

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

Compensación con Captura de CO<sub>2</sub> mediante Material Vegetal: Análisis en el Marco de la Evaluación Ambiental

Autora: Beatriz Comino del Río

Tutores: Eladio Martín Romero González y María Custodia Fernández Baco

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024





Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

# **Compensación con Captura de CO<sub>2</sub> mediante Material Vegetal: Análisis en el Marco de la Evaluación Ambiental**

Autora:

Beatriz Comino del Río

Tutores:

Eladio Martín Romero González

María Custodia Fernández Baco

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Máster: Compensación con Captura de CO<sub>2</sub> mediante Material Vegetal: Análisis en el Marco de la Evaluación Ambiental

Autora: Beatriz Comino del Río

Tutores: Eladio Martín Romero González y María Custodia Fernández Baco

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal



# AGRADECIMIENTOS

---

Quiero expresar mi gratitud a todas las personas que me han apoyado en esta etapa como estudiante: a mis amigos por su compañía, a mis profesores por su dedicación y, especialmente, a mi familia, cuyo respaldo ha sido fundamental.

En particular, agradezco a mi madre, a mi hermano, a mi abuela y a mi abuelo (QEPD), quien estaría muy orgulloso de verme concluir mis estudios.

*Beatriz Comino del Río*

*Sevilla, 2024*





# RESUMEN

---

Este Trabajo de Fin de Máster aborda el uso del material vegetal como una herramienta para la captura de CO<sub>2</sub> como medida de compensación en el marco de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental en España. El trabajo parte de la hipótesis de que es posible optimizar la captura de CO<sub>2</sub> mediante la revegetación y reforestación, convirtiéndolas en una medida compensatoria viable y efectiva en proyectos, planes y programas que se encuentran bajo esta normativa. El estudio diferencia los cuatro tipos principales de captura de carbono: captura gris, que se enfoca en la captura industrial; captura verde, que utiliza el proceso biológico de fotosíntesis en ecosistemas terrestres para almacenar carbono en la biomasa de las plantas; captura azul, que aboga por la captura en ecosistemas acuáticos; y captura directa del aire (DAC), tecnología emergente para eliminar CO<sub>2</sub>. El análisis se centra en la captura verde, valorando su potencial como sumidero de carbono, ya que, mediante el proceso de fotosíntesis, las plantas absorben el CO<sub>2</sub> atmosférico y lo almacenan en sus tejidos.

La propuesta se concentra en el ecosistema del monte mediterráneo, planteando una selección de especies autóctonas como las del género, adaptadas al clima seco de esta región y con capacidad de secuestro de carbono. A través de este enfoque, el estudio muestra cómo la revegetación y reforestación estratégica pueden contribuir a la captura de CO<sub>2</sub>, al tiempo que se potencia la restauración de la biodiversidad, la protección del suelo contra la erosión y la resiliencia del ecosistema ante el cambio climático. También se discuten aspectos metodológicos para la implementación, considerando criterios de selección de especies y prácticas de manejo sostenible de la vegetación.

El trabajo plantea además la necesidad de incentivos económicos, como los créditos de carbono, que promuevan la adopción de esta estrategia entre los promotores de proyectos. Estos incentivos pueden hacer que la captura de carbono con material vegetal sea una solución ambiental y económicamente viable dentro del marco de la Ley de Evaluación Ambiental, ayudando a los sectores público y privado a cumplir con los objetivos de neutralidad de carbono establecidos en el Acuerdo de París y adoptados por España para el año 2050.

Enfatizando la importancia del monitoreo y gestión de las áreas revegetadas, con el fin de garantizar la estabilidad del carbono almacenado y evitar la liberación del CO<sub>2</sub> secuestrado en eventos de degradación de la vegetación, se concluye que esta estrategia puede desempeñar un papel fundamental en la mitigación del cambio climático.



# ABSTRACT

---

This Master's Final Project addresses the use of plant material as a tool for CO<sub>2</sub> capture as a compensatory measure within Spain's Environmental Assessment Law (Law 21/2013, December 9th). The study hypothesizes that CO<sub>2</sub> capture can be optimized through revegetation and reforestation, making them viable and effective compensatory measures within projects, plans, and programs under this regulatory framework. The study distinguishes the four main types of carbon capture: grey capture, focusing on industrial CO<sub>2</sub> capture; green capture, which uses the biological process of photosynthesis in terrestrial ecosystems to store carbon in plant biomass; blue capture, promoting carbon capture in aquatic ecosystems; and direct air capture (DAC), an emerging technology for CO<sub>2</sub> removal. The analysis focuses on green capture, assessing its potential as a carbon sink, as plants absorb atmospheric CO<sub>2</sub> through photosynthesis and store it in their tissues.

The proposal focuses on the Mediterranean forest ecosystem, selecting native species adapted to the dry climate of this region and with carbon sequestration potential. Through this approach, the study demonstrates how strategic revegetation and reforestation can contribute to CO<sub>2</sub> capture, while enhancing biodiversity restoration, soil protection from erosion, and ecosystem resilience to climate change. Methodological aspects for implementation are also discussed, considering criteria for species selection and sustainable vegetation management practices.

