenómenos extremos como sequías, inundaciones, olas de calor y heladas seguirán cambiando; lo que modificará el equilibrio energético del sistema climático. El calentamiento global es el resultado del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que promueve la retención del calor irradiado desde la superficie de la Tierra. Cabe señalar también que la atmósfera es el reservorio más pequeño, pero el más dinámico del ciclo del carbono (Caviglia et al., 2016; Rüginitz, 2009).

Entre estos gases de efecto invernadero, las emisiones de CO_2 ocupan el primer lugar; sin embargo, el potencial de calentamiento global del CH_4 y el N_2O es 21 veces y 310 veces mayor que el del dióxido de carbono, respectivamente (Jimena de Dios, 2018). Las fuentes de emisiones de CH_4 surgen en parte por la fermentación digestiva en la mayoría de los organismos, pero principalmente de los rumiantes, y de la descomposición anaeróbica del carbono orgánico en suelos inundados como en los arrozales (Caviglia et al., 2016). La principal fuente de emisiones de N_2O a la atmósfera es el proceso de desnitrificación del suelo (Verhulst et al., 2015).

El incremento de las emisiones de GEI y por consiguiente al calentamiento global, repercuten negativamente en muchas actividades socioeconómicas; pero un efecto que destaca, dado a connotaciones en la supervivencia de las personas, es que se compromete la

seguridad alimentaria principalmente por merma del rendimiento de cultivos, especialmente en países en vías de desarrollo (Paolini, 2023). Aun y con las dificultades propias del CC, se han identificado opciones para disminuir las emisiones de GEI: primero, disminución de las emisiones antropogénicas; y segundo, creación y mejora de los sumideros de carbono en la biosfera. Con relación a esta última, la conservación de bosques y el establecimiento de sistemas agroforestales (SAF), son las más importantes que conjuntamente remueven carbono atmosférico, fijándolo y almacenándolo por buenos periodos de tiempo. Estos procedimientos o estrategias podrán contribuir a un almacenamiento de carbono más prolongado, debido a la fijación de este en la materia orgánica del suelo (MOS), haciendo del suelo el más grande sumidero de carbono en la naturaleza (Bossio et al., 2020; Gallardo, 2002).

Efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero actúan como una capa que no permite que regrese la radiación que habría sido reflejada por la Tierra. Sin embargo, el efecto invernadero es un fenómeno natural clave para la vida en la Tierra, ya que evita que el planeta se enfríe demasiado por la noche, garantizando así la vida de muchos organismos, incluido el ser humano. Parte del problema del efecto invernadero es que sus efectos se ven exacerbados por la sobreproducción de gases de efecto invernadero en beneficio exclusivo de la humanidad (Food and Agriculture Organization of the United States y United Nations Environment Programme [FAO y UNEP], 2020).

El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y el calentamiento global, han impactado negativamente en muchas actividades de interés socioeconómico; aunque este impacto se destaca por sus implicaciones para la existencia humana, ya que la seguridad alimentaria se ve comprometida por la reducción de los rendimientos de los cultivos, de manera más significativa. El más importante es el impacto en los países en desarrollo (Paolini, 2023).

Principales gases de efecto invernadero

El incremento en la concentración de GEI atmosféricos, como CH_4 , CO_2 y N_2O , ha generado una preocupa-

ción generalizada acerca de las actividades humanas que contribuyen en gran medida al cambio ambiental global (Aneja et al., 2019; Raihan et al., 2022). Entre 1959 y 2018, la concentración anual media mundial de CO₂ aumentó de 315.97 partes por millón (ppm) a 408.52 ppm (National Oceanic and Atmospheric Administration, s.f.); mientras que el CH₄ aumentó de 719.01 partes por mil millones (ppb) en 1750 hasta 1,857.62 en 2018 (European Environment Agency [EEA], 2019) y el N₂O aumentó de 270 ppb en 1750 a 328.51 en 2016 (EEA, 2019).

Los estudios muestran que actividades humanas como la deforestación, la agricultura, la ganadería, cambio de uso de la tierra y los desarrollos industriales, han contribuido a los aumentos observados en las concentraciones de GEI (MacCarthy et al., 2018; Metz et al., 2007; Raihan et al., 2022; Stocker et al., 2013). Durante el último siglo han dado como resultado un aumento de la temperatura media mundial del aire en la superficie y un cambio climático. Estos cambios tienen una progresión de impactos potenciales que incluyen eventos climáticos extremos, aumento del nivel del mar y cambios en los ciclos biogeoquímicos y la productividad primaria neta (Yang et al., 2022). Si bien se prevé que el cambio climático se agrave (Henry et al., 2024), es necesario implementar prácticas que puedan ayudar a mejorar los sumideros e intensificar su secuestro de la atmósfera para mitigar el cambio climático.

Calentamiento global

El calentamiento global está definido como el aumento de la temperatura media en la superficie terrestre a causa del aumento de la concentración de GEI, tales como CO₂, clorofluorocarbonos (CFC), CH₄, ozono, y óxido nitroso (N₂O) (Venkataramanan, 2011). En 1958, Charles Keeling comenzó a medir la concentración de CO₂ en la atmósfera (Skrable et al., 2022), posteriormente Molina y Rowland (1974) explicaron cómo las moléculas de CFC (Clorofluorocarbonos) destruyen el ozono en la estratosfera, y Zhang et al. (2020), propusieron que el nivel de CO₂ en la atmósfera había aumentado de 3,000 a 3,500 ppm.