The thesis further proposes the need for economic incentives, such as carbon credits, to encourage the adoption of this strategy among project developers. These incentives could make plant-based carbon capture an environmentally and economically viable solution within the framework of the Environmental Assessment Law, aiding both public and private sectors in meeting the carbon neutrality targets established in the Paris Agreement and adopted by Spain for the year 2050.

Emphasizing the importance of monitoring and managing revegetated areas to ensure the stability of stored carbon and prevent CO<sub>2</sub> release due to vegetation degradation events, the study concludes that this strategy can play a crucial role in climate change mitigation.



AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
ÍNDICE	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
1 INTRODUCCIÓN	1
2 CONTEXTO	3
2.1 ¿QUÉ ES LA EVALUACIÓN AMBIENTAL?	3
2.2 ¿QUÉ SON LAS MEDIDAS COMPENSATORIAS?	4
2.3 ¿POR QUÉ INCLUIR LA CAPTURA DE CO <sub>2</sub> ?	5
3 TIPOS DE CAPTURA DE CO <sub>2</sub>	7
3.1 CAPTURA GRIS	7
3.1.1 PROCESOS Y TECNOLOGÍAS DE CAPTURA GRIS	7
3.1.2 DESAFÍOS Y BENEFICIOS DE LA CAPTURA GRIS	8
3.2 CAPTURA VERDE	8
3.2.1 PROCESOS BIOLÓGICOS EN LA CAPTURA VERDE	8
3.2.2 BENEFICIOS Y CONSIDERACIONES DE LA CAPTURA VERDE	8
3.3 CAPTURA AZUL	9
3.3.1 ESTRATEGIAS EN LA CAPTURA AZUL	9
3.3.2 DESAFÍOS Y CONSIDERACIONES DE LA CAPTURA AZUL	9
3.4 CAPTURA DIRECTA DEL AIRE (DAC)	9
3.4.1 PROCESOS Y TECNOLOGÍAS DE DAC	9
3.4.2 DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS DE DAC	10
4 PROCESOS DE CAPTURA VERDE	11
4.1 MECANISMOS DE CAPTURA DE CO <sub>2</sub> EN LAS PLANTAS	11
4.1.1 FOTOSÍNTESIS: UN PROCESO BIOLÓGICO FUNDAMENTAL	11
4.1.2 ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA VEGETAL	12
4.2 IMPORTANCIA ECOLÓGICA DE LA CAPTURA VERDE	12
4.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CAPTURA DE CO <sub>2</sub>	13
5 METODOLOGÍA Y CRITERIOS DE APLICACIÓN	15
5.1 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	15
5.2 ENFOQUES DE EVALUACIÓN	16
5.3 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE MEDIDAS	16
5.4 CAPACIDAD DE SECUESTRO DE CO <sub>2</sub> EN EL MONTE MEDITERRÁNEO	17
5.4.1 CARACTERÍSTICAS MONTE MEDITERRÁNEO	17
5.4.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO	18

6	PROPUESTA	26
6.1	OBJETIVO DE LA PROPUESTA	26
6.2	JUSTIFICACIÓN	26
6.3	ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN	26
6.4	CONSIDERACIONES Y DESAFÍOS	27
7	CONCLUSIONES	28
	REFERENCIAS	30

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.-</b> Distribución de la biomasa de <i>Cistus ladanifer L.</i> y <i>Erica arborea L.</i>	19
<b>Figura 2.-</b> Absorciones unitarias estimadas a los 30 años según especie.	23





# 1 INTRODUCCIÓN

---

La hipótesis central de este trabajo plantea que, dentro del marco de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental, es posible optimizar la captura de CO<sub>2</sub> mediante material vegetal y que dicha estrategia puede ser implementada como una medida compensatoria eficaz en los planes, programas y proyectos sujetos a dicha ley.

La evaluación ambiental resulta indispensable para la protección del medio ambiente. Facilita la incorporación de los criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas, a través de la evaluación de los planes y programas. Y a través de la evaluación de planes, programas y proyectos, garantiza una adecuada prevención de los impactos ambientales concretos que se puedan generar, al tiempo que establece mecanismos eficaces de corrección o compensación. (BOE, 2023). En este contexto, la hipótesis se centra en la posibilidad de utilizar material vegetal no solo como una medida compensatoria general, sino como un medio óptimo para capturar las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el principal gas de efecto invernadero responsable del cambio climático (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021).

La captura de CO<sub>2</sub> mediante material vegetal se basa en la fotosíntesis, un proceso por el cual las plantas absorben CO<sub>2</sub> de la atmósfera y lo almacenan en sus tejidos (raíces, troncos, ramas, hojas) y en el suelo (Lal, 2008). Este proceso convierte a los sistemas vegetales en sumideros de carbono, capaces de retener grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y, de esta manera, ayudar a mitigar el cambio climático (Paustian et al., 2016). La hipótesis que se propone en este trabajo sugiere que la implementación estratégica de medidas compensatorias basadas en la revegetación y reforestación puede maximizar el potencial de captura de CO<sub>2</sub>, al tiempo que cumple con los requisitos normativos de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental.