El impacto de las actividades antropogénicas ha sido mayor y constante durante las últimas décadas, pero el CO₂ es el que ha mostrado un mayor incremento debido a la quema de combustibles fósiles (Zandalinas

et al., 2021). En breve, la acumulación de GEI en la atmósfera atrapa la radiación infrarroja y genera el calentamiento del planeta, causando aumento continuo de las temperaturas globales de la superficie y océanos (Dilmore y Zhang, 2018; Oktyabrskiy, 2016; Zandalinas et al., 2021).

Se sabe que el clima de la tierra ha sido cambiante en el pasado por causas naturales, dado por la variación en la radiación solar, efecto conocido como ciclo de Milankovitch, y cambios también dados por erupciones volcánicas. El ciclo Milankovitch ocurre cada 10,000 años, con periodos de enfriamiento y calentamiento global natural debidos a tres causas: la excentricidad, la oblicuidad y la precesión. Aunque los eventos naturales todavía están actuando, estos se ven acentuados por las actividades antropogénicas (Cheng et al., 2022; Martínez et al., 2017).

Vapor de agua: El vapor de agua es el gas más abundante en la atmósfera y es el elemento más importante que incide en el calentamiento global, con una participación de dos tercios sobre el calentamiento, aun así, la atmósfera conserva un equilibrio entre la temperatura y la concentración de vapor de agua dado por su ciclo de vida corto; sin embargo, si la temperatura continúa en ascenso, el equilibrio puede perderse incidiendo en el calentamiento global. El problema es que el vapor de agua duplica el efecto del CO₂ en la atmósfera (Kolle et al., 2021; Rieebek, 2010).

Óxido nitroso: La quema de combustibles fósiles, la agricultura, las industrias y las aguas residuales, son el origen de aproximadamente el 40 % de las emisiones totales de N₂O, éste permanece aproximadamente 114 años en la atmósfera y es eliminado como parte del ciclo del nitrógeno, además, tiene la capacidad de calentar la atmósfera casi 300 veces más que el CO₂, pero su concentración es menor (Anderson et al., 2010; Jackson et al., 2020).

Metano: Es el segundo gas más importante de efecto invernadero contribuyente al calentamiento global, además, sus emisiones se duplicaron en la segunda mitad del siglo XX (Zhang et al., 2023). Se reporta que al menos el 60 % de las emisiones de metano provienen de las actividades humanas. El metano antropogénico puede liberarse a la atmósfera durante la extracción, producción, transporte, refinación y distribución de gas natural (el metano es un componente principal). Además, cantidades significativas de

metano provienen de la ganadería, agricultura, desechos humanos y vertederos (Environmental Protection Agency, 2021). La vida media del metano en la atmósfera es mayor, en comparación con el CO_2 ; sin embargo, el metano es más eficiente en mantener la radiación que el CO_2 (Hernández, 2010). La concentración de dióxido de carbono es aproximadamente 200 veces más que el metano y también la vida útil del dióxido de carbono es mucho más grande que la del metano atmosférico (Jackson et al., 2020; Zimnoch et al., 2019), la vida media del metano en la atmósfera es de 12 años (Jackson et al., 2021).

Dióxido de Carbono: Desafortunadamente, las actividades humanas son dependientes de combustibles fósiles para la producción de energía, así que la utilización de estos produce cantidades diferentes de CO_2 , vapor de agua, y N_2O , dependiendo del tipo de combustible fósil (Molina et al., 2017). Carbón, gas natural y petróleo, son los combustibles fósiles más comunes, y el 45 % de las emisiones de CO_2 provienen de la quema de carbón, el 35 % del petróleo, y el 20 % de la quema de gas natural (International Energy Agency, 2017). Un problema importante del CO_2 es que éste puede durar entre 5 a 200 años en la atmósfera (Jackson et al., 2021), esto dependiendo de la humedad y temperatura en el aire (Patel y Kuttippurath, 2023).

Ciclo del carbono: Consiste en el flujo de éste mediante los procesos físicos, químicos y biológicos entre los diferentes reservorios del sistema Tierra. Los almacenes del carbono son la atmósfera, la hidrosfera, la biosfera, la rizosfera y la litosfera; la capacidad de almacenamiento en estos es muy variable, así como la tasa y el tiempo de intercambio entre estos almacenes. Así pues, se pueden considerar distintos ciclos: ciclo del carbono de corto y largo plazo (Burbano Orjuela, 2018).

Ciclo de carbono a largo plazo: Este ciclo ocurre cuando el material de los organismos vivos se entierra a gran profundidad o se hunde en el fondo del océano para formar rocas sedimentarias. Principalmente la actividad volcánica, y más recientemente la ignición de combustibles fósiles, lo devuelve a la atmósfera. La formación de combustibles fósiles debe considerarse como un proceso geológico lento, pero la liberación antropogénica del carbono contenido en estos fósiles ocurre en una escala de tiempo extremadamente rápida (Castro et al., 2017).