Actualmente, las medidas compensatorias en los planes, programas y proyectos evaluados según la Ley 21/2013 suelen centrarse en la restauración de ecosistemas dañados, la protección de la biodiversidad o la compensación de pérdidas en la calidad ambiental. Aunque algunas de estas medidas incluyen la revegetación o reforestación, a menudo no se planifican específicamente con el objetivo de optimizar la captura de carbono (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020). La hipótesis de este trabajo sostiene que es posible, a través de una planificación más específica y basada en principios científicos, integrar la captura de CO<sub>2</sub> en las medidas compensatorias de manera efectiva, contribuyendo a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en España y alineándose con los objetivos de neutralidad climática fijados para 2050 (European Commission, 2019).

Uno de los elementos clave en esta hipótesis es la selección de especies vegetales con alta capacidad para capturar y almacenar carbono. Diferentes especies presentan distintas eficiencias en la captura de CO<sub>2</sub>; por ejemplo, los árboles de rápido crecimiento como los eucaliptos y los álamos tienen una alta tasa de absorción de carbono en períodos cortos, mientras que los árboles de crecimiento más lento, como los robles, almacenan carbono de manera más eficiente a lo largo del tiempo (Díaz-Pinés et al., 2011). La elección de las especies vegetales más adecuadas en función del contexto geográfico y climático del planes, programas o proyecto es un componente crucial para maximizar el potencial de captura de CO<sub>2</sub> (Canadell & Raupach, 2008). Esta selección estratégica, además, puede tener implicaciones adicionales positivas en la restauración de la biodiversidad y la mejora de la resiliencia de los ecosistemas locales frente al cambio climático.

La hipótesis también aborda la necesidad de implementar una gestión sostenible de las áreas reforestadas o revegetadas a largo plazo. Para que las medidas compensatorias basadas en material vegetal sean efectivas, es fundamental que las áreas intervenidas sean gestionadas y monitoreadas adecuadamente, garantizando la permanencia del carbono capturado en la biomasa y el suelo durante décadas o incluso siglos (Luyssaert et al., 2008). Esto implica desarrollar sistemas de monitoreo robustos y eficaces que puedan medir no solo la salud y el crecimiento de las plantaciones, sino también la cantidad de CO<sub>2</sub> capturada y almacenada. Sin un sistema de monitoreo continuo, el riesgo de liberación de carbono debido a la degradación de las áreas revegetadas, incendios forestales o actividades humanas no controladas puede anular los beneficios esperados (Houghton, 2012).

Otro aspecto importante de esta hipótesis es que el marco legal de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental ofrece la flexibilidad suficiente para integrar medidas compensatorias basadas en la captura de CO<sub>2</sub> mediante material vegetal. Sin embargo, en la práctica actual, este potencial no ha sido completamente explotado (MITECO, 2020).

Por tanto, la hipótesis sugiere que con ajustes normativos y una mayor concienciación sobre los beneficios de la captura de carbono, es posible promover este tipo de medidas como una solución tanto para compensar los impactos ambientales de los planes, programas y proyectos como para contribuir a los objetivos nacionales de reducción de emisiones.

Además, el éxito de estas medidas podría verse reforzado por la introducción de incentivos dentro del marco legislativo. La creación de mecanismos como créditos de carbono o ventajas fiscales para los promotores que adopten medidas de captura de CO<sub>2</sub> podría aumentar la adopción de estas estrategias (Fischer et al., 2012). Esto no solo incentivaría la participación activa de los promotores en la reducción de emisiones, sino que también podría generar un mercado de carbono más dinámico en España, lo que ayudaría a financiar y expandir los proyectos de revegetación y reforestación a gran escala (Krause & Gutscher, 2020).

Finalmente, esta hipótesis también considera la necesidad de colaboración interinstitucional para garantizar el éxito de las medidas compensatorias basadas en la captura de CO<sub>2</sub>. La integración de esfuerzos entre administraciones públicas, empresas privadas, ONGs y centros de investigación puede fortalecer la capacidad de los proyectos de captura de carbono mediante material vegetal, creando sinergias que maximicen los resultados (Höhne et al., 2017).

En resumen, la hipótesis plantea que es posible y necesario optimizar la captura de CO<sub>2</sub> mediante material vegetal como una medida compensatoria dentro del marco de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental. Si se lleva a cabo de manera adecuada, esta estrategia no solo contribuirá a mitigar el cambio climático, sino que también proporcionará una solución rentable y sostenible para la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en España. Con una planificación estratégica, incentivos normativos y una gestión a largo plazo, las medidas compensatorias basadas en material vegetal tienen el potencial de convertirse en una herramienta clave en la lucha contra el cambio climático.

# 2 CONTEXTO

---

## 2.1 ¿QUÉ ES LA EVALUACIÓN AMBIENTAL?

La evaluación ambiental (EA) es un proceso integral que se centra en la identificación, evaluación y mitigación de los efectos que un plan, programa o proyecto puede tener sobre el medio ambiente. Este proceso es fundamental en la planificación de proyectos de desarrollo, ya que permite anticipar y reducir impactos negativos potenciales antes de que se materialicen. La Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental, que regula la práctica de la evaluación ambiental en España, establece un marco legal claro que guía a los promotores de proyectos en la realización de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) (BOE, 2013).