Ciclo de carbono a corto plazo: Es un intercambio rápido entre organismos, donde básicamente el carbono se une al oxígeno del aire en forma de CO_2 , que puede disolverse en agua al reaccionar con moléculas de H_2O y producir bicarbonato (HCO_3^-); además, la fotosíntesis de las plantas terrestres, bacterias y algas, convierte el dióxido de carbono o bicarbonato en moléculas orgánicas (Ray et al., 2022). Eventualmente, estas moléculas se mueven a través de la cadena alimentaria, donde la respiración celular convierte el carbono orgánico nuevamente en gas de dióxido de carbono (Ray et al., 2022; Rüginitz et al., 2012).

Captura de carbono

Las centrales eléctricas, refinerías de petróleo, la producción de amoníaco, óxido de etileno, cemento, hierro y acero son las principales fuentes industriales de CO_2 (Isella y Manca, 2022). Existe una amplia variedad de sistemas de captura de CO_2 , dependiendo con la industria específica. Las plantas de energía y las refinerías de petróleo son las más avanzadas en la implementación de sistemas de captura de CO_2 a gran escala, pero la industria del cemento, hierro y acero presentan más retrasos, los sistemas de captura por diferentes métodos se dan en la precombustión, poscombustión, y mediante oxido-combustión (IEA y UNIDO, 2011).

El secuestro de carbono también es de interés en la agricultura y ganadería, aunque el potencial de captura en pastizales es inferior al de tierras agrícolas y bosques, las investigaciones indican que aunque la captura es modesta en los pastizales, hay contribución en el ciclo global del carbono (Henry et al., 2024).

Carbono en vegetación: Es la suma de la biomasa aérea y la biomasa de las raíces, se entiende por biomasa aérea el tronco, el follaje y los brotes; mientras que el carbono contenido en las raíces se determina como biomasa de raíces (López et al., 2018). La vegetación absorbe carbono atmosférico a través de la fotosíntesis, pero los suelos también participan en el ciclo y almacenamiento de carbono en estos sistemas (Briones et al., 2020).

Carbono en descomposición: Este carbono se encuentra al descomponer la materia orgánica. Se produce cuando se depositan en el suelo estructuras aéreas de plantas como hojas, ramas o troncos, así como diversos animales en descomposición (López et

al., 2018; Trinidad-Santos, 2016). Sin embargo, no solo es carbono, sino también nitrógeno, fósforo, hidrógeno, oxígeno, azufre, entre otros (Trinidad-Santos, 2016).

Carbono en el suelo: Es el carbono contenido en las capas que componen el suelo, procedente del establecimiento de organismos vegetales que provocan la rotura de la roca madre, al acumularse y compactarse estas capas, almacenan una cierta cantidad de carbono que se perderá por aumentar la continuidad del proceso de formación del suelo (López et al., 2018). La acumulación de carbono orgánico en el suelo (COS) es un proceso importante para mitigar los efectos del cambio climático, ya que el suelo actúa como un reservorio estable de carbono además de ser un sumidero (Hernández-Guzmán et al., 2019; Lal, 1997).

El carbono orgánico del suelo está relacionado con la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y con la cantidad y disponibilidad de nutrientes en el suelo; al amortiguarlo para cambiar el pH, mejorar la solubilidad de los nutrientes, proporcionar coloides con alta capacidad de intercambio catiónico, también beneficia la distribución de porosidad del suelo (Martínez et al., 2008).

Sumideros de carbono terrestres

Se considera sumidero de carbono a un sistema o proceso que recupera o extrae CO₂ de la atmósfera y lo almacena. La mitigación de GEI debe enfocarse principalmente en la reducción de emisiones, en este caso de la ganadería, el cambio de uso del suelo, la expansión agrícola o la deforestación (Ahmed et al., 2025; Sanz-Cobena et al., 2017). Además, la mitigación puede aprovechar el hecho de que el crecimiento de las plantas y árboles requiere de CO₂ que se toma de la atmósfera mediante el proceso de fotosíntesis. Estas plantas y árboles almacenarán carbono en todas sus estructuras, por esto es vital favorecer la capacidad de los sumideros naturales como los bosques (Chen et al., 2018; Food and Agriculture Organization of the United States [FAO], 2020) y los pastizales (Henry et al., 2024). Los bosques forman el sumidero de carbono global más importante porque los árboles almacenan carbono en tejidos leñosos que retrasan la descomposición y reducen la liberación de CO₂ a través de la respiración (Keenan y Williams, 2018). La proporción y distribu-

ción espacial de los bosques incluye el 45 % tropical, el 27 % boreal, el 16 % templado y el 11 % subtropical (FAO y UNEP, 2020).

Dada su cobertura de 4,060 millones de ha, alrededor del 31 % de la superficie terrestre total (FAO, 2020), si están bien gestionados, los bosques tienen un enorme potencial para secuestrar carbono en la biomasa leñosa y los suelos (Pugh et al., 2019). Las estimaciones actuales basadas en los datos de FAO (2020), muestran que los bosques actuaron globalmente como un sumidero neto de carbono (-0.6 Gt CO₂ año⁻¹) en el período 2011-2015 (FAO, 2020); ya que estos contribuyen a una gran fracción del sumidero global de CO₂ terrestre a medida que experimentan un mayor crecimiento a partir de mejores condiciones ambientales y de recursos (Keenan y Williams, 2018).