El EIA es una herramienta esencial dentro de la evaluación ambiental, que proporciona un análisis sistemático de los efectos directos e indirectos de un plan, programa o proyecto sobre diversos componentes del medio ambiente, incluyendo la calidad del aire, el agua, la biodiversidad, los aspectos socioeconómicos, etc. Este proceso se inicia con la recopilación de información relevante, que incluye el contexto ambiental existente, la descripción del plan, programa o proyecto propuesto, y una evaluación detallada de los impactos potenciales. La identificación y caracterización de impactos se basa en métodos cuantitativos y cualitativos, que permiten a los responsables de la toma de decisiones entender las consecuencias del plan, programa o proyecto en diferentes escalas y contextos (European Commission, 2020).

La evaluación ambiental no se limita a la identificación de impactos negativos. De hecho, uno de sus objetivos principales es proponer medidas correctoras y compensatorias que puedan mitigar los efectos adversos de un plan, programa o proyecto. Las medidas correctoras son aquellas que buscan evitar, reducir o remediar impactos antes de que se produzcan. Por otro lado, las medidas compensatorias están destinadas a equilibrar los impactos que no se pueden evitar, a menudo a través de la restauración o creación de hábitats que compensen la pérdida ambiental (MITECO, 2020). Este enfoque no solo promueve una mayor conciencia sobre las consecuencias ambientales de las actividades humanas, sino que también fomenta la búsqueda de soluciones innovadoras que beneficien tanto al medio ambiente como a la sociedad.

Un aspecto crucial de la evaluación ambiental es la participación pública, que se ha convertido en un pilar fundamental en la práctica de la EIA. La legislación europea y nacional exige que se informe al público sobre los proyectos propuestos y que se les dé la oportunidad de expresar sus opiniones y preocupaciones. Este proceso de participación garantiza que se tomen en cuenta las voces de las comunidades afectadas y permite que la evaluación ambiental sea más inclusiva y representativa (García et al., 2020). La participación pública puede incluir consultas, talleres comunitarios, y la presentación de observaciones durante el período de consulta, lo que contribuye a un proceso más transparente y legitimado.

Además, la evaluación ambiental se enmarca en un contexto de sostenibilidad, donde el equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación ambiental es crucial. La sostenibilidad implica no solo reducir los impactos negativos en el medio ambiente, sino también promover prácticas que restauren y mejoren la salud del ecosistema. La evaluación ambiental es, por tanto, una herramienta estratégica para fomentar un desarrollo que no comprometa los recursos naturales y que permita el bienestar de las generaciones futuras (IPCC, 2021). De esta manera, la evaluación ambiental no solo se trata de cumplir con regulaciones, sino de adoptar un enfoque proactivo en la gestión ambiental.

En conclusión, la evaluación ambiental es un proceso esencial que integra la consideración ambiental en la planificación y desarrollo de planes, programas y proyectos. Al identificar y evaluar impactos potenciales, proponer medidas correctoras y compensatorias, y fomentar la participación pública, la evaluación ambiental busca promover un desarrollo sostenible y responsable, asegurando que los recursos naturales se gestionen de manera efectiva y que se protejan los derechos de las comunidades afectadas.

## 2.2 ¿QUÉ SON LAS MEDIDAS COMPENSATORIAS?

Las medidas compensatorias son un conjunto de acciones diseñadas para mitigar los impactos negativos de un proyecto sobre el medio ambiente, especialmente aquellos que no pueden evitarse o remediarse mediante medidas correctoras. Estas medidas son un componente fundamental del proceso de evaluación ambiental y son exigidas por la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental, que establece que los promotores deben proponer medidas compensatorias viables y justificadas en función de la magnitud y naturaleza de los impactos identificados (MITECO, 2020).

Existen diferentes tipos de medidas compensatorias que se pueden implementar, dependiendo de la naturaleza del proyecto y de los impactos asociados. Las más comunes incluyen la restauración de ecosistemas, la creación de nuevos hábitats, y la protección de áreas de alto valor ambiental. La restauración de ecosistemas implica la rehabilitación de áreas degradadas a través de prácticas como la reforestación, revegetación y la rehabilitación de suelos. Estas acciones buscan recuperar la funcionalidad del ecosistema y restaurar la biodiversidad perdida (Lal, 2008). Por ejemplo, si un proyecto de construcción implica la pérdida de un área forestal, las medidas compensatorias podrían incluir la reforestación en una zona cercana para equilibrar la pérdida de biodiversidad.

La creación de nuevos hábitats es otra estrategia utilizada como medida compensatoria. Esto puede incluir la habilitación de áreas húmedas, la creación de corredores biológicos o la instalación de estructuras que fomenten la fauna local. La creación de hábitats no solo ayuda a compensar la pérdida de ecosistemas, sino que también puede contribuir a la resiliencia de la biodiversidad frente a las presiones del cambio climático (Fischer et al., 2012). Estas medidas deben ser cuidadosamente planificadas y ejecutadas, considerando las especies locales, las características del ecosistema y la conectividad ecológica.