Los pastizales también son un importante sumidero de carbono (Derner et al., 2017; Henry et al., 2024). A nivel mundial, el 41.3 % de la superficie terrestre del mundo, está clasificada como pastizal (Laban et al., 2018; Lal, 2011; MEA, 2005; Squires et al., 2018). La vegetación de los pastizales consiste en pastos, plantas parecidas a pastos, hierbas, arbustos o árboles que se pastan o tienen el potencial de ser pastoreados o ramoneados y que se utilizan como un ecosistema natural para los sistemas de pastoreo extensivos, además de conservar la vida silvestre (Ibarra et al., 2018; Liniger y Studer, 2019). La evaluación de los ecosistemas del milenio (MEA, 2005) incluye pastizales con tierras secas porque la ocurrencia de subtipos de vegetación está influenciada por la cantidad de precipitación. Con base en la aridez, los pastizales pueden clasificarse en hiperáridos, áridos, semiáridos, subhúmedos secos y húmedos, con precipitaciones que van desde menos de 200 mm en áreas hiperáridas hasta más de 1,500 mm en áreas húmedas.

Estos ecosistemas sustentan los medios de subsistencia de millones de personas en todo el mundo y son importantes proveedores de otros servicios (Godde et al., 2020). Debido a su extensión global, si se gestionan adecuadamente, los pastizales tienen el potencial de secuestrar carbono en los arbustos y almacenar carbono orgánico e inorgánico en los suelos (Derner et al., 2017; Metz et al., 2007; White et al., 2000). Algunos estudios muestran que los pastizales pueden almacenar de un 10-30 % del carbono orgánico del suelo (COS)

global (Laban et al., 2018; Lal, 2004; Henry et al., 2024) y secuestrar hasta 179,623 Mg de CO₂ de la atmósfera por año (Lal, 2011; Henry et al., 2024).

Captura de carbono en ecosistemas

El carbono en ecosistemas forestales: Es muy reconocida la importancia de los bosques como mitigadores del cambio climático, al absorber el dióxido de carbono atmosférico a través de la fotosíntesis, el cual en parte acumulan en su biomasa (Potter, 2018). Los bosques forman el sumidero de carbono global más importante, los árboles almacenan carbono en tejidos leñosos, así lentifican su descomposición y por lo tanto, la liberación de CO₂ (Keenan y Williams, 2018).

Los bosques secos a nivel global constituyen una parte importante para el secuestro del carbono (Chávez-Suazo, 2018), aunque hay menos estudios al respecto de este tema en bosques tropicales (Luna et al., 2021), se ha reportado a estos como un importante y persistente sumidero de CO₂ atmosférico, almacenando el 55 % del carbono terrestre mundial (Chen et al., 2018). Sin embargo, está claro el papel que desempeñan en general en la captura de carbono los ecosistemas forestales, beneficiando al ambiente natural y contribuyendo a la mitigación del calentamiento global, al fungir como importantes sumideros de carbono terrestre (Dai et al., 2015). Por lo tanto, si se generan cambios importantes en el ecosistema de los bosques, como cambio y uso de suelo para agricultura, tala con diferentes fines, se disminuye la captura de CO₂ (Carvajal-Agudelo y Andrade, 2020).

La biomasa vegetal se encarga de fijar el carbono por medio de la fotosíntesis, y se considera como carbono almacenado cuando se integra a alguna de las estructuras de las plantas hasta llegar al suelo (Aranda-Arguello et al., 2018), por esto mismo, es importante la vigilancia y seguimiento de los inventarios forestales (Sainge et al., 2020).

Secuestro de carbono en los pastizales: Se prevé que el cambio climático seguirá agravándose (Henry et al., 2024). En el área agropecuaria, la mitigación de los gases de efecto invernadero se enfoca en reducir las emisiones de la ganadería y el cambio de uso de la tierra (Ahmed et al., 2025; Llonch et al., 2017; Sanz-Cobena et al., 2017). También es importante en el área agropecuaria mejorar la capacidad de los sumideros

naturales como los bosques (Chen et al., 2018; FAO, 2020) y los pastizales (Henry et al., 2024).

Como se ha mencionado anteriormente, además de los bosques, los pastizales también son un importante sumidero de carbono (Derner et al., 2017; Henry et al., 2024). A nivel mundial, el 41.3 % de la superficie terrestre del mundo está clasificada como pastizales (Laban et al., 2018). La vegetación de los pastizales se conforma de pastos, hierbas, arbustos o árboles susceptibles de pastoreo o con potencial de ser pastoreados o carcomidos (Ibarra et al., 2018; Liniger y Studer, 2019). La Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005) incluye pastizales con tierras secas, dado a la presencia de subtipos de vegetación en estas áreas. Estos ecosistemas sustentan los medios de vida de millones de personas en todo el mundo, además de ser proveedores de otros servicios (Godde et al., 2020). Con base en la extensión global de los pastizales y manejo adecuado, tienen un potencial secuestrante de carbono, con la posibilidad de almacenarlo como orgánico e inorgánico en los suelos (Derner et al., 2017; Metz et al., 2007; White et al., 2000). Estudios han reportado que los pastizales pueden almacenar de un 10-30 % del carbono orgánico del suelo (COS) global (Lal, 2004, 2011; Henry et al., 2024). Las especies que tienden a ser más eficientes en cuanto a la captación de CO₂ bajo condiciones de estrés son las C4 respecto a las C3 (Salesse-Smith et al., 2025; Reich et al., 2018).

CONCLUSIONES

El cambio climático global es un hecho y una realidad y representa uno de los mayores problemas y desafíos ambientales en la actualidad. Los actores relevantes deben continuar evaluando e implementando estrategias o alternativas encaminadas a mitigar y/o en algunos casos, abordar los efectos de los GEI. Ante este problema mundial, los suelos y sus componentes bio-orgánicos, pueden ayudar a mitigar el cambio climático; siempre y cuando, se implementen mejores prácticas de uso de suelo que apunten a retener el carbono orgánico en ellos, ya que las buenas prácticas de manejo ayudan a mantener el equilibrio, facilitando la captura de carbono antes de que escape del sistema del suelo en forma de GEI. Las acciones para mitigar el cambio climático incluyen el desarrollo de modelos

simples y especializados que nos permitan cuantificar el carbono secuestrado o almacenado en pastos y suelos aptos para tierras secas con fines de información y manejo adecuado del pastoreo y conservación de pastizales, es decir, retención de carbono en la biomasa terrestre. Además de garantizar la seguridad alimentaria de sus poblaciones, por lo que se necesitan decisiones sociales y políticas para apoyar la conservación global del carbono del suelo, la sostenibilidad del suelo y la función ambiental.

LITERATURA CITADA

- Ahmed, N., Xinagyu, G., Alnafissa, M., Ali, A., & Ullah, H. (2025). Linear and non-linear impact of key agricultural components on greenhouse gas emissions. *Scientific Reports*, 15(1), 5314.
- Anderson, B., Barlett, K., Froking, S., Hayhoe, K., Jenkins, J., & Salas, W. (2010). *Methane and nitrous oxide emissions from natural sources*. Environmental Protection Agency.
- Aneja, V. P., Schlesinger, W. H., Li, Q., Nahas, A., & Battye, W. H. (2019). Characterization of atmospheric nitrous oxide emissions from global agricultural soils. *SN Applied Sciences*, 1, 1662. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1688-5>
- Aranda-Arguello, R., Ley-de-Coss, A., Arce-Espino, C., Pinto-Ruiz, R., Guevera-Hernández, F., & Raj-Aryal, D. (2018). Captura de carbono en la biomasa aérea de la palma de aceite en Chiapas, México. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 629-637. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.32076>
- Blasco, M., & Burbano, H. (2015). *La vida en el suelo: Notas sobre su bioquímica y microbiología*. Impresos la Castellana of Pasto.
- Bossio, D. A., Cook-Patton, S. C., Ellis, P. W., Fargione, J., Sanderman, J., Smith, P., Wood, S., Zomer, R. J., von Unger, M., Emmer, I. M., & Griscom, B. W. (2020). The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*, 3(5), 391-398. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>
- Briones, O., Flores-Martínez, A., Castellanos, A. E., Perroni, Y., & Hernández-Guerrero, A. (2020). Población, servicios ecosistémicos, ciclo del carbono y políticas públicas en las zonas secas de México. *Elementos para Políticas Públicas*, 4(2), 79-98.
- Burbano-Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(1), 82-96. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Carvajal-Agudelo, B. N., & Andrade, H. J. (2020). Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia. *Orinoquia*, 24(1), 13-22. <https://doi.org/10.22579/20112629.587>
- Castro, G., Hernández, J. M., Lara, J. R., Sosa, R., & Cepeda, J. A. (2017). Importancia del intercambio y reservorios de carbono en los mares y costas mexicanas. *Elementos para Políticas Públicas*, 1(1), 13-24.
- Caviglia, O. P., Wingeyer, A. B., & Novelli, L. E. (2016). El rol de los suelos agrícolas frente al cambio climático. *Serie de Extensión INTA Paraná*, 78(1), 27-32.
- Chávez-Suazo, J. P. (2018). *Captura y almacenamiento de carbono de los bosques estacionalmente secos de la costa norte (Lambayeque), como mitigación frente al cambio climático*. [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Cheng, H., Li, H., Sha, L., Sinha, A., Shi, Z., Yin, Q., Lu, Z., Zhao, D., Cai, Y., Hu, Y., Hao, Q., Tian, J., Kathayat, G., Dong, X., Zhao, J., & Zhang, H. (2022). Milankovitch theory and monsoon. *The Innovation*, 3(6), 100338. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2022.100338>
- Chen, S., Wang, W., Xu, W., Wang, Y., Wan, H., Chen, D., Tang, Z., Tang, X., Zhou, G., Xie, Z., Zhou, D., Shangguane, Z., Huang, J., He, J.-S., Wang, Y., Shengh, J., Tang, L., Li, X., Dong, M., Wu, Y., Wang, Q., Wang, Z., Wu, J., Chapin, F. S., & Bai, Y. (2018). Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(16), 4027-4032. <https://doi.org/10.1073/pnas.1700298114>
- Dai, Z., Johnson, K. D., Birdsey, R. A., Hernandez-Stefanoni, J. L., & Dupuy, J. M. (2015). Assessing the effect of climate change on carbon sequestration in a Mexican dry forest in the Yucatan Peninsula. *Ecological Complexity*, 24, 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2015.09.004>
- Derner, J. D., Hunt, L., Euclides Filho, K., Ritten, J., Capper, J., & Han, G. (2017). Livestock production systems. En Briske, D. D. (Ed.), *Rangeland systems processes, management and challenges* (pp. 347-372). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46709-2_10
- Dilmore, R., & Zhang, L. (2018). Greenhouse gases and their role in climate change. En Romanov, V. (Ed.), *Greenhouse gases and clay minerals: Enlightening*