Además, la protección de áreas de alto valor ambiental es una medida compensatoria que busca conservar espacios que tienen un significado ecológico, cultural o social especial. Esto puede incluir la creación de reservas naturales, la designación de áreas protegidas, o la implementación de prácticas de gestión sostenible en terrenos adyacentes a proyectos (Höhne et al., 2017). La protección de estas áreas no solo ayuda a conservar la biodiversidad, sino que también puede ofrecer beneficios a las comunidades locales en términos de acceso a recursos naturales y oportunidades de ecoturismo.

La eficacia de las medidas compensatorias depende en gran medida de su implementación adecuada. Se requiere un enfoque basado en la ciencia y en el contexto local para garantizar que las medidas sean efectivas en la compensación de los impactos. Esto implica la selección de especies vegetales adecuadas, la planificación del diseño de restauración, y el seguimiento de los resultados a lo largo del tiempo (Krause & Gutscher, 2020). Las evaluaciones post-implementación son cruciales para determinar si las medidas han logrado sus objetivos y para realizar ajustes si es necesario.

Además, es importante considerar que las medidas compensatorias deben ser vistas como un complemento y no como un sustituto de las medidas preventivas. La prevención de impactos negativos a través de un diseño adecuado del proyecto y la adopción de tecnologías limpias debe ser siempre la prioridad. Las medidas compensatorias deben utilizarse cuando los impactos son inevitables y se busca equilibrar la pérdida con beneficios ambientales (García et al., 2020).

En resumen, las medidas compensatorias son un componente clave de la evaluación ambiental, que permite mitigar los impactos negativos de los proyectos sobre el medio ambiente. A través de la restauración de ecosistemas, la creación de nuevos hábitats y la protección de áreas de alto valor ambiental, estas medidas buscan promover la sostenibilidad y la resiliencia ecológica. Su eficacia depende de una planificación cuidadosa, una implementación adecuada y un seguimiento riguroso, asegurando que se logren los objetivos ambientales deseados.

## 2.3 ¿POR QUÉ INCLUIR LA CAPTURA DE CO<sub>2</sub>?

La inclusión de la captura de CO<sub>2</sub> como medida compensatoria en el marco de la evaluación ambiental es crucial por diversas razones. En primer lugar, el cambio climático ha emergido como uno de los desafíos más apremiantes a nivel global, impulsado en gran parte por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), siendo el CO<sub>2</sub> el más predominante. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), para limitar el aumento de la temperatura global a 1.5 °C, es fundamental reducir drásticamente las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros GEI en las próximas décadas (IPCC, 2021). La inclusión de la captura de CO<sub>2</sub> en las medidas compensatorias permite a los proyectos contribuir activamente a esta meta, alineándose con los compromisos climáticos nacionales e internacionales, como el Acuerdo de París.

La captura de CO<sub>2</sub> mediante material vegetal, a través de la reforestación y la revegetación, no solo permite reducir las emisiones, sino que también ofrece múltiples beneficios adicionales para el medio ambiente. La vegetación actúa como un sumidero de carbono, absorbiendo CO<sub>2</sub> durante su crecimiento y almacenándolo en su biomasa. Este proceso de captura de carbono no solo mitiga el cambio climático, sino que también contribuye a la restauración de ecosistemas degradados y a la mejora de la calidad del aire y del agua (Lal, 2008). Además, al fomentar la biodiversidad, las prácticas de captura de CO<sub>2</sub> pueden crear hábitats que alberguen una variedad de especies, lo que es esencial para mantener la salud y la resiliencia de los ecosistemas.

Asimismo, incluir la captura de CO<sub>2</sub> como medida compensatoria puede facilitar la creación de mecanismos de mercado que incentiven la inversión en proyectos de conservación y restauración. A través de la implementación de esquemas de compensación de carbono, las empresas y los desarrolladores pueden adquirir créditos de carbono generados por proyectos que capturan CO<sub>2</sub>, promoviendo así una economía baja en carbono (Krause & Gutscher, 2020). Estos mecanismos no solo generan ingresos adicionales para las comunidades locales, sino que también fomentan la adopción de prácticas sostenibles y responsables.

Desde el punto de vista social, la captura de CO<sub>2</sub> mediante la restauración de paisajes vegetales también puede contribuir al desarrollo local y al bienestar de las comunidades. Las iniciativas de reforestación pueden generar empleo, promover la participación comunitaria, y fortalecer la conexión entre las personas y su entorno natural. Estas acciones no solo benefician al medio ambiente, sino que también empoderan a las comunidades locales y promueven su resiliencia frente al cambio climático (Fischer et al., 2012).

No obstante, es fundamental abordar la captura de CO<sub>2</sub> desde un enfoque integral. La selección de especies vegetales debe ser adecuada al contexto local, considerando factores como la biodiversidad, el tipo de suelo y el clima. Además, las iniciativas de captura de CO<sub>2</sub> deben ser implementadas junto con medidas que aborden las fuentes de emisiones de GEI, para lograr un impacto real y duradero en la lucha contra el cambio climático (Höhne et al., 2017). La captura de CO<sub>2</sub> debe verse como una herramienta dentro de un enfoque más amplio de gestión ambiental que incluya la reducción de emisiones, la eficiencia energética y el fomento de energías renovables.