- down-to-earth road map to basic science of clay-greenhouse gas interfaces (pp. 15-32). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12661-6_10
- Equihua Z., M., Hernández H., A., Pérez M., O., Benítez B., G., & Ibañez B., S. (2016). Cambio global: el Antropoceno. *Ciencia Ergo Sum*, 23(1), 67-75.
- European Environment Agency. (s.f.). *Global annual averaged atmospheric concentration of nitrou (N_{20}). From 1750-2016, measured in parts per billion (ppb)*. Recuperado el Accesado en mayo de 2022 de: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-6/assessment>
- Environmental Protection Agency. (s.f.). *Overview of Greenhouse Gases*. Recuperado el 28 de octubre 2021 de: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#methane>
- Food and Agriculture Organization of the United States. 2020. *Global forest resources assessment 2020 - Key findings*. Food and Agriculture Organization of the United States.
- Food and Agriculture Organization of the United States, & United Nations Environment Programme. 2020. *The state of the world's forests 2020. Forests, biodiversity and people*. Food and Agriculture Organization of the United States. <http://doi.org/10.4060/ca8642en>
- Godde, C. M., Boone, R. B., Ash, A. J., Waha, K., Sloat, L. L., Thornton, P. K., & Herrero, M. (2020). Global rangeland production systems and livelihoods at threat under climate change and variability. *Environmental Research Letters*, 15(4), 044021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7395>
- Hansen, J. E., Sato, M., Simons, L., Nazarenko, L. S., Sangha, I., Kharecha, P., Zachos, J. C., von Schuckmann, K., Loeb, N. G., Osman, M. B., Jin, Q., Tselioudis, G., Jeong, E., Lacis, A., Ruedy, R., Russell, G., Cao, J., & Li, J. (2023). Global warming in the pipeline. *Oxford Open Climate Change*, 3(1), kgad008. <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad008>
- Henry, B., Allen, D., Badgery, W., Bray, S., Carter, J., Dalal, R. C., Hall, W., Harrison, M. T., McDonald, S. E., & McMillan, H. (2024). Soil carbon sequestration in rangelands: a critical review of the impacts of major management strategies. *The Rangeland Journal*, 46(3), 1-27 <https://doi.org/10.1071/RJ24005>
- Hernández, M. E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 139-147.
- Hernández-Guzmán, R., Ruiz-Luna, A., & González, C. (2019). Assessing and modeling the impact of land use and changes in land cover related to carbon storage in a western basin in Mexico. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, 318-327. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.12.005>
- Ibarra F., F., Martín R., M., Moreno M., S., Ibarra M., F., & Retes L., R. (2018). Cambios de vegetación y costos asociados con el continuo sobrepastoreo del ganado en el pastizal mediano abierto de Cananea, Sonora, México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 42, 855-866.
- International Energy Agency. (2017). *CO₂ emissions from fuel combustion 2017 - Highlights*. International Energy Agency.
- International Energy Agency, & United Nations Industrial Development Organization. (2011). *Technology road-map. Carbon capture and storage in industrial applications*. International Energy Agency/United Nations Industrial Development Organization.
- Isella, A., & Manca, D. (2022). GHG emissions by (Petro) chemical processes and decarbonization priorities—A review. *Energies*, 15(20), 7560. <https://doi.org/10.3390/en15207560>
- Jackson, R. B., Saunio, M., Bousquet, P., Canadell, J. G., Poulter, B., Stavert, A. R., Bergamaschi, P., Niwa, Y., Segers, A., & Tsuruta, A. (2020). Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environmental Research Letters*, 15(7), 071002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>
- Jackson, R. B., Abernethy, S., Canadell, J. G., Cargnello, M., Davis, S. J., Féron, S., Fuss, S., Heyer, A. J., Hong, C., Jones, C. D., Matthews, H. D., O'Connor, F. M., Pisciotta, M., Rhoda, H. M., de Richter, R., Solomon, E. I., Wilcox, J. L., & Zickfeld, K. (2021). Atmospheric methane removal: a research agenda. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379, 20200454. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0454>
- Jimena de D., P. C. (2018). *Efecto de diferentes estrategias de fertilización en la emisión de gases de efecto invernadero, rendimiento y la calidad panadera en un cultivo de trigo (Triticum aestivum L.)*. [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Keenan, T. F., & Williams, C. A. (2018). The terrestrial carbon sink. *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 219-243. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030204>