En conclusión, la inclusión de la captura de CO<sub>2</sub> como medida compensatoria en la evaluación ambiental es esencial para abordar el cambio climático de manera efectiva. Al contribuir a la reducción de emisiones de GEI, mejorar la calidad del medio ambiente, fomentar la biodiversidad, y generar beneficios sociales, la captura de CO<sub>2</sub> se alinea con los objetivos de sostenibilidad y resiliencia ecológica. Su implementación adecuada puede ser un paso crucial hacia un futuro más sostenible y responsable.

# 3 TIPOS DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

La captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es un elemento clave en las estrategias globales para mitigar el cambio climático. Este proceso no solo busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también facilitar la transición hacia un futuro más sostenible. A medida que la dependencia de los combustibles fósiles persiste, las tecnologías de captura se clasifican en tres categorías principales: captura gris, captura verde y captura azul. Una metodología emergente en el campo de la captura de carbono es la captura directa del aire (DAC).

A continuación, se analiza en detalle cada tipo de captura, su proceso científico, tecnología, impactos ambientales y consideraciones económicas.

## 3.1 CAPTURA GRIS

La captura gris se refiere a la implementación de tecnologías que capturan el CO<sub>2</sub> generado durante procesos industriales y en plantas de energía que utilizan combustibles fósiles. Este tipo de captura es crucial para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un mundo que aún depende en gran medida de los combustibles fósiles para la producción de energía.

### 3.1.1 PROCESOS Y TECNOLOGÍAS DE CAPTURA GRIS

1. **Absorción química:** Este método es ampliamente utilizado y consiste en el uso de solventes químicos, típicamente aminas, que reaccionan con el CO<sub>2</sub>. En una torre de absorción, los gases de escape pasan a través de una solución de aminas que capturan el CO<sub>2</sub>. La reacción química básica se puede expresar como:



Este proceso es endotérmico, lo que significa que requiere calor para liberar el CO<sub>2</sub> del solvente, lo que se realiza en un proceso de regeneración. Este método, aunque efectivo, es intensivo en energía. Según estudios, la eficiencia de captura puede alcanzar hasta el 90%, pero a un coste que varía de 50 a 80 €/tonelada de CO<sub>2</sub>, dependiendo de las condiciones operativas y el diseño del sistema (Zhang et al., 2017).

2. **Adsorción:** Este método utiliza sólidos que pueden atraer y retener CO<sub>2</sub> en su superficie. Los adsorbentes típicos incluyen zeolitas y carbón activado. Durante el proceso de adsorción, el CO<sub>2</sub> se adhiere al material adsorbente, y su regeneración se logra mediante cambios en la temperatura o presión, lo que permite que el CO<sub>2</sub> se libere para su almacenamiento o reutilización. Las capacidades de captura dependen de las características del adsorbente y las condiciones operativas, con eficiencias que pueden alcanzar hasta un 80% en condiciones óptimas (Ruth et al., 2019).
3. **Membranas de separación:** Este proceso implica el uso de membranas semipermeables que permiten el paso selectivo del CO<sub>2</sub>, separándolo de otros gases. La tecnología de membranas se basa en la diferencia de solubilidad y difusión del CO<sub>2</sub>. Este método es prometedor debido a su menor requerimiento energético en comparación con la absorción química, pero la selección y desarrollo de membranas adecuadas siguen siendo áreas de investigación activa (Huang et al., 2020).

### 3.1.2 DESAFÍOS Y BENEFICIOS DE LA CAPTURA GRIS

La captura gris presenta ventajas significativas, como la posibilidad de ser integrada en instalaciones existentes y la reducción inmediata de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, enfrenta desafíos críticos, uno de los más destacados es el alto coste asociado con los procesos de captura y regeneración, que limita su implementación a gran escala. Además, la generación de residuos químicos y el consumo de energía son consideraciones cruciales que deben ser abordadas para garantizar que la captura gris sea una solución viable a largo plazo (Gomez et al., 2021).

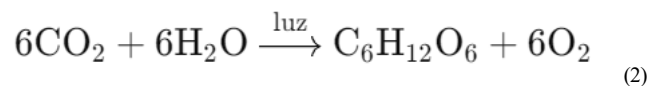
En términos de beneficios, la captura gris no solo ayuda a mitigar el cambio climático, sino que también puede generar oportunidades económicas, como la creación de empleos en la industria de la captura de carbono. La posibilidad de reutilizar el CO<sub>2</sub> capturado en procesos industriales, como la producción de combustibles sintéticos, representa un área de interés creciente (Davis et al., 2018).

## 3.2 CAPTURA VERDE

La captura verde aprovecha procesos biológicos para la absorción y almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Este enfoque utiliza la capacidad natural de plantas, suelos y ecosistemas para actuar como sumideros de carbono. Es importante destacar que la captura de carbono verde se refiere específicamente a los procesos biológicos en ecosistemas terrestres, como bosques, praderas y áreas agrícolas, que secuestran carbono a través de la fotosíntesis y el crecimiento de plantas. Estos ecosistemas terrestres son considerados sumideros naturales de CO<sub>2</sub>.

### 3.2.1 PROCESOS BIOLÓGICOS EN LA CAPTURA VERDE

1. **Reforestación y forestación:** La reforestación implica replantar árboles en áreas previamente deforestadas, mientras que la forestación se refiere a la creación de bosques en terrenos que no han tenido cobertura forestal. Los árboles absorben CO<sub>2</sub> de la atmósfera durante la fotosíntesis, un proceso esencial para la vida terrestre. La ecuación de fotosíntesis puede representarse como:



Este proceso no solo secuestra carbono, sino que también libera oxígeno, contribuyendo a la salud del planeta. Se estima que un solo árbol puede capturar aproximadamente 22 kg de CO<sub>2</sub> al año, dependiendo de factores como la especie de árbol y las condiciones climáticas (Lal, 2008).

2. **Agricultura de conservación:** Este enfoque implica prácticas agrícolas que mejoran la captura de carbono en el suelo. La implementación de técnicas como la siembra directa, la rotación de cultivos y el uso de cultivos de cobertura aumenta la cantidad de materia orgánica en el suelo, que actúa como un sumidero de carbono. Estudios sugieren que estas prácticas pueden incrementar el carbono en el suelo entre 0.4 y 1.0 toneladas por hectárea al año (Paustian et al., 2016). Esto no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también mejora la salud del suelo, su fertilidad y su capacidad para retener agua.

### 3.2.2 BENEFICIOS Y CONSIDERACIONES DE LA CAPTURA VERDE

Los beneficios de la captura verde son múltiples. Además de la reducción de CO<sub>2</sub>, la reforestación y la restauración de ecosistemas mejoran la biodiversidad y ofrecen servicios ecosistémicos, como la regulación del ciclo del agua, la protección contra la erosión y la mejora de la calidad del aire (Fischer et al., 2012). Sin embargo, es crucial abordar la gestión sostenible de los ecosistemas y la selección de especies autóctonas para maximizar el éxito de estas iniciativas. Las intervenciones deben planificarse cuidadosamente para evitar el uso de especies invasoras que podrían perjudicar la biodiversidad local.

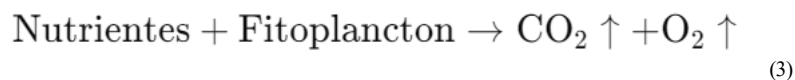
Además, la captura verde debe ser considerada en el contexto de los derechos de las comunidades locales. Es fundamental garantizar que las iniciativas de reforestación y restauración no desplacen a las comunidades ni limiten su acceso a recursos naturales esenciales.

### 3.3 CAPTURA AZUL

La captura azul se centra en el uso de los océanos como sumideros de carbono. Actualmente, los océanos absorben alrededor de un 25% de las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>, y las estrategias de captura azul buscan maximizar esta capacidad. Esta captura se relaciona específicamente con ecosistemas acuáticos costeros, como marismas, manglares y praderas marinas, que son capaces de almacenar grandes cantidades de carbono, mientras que el carbono verde proviene de ecosistemas terrestres.

#### 3.3.1 ESTRATEGIAS EN LA CAPTURA AZUL

1. **Fertilización del océano:** La fertilización del océano es una técnica que implica añadir nutrientes, especialmente hierro, a aguas oceánicas que carecen de nutrientes. Este enfoque estimula el crecimiento del fitoplancton, que realiza la fotosíntesis y absorbe CO<sub>2</sub>. Al morir, el fitoplancton se hunde en las profundidades del océano, secuestrando el carbono durante siglos. Este proceso, conocido como "bomba biológica", se puede modelar como:



Sin embargo, la fertilización del océano presenta riesgos ecológicos, como la alteración de los ecosistemas marinos y la posible proliferación de especies nocivas (Doney et al., 2012).

2. **Restauración de ecosistemas costeros:** Los manglares y las praderas marinas almacenan hasta siete veces más carbono que los bosques terrestres y además protegen las costas de fenómenos climáticos extremos (Alongi, 2014).
3. **Almacenamiento de CO<sub>2</sub> en formaciones geológicas marinas:** Esta estrategia implica la inyección de CO<sub>2</sub> en formaciones geológicas bajo el fondo marino. El CO<sub>2</sub> se disuelve en el agua de mar y reacciona con minerales para formar carbonatos, lo que permite su almacenamiento seguro. Este proceso es similar al almacenamiento en formaciones terrestres, pero se considera que tiene un potencial adicional debido a la vasta capacidad de almacenamiento de los océanos (Lal, 2008).

#### 3.3.2 DESAFÍOS Y CONSIDERACIONES DE LA CAPTURA AZUL

La captura azul presenta oportunidades significativas, pero también desafíos importantes. La gestión de los ecosistemas marinos es compleja, y la implementación de estrategias como la fertilización del océano requiere una evaluación cuidadosa de sus impactos ecológicos y sociales. Además, la infraestructura necesaria para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en el océano puede ser costosa y técnicamente desafiante (Gomez et al., 2021).

### 3.4 CAPTURA DIRECTA DEL AIRE (DAC)

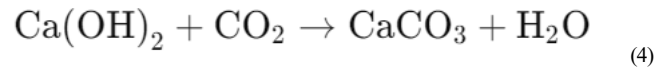
La captura directa del aire (DAC) es una tecnología emergente que busca eliminar el CO<sub>2</sub> directamente de la atmósfera. Esto se ha vuelto especialmente relevante en el contexto del cambio climático, ya que ofrece una manera de compensar las emisiones que no pueden eliminarse completamente.

#### 3.4.1 PROCESOS Y TECNOLOGÍAS DE DAC

1. **Sistemas de sorción:** Estos sistemas utilizan materiales absorbentes para capturar CO<sub>2</sub> directamente del aire. Estos materiales, como las zeolitas y los polímeros, funcionan mediante procesos de adsorción, donde el CO<sub>2</sub> se adhiere a la superficie del material. Este proceso es reversible, y el CO<sub>2</sub> se puede liberar al calentar o despresurizar el sistema, permitiendo su recuperación (Coffman et al., 2020).



2. **Uso de hidróxido de calcio:** Esta técnica utiliza el hidróxido de calcio para reaccionar con el CO<sub>2</sub>, formando carbonato de calcio. Este proceso tiene la ventaja de convertir el CO<sub>2</sub> en un mineral estable, que puede almacenarse de manera segura en el subsuelo. La reacción química se describe como:



Esta técnica se ha explorado en diversas aplicaciones industriales y puede ofrecer un almacenamiento seguro del CO<sub>2</sub> (Ahn et al., 2019).

### 3.4.2 DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS DE DAC

A pesar de su potencial, la DAC enfrenta varios desafíos significativos. Uno de los principales es el alto coste de operación, que puede ser de 90-500 €/tonelada de CO<sub>2</sub> capturado. Esto limita su competitividad frente a otras tecnologías de captura más establecidas. Sin embargo, la mejora de la eficiencia de las tecnologías de captura, la reducción de costes de energía y la integración con fuentes de energía renovable son áreas de investigación activa que podrían facilitar la implementación a gran escala de la DAC (Socolow et al., 2011).

# 4 PROCESOS DE CAPTURA VERDE

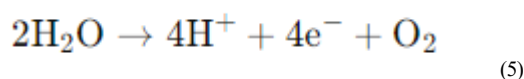
La captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) mediante material vegetal es un proceso esencial para la regulación del clima global y el equilibrio del ciclo del carbono. Las plantas actúan como sumideros de carbono, absorbiendo CO<sub>2</sub> de la atmósfera durante la fotosíntesis y almacenándolo en sus estructuras biológicas. Este apartado se adentrará en los mecanismos específicos de la fotosíntesis, el almacenamiento de carbono, la importancia ecológica de estos procesos, y los diversos factores que influyen en la eficacia de las plantas como sistemas de captura de CO<sub>2</sub>.

## 4.1 MECANISMOS DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub> EN LAS PLANTAS

### 4.1.1 FOTOSÍNTESIS: UN PROCESO BIOLÓGICO FUNDAMENTAL

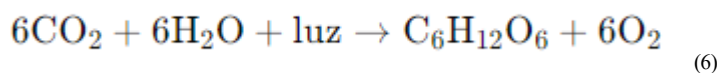
La fotosíntesis es el proceso mediante el cual las plantas convierten la luz solar en energía química, permitiendo así la fijación del CO<sub>2</sub> atmosférico. Este proceso se divide en dos etapas principales: la fase luminosa y la fase oscura, que juntas permiten a las plantas capturar y almacenar energía.

1. **Fase luminosa:** En esta etapa, que ocurre en los tilacoides de los cloroplastos, la luz solar es absorbida por la clorofila. Esta absorción de luz excita electrones que se transfieren a través de una cadena de transporte de electrones, lo que resulta en la producción de adenosín trifosfato (ATP) y nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADPH). Este proceso también implica la fotólisis del agua, liberando oxígeno como un subproducto. Las reacciones de esta fase pueden resumirse en la siguiente ecuación química:



Este oxígeno liberado es fundamental para la vida en la Tierra, ya que se utiliza en la respiración celular de casi todos los organismos.

2. **Fase oscura:** Esta etapa, que no requiere luz directa, ocurre en el estroma de los cloroplastos. En este ciclo, el CO<sub>2</sub> es fijado a una molécula de cinco carbonos, ribulosa bisfosfato (RuBP), mediante la acción de la enzima ribulosa bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (RuBisCO). La reacción resultante forma un compuesto inestable que se descompone rápidamente en dos moléculas de ácido 3-fosfoglicerato (3-PGA). Posteriormente, a través de una serie de reacciones que consumen ATP y NADPH, estos compuestos se convierten en glucosa y otros carbohidratos. La ecuación general de la fotosíntesis se puede representar de la siguiente manera:



Este proceso es vital no solo para la obtención de energía en las plantas, sino también para la eliminación de CO<sub>2</sub> de la atmósfera.

#### 4.1.2 ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA VEGETAL

Una vez que el CO<sub>2</sub> ha sido fijado durante la fotosíntesis, se convierte en biomasa a través de una variedad de compuestos orgánicos. Este carbono se almacena en diversas partes de la planta, incluidas raíces, tallos, hojas y frutos. El almacenamiento de carbono