- Kolle, J. M., Fayaz, M., & Sayari, A. (2021). Understanding the effect of water on CO₂ adsorption. *Chemical Reviews*, 121(13), 7280-7345. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00762>
- Laban, P., Metternicht, G., & Davies, J. (2018). *Soil biodiversity and soil organic carbon: keeping drylands alive*. International Union for Conservation of Nature.
- Lal, R. (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil and Tillage Research*, 43(1-2), 81-107. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00036-6)
- Lal, R. (2003). El cambio climático global y la dinámica del carbono en el suelo. *IAI NewsLetter*, 32, 28-30.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Lal, R. (2011). Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. *Food Policy*, 36(Suppl. 1), S33-S39.
- Llonch, P., Haskell, M. J., Dewhurst, R. J., & Turner, S. P. (2017). Current available strategies to mitigate greenhouse gas emissions in livestock systems: an animal welfare perspective. *Animal*, 11(2), 274-284. <https://doi.org/10.1017/S1751731116001440>
- Li, Y., Buckeridge, K., Wang, B., Huang, Q., Liu, C., Chen, Y., Rocha, A. V. S., & An, S. (2025). Grazing exclusion enhanced the capability of soil microorganisms to access photosynthetic carbon in Loess Plateau grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 109743. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109743>
- Liniger, H., & Studer, R. M. (2019). *Sustainable rangeland management in Sub-Saharan Africa. Guidelines to good practice*. World Bank Group/ Centre for Development and Environment/University of Bern.
- López, H. G., Vaides, E. E., & Alvarado, A. (2018). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 42(1), 137-153. <https://doi.org/10.15517/rac.v42i1.32201>
- Luna F., A. D., Sánchez A., A. W., Maza M., J. E., & Castillo F., J. E. (2021). Biomasa forestal y captura de carbono en el bosque seco de la Reserva Ecológica Arenillas. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(2), 140-146.
- MacCarthy, D. S., Zougmore, R. B., Akponikpè, P. B. I., Koomson, E., Savadogo, P., & Adiku, S. G. K. (2018). Assessment of greenhouse gas emissions from different land-use systems: A case study of CO₂ in the southern zone of Ghana. *Applied and Environmental Soil Science*, 2018, 1057242. <https://doi.org/10.1155/2018/1057242>
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. <http://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Martínez, M., Lorenzo, E., & Álvarez, A. (2017). Los ciclos de Milankovitch: origen, reconocimiento, aplicaciones en cicloestratigrafía y el estudio de sistemas petroleros. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 4, 56-65. <https://doi.org/10.26423/rctu.v4i3.281>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., & Waterfield, T. (Eds). (2019). *IPCC, 2018: Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Desertification synthesis*. World Resources Institute.
- Mehmood, I., Bari, A., Irshad, S., Khalid, F., Liaqat, S., Anjum, H., & Fahad, S. (2020). En Fahad, S., Hasanuzzaman, M., Alam, M., Ullah, H., Saeed, M., Khan, I. A., & Adnan, M. (Eds.), *Carbon cycle in response to global warming. Environment, climate, plant and vegetation growth* (pp. 1-15). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_1
- Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R., & Meyer, L. A. (Eds.) (2007). *AR4 Climate change 2007: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press.
- Mgalula, M. E., Wasonga, O. V., Hülsebusch, C., Richter, U., & Hensel, O. (2021). Greenhouse gas emissions and carbon sink potential in Eastern Africa rangeland ecosystems: A review. *Pastoralism*, 11, 1-17. <https://doi.org/10.1186/s13570-021-00201-9>
- Miranda D., R. G. (2018). Desarrollo y cambio climático. Una mirada desde América Latina. *Revista del CESLA*, 21, 193-212.
- Molina, M. J., & Roulund, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249, 810-12. <https://doi.org/10.1155/2018/1057242>

- org/10.1038/249810a0
- Molina, M., Sarukhán, J., & Carabias, J. (2017). *El cambio climático: causas, efectos y soluciones*. Fondo de Cultura Económica.
- Möller, D., & Oelßner, W. (2019). Environmental CO₂ monitoring. En Gerlach, G., U. Guth, & Oelßner, W. (Eds.), *Carbon dioxide sensing: Fundamentals, principles, and applications* (pp. 273-328). John Wiley & Sons.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (s.f.). *Global mean annual concentration of carbon dioxide (CO₂) from 1959 to 2018, measured in parts per million (ppm)*. Recuperado el 20 de mayo de: 2022 de <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>
- Oktyabrskiy, V. P. (2016). A new opinion of the greenhouse effect. *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*, 2, 124-126. <https://doi.org/10.1016/j.spjpm.2016.05.008>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2018. *Soluciones ganaderas para combatir el cambio climático*. Food and Agriculture Organization of the United States.
- Patel, V. K., & Kuttippurath, J. (2023). Increase in tropospheric water vapor amplifies global warming and climate change. *Ocean-Land-Atmosphere Research*, 2, 0015. <https://doi.org/10.34133/olar.0015>
- Potter, C. (2018). Ecosystem carbon emissions from 2015 forest fires in interior Alaska. *Carbon Balance and Management*, 13, 2. <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0090-0>
- Pugh, T. A. M., Lindeskog, M., Smith, B., Poulter, B., Arneth, A., Haverd, V., & Calle, L. (2019). Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(10), 4382-4387. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810512116>
- Paolini Q., E. J. (2023). El derretimiento del permafrost: un desafío para el cambio climático. *Revista Momboy*, 20, 1-12. <https://doi.org/10.70219/mby-202023-87>
- Raihan, A., Begum, R. A., Nizam, M., Said, M., & Pereira, J. J. (2022). Dynamic impacts of energy use, agricultural land expansion, and deforestation on CO₂ emissions in Malaysia. *Environmental and Ecological Statistics*, 29, 477-507. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118049>
- Ray, S., Abraham, J., Jordan, N., Lindsay, M., & Chauhan, N. (2022). Synthetic, photosynthetic, and chemical strategies to enhance carbon dioxide fixation. *C*, 8,18. <https://doi.org/10.3390/c8010018>
- Reich, P. B., Hobbie, S. E., Lee, T. D., & Pastore, M. A. (2018). Unexpected reversal of C₃ versus C₄ grass response to elevated CO₂ during a 20-year field experiment. *Science*, 360(6386), 317-320. <https://doi.org/10.1126/science.aas9313>
- Riebeek, H. (2010). Global warning. NASA. Earth observatory. Recuperado el 4 de marzo de 2025 de: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalWarming/>
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., & Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. World Agroforestry Centre.
- Rügnitz MT, Chacón ML, Porro R. (2012). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. World Agroforestry Centre. Lima, Perú. http://www.aacidf.org.co/Ponencias/2016/septiembre/MI120916-1/Ref.7.Guia_Carbono.pdf
- Sainge, M. N., Nchu, F., & Peterson, A. T. (2020). Diversity, above-ground biomass, and vegetation patterns in a tropical dry forest in Kimbi-Fungom National Park, Cameroon. *Heliyon*, 6(1), e03290. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03290>
- Salles-Smith, C. E., Wang, Y., & Long, S. P. (2025). Increasing Rubisco as a simple means to enhance photosynthesis and productivity now without lowering nitrogen use efficiency. *New Phytologist*, 245(3), 951-965. <https://doi.org/10.1111/nph.20298>
- Sanz-Cobena, A., Lassaletta, L., Aguilera, E., del Prado, A., Garnier, J., Billen, G., Iglesias, A., Sánchez, B., Guardia, G., Abalos, D., Plaza-Bonilla, D., Puigdueta-Bartolomé, I., Moral, R., Galán, E., Arriaga, H., Merino, P., Infante-Amate, J., Meijide, A., Pardo, G., Álvaro-Fuentes, J., & Smith, P. (2017). Strategies for greenhouse gas emissions mitigation in Mediterranean agriculture: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 238(1), 5-24. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.038>
- Skrable, K., Chabot, G., & French, C. (2022). World atmospheric CO₂, its ¹⁴C specific activity, non-fossil component, anthropogenic fossil component, and emissions (1750–2018). *Health Physics*, 122(2), 291-305. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001485>
- Squires, V. R., Dengler, J., Hua, L., & Feng, H. (2018). *Grasslands of the world. Diversity, management and conservation*. CRC Press.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (Eds.). (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth as-*

- assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- Trinidad-Santos, A. (2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agro Productividad*, 9(8), 52-58.
- Venkataramanan, M. (2011). Causes and effects of global warming. *Indian Journal of Science and Technology*, 4, 226-229.
- Verhulst, N., François, I., & Govaerts, B. (2015). *Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.
- White, R., Murray, S., & Rohweder, M. (2000). *Pilot analysis of global ecosystems. Grassland ecosystems*. World Resource Institute.
- Yang, J. W., Brandon, M., Landais, A., Duchamp-Alphonse, S., Blunier, T., Prié, F., & Extier, T. (2022). Global biosphere primary productivity changes during the past eight glacial cycles. *Science*, 375(6585), 1145-1151. <https://doi.org/10.1126/science.abj8826>
- Zandalinas, S. I., Fritschi, F. B., & Mittler, R. (2021). Global warming, climate change, and environmental pollution: recipe for a multifactorial stress combination disaster. *Trends in Plant Science*, 26(6), 588-599. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.011>
- Zhang, J., Pang, L., Cao, X., Wanyan, X., Wang, X., Liang, J., & Zhang, L. (2020). The effects of elevated carbon dioxide concentration and mental workload on task performance in an enclosed environmental chamber. *Building and Environment*, 178, 106938. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106938>
- Zhang, N., Qian, H., Li, H., Tang, J., Yang, T., Liu, Z., Liu, Y., Zhang, B., Ding, Y., & Jiang, Y. (2023). Effect of warming on rice yield and methane emissions in a Chinese tropical double-rice cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 348, 108409. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108409>
- Zimnoch, M., Necki, J., Chmura, L., Jasek, A., Jelen, D., Galkowski, M., Kuc, T., Gorczyca, Z., Bartyzel, J., & Rozanski, K. (2019). Quantification of carbon dioxide and methane emissions in urban areas: source apportionment based on atmospheric observations. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24, 1051-1071. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9821-0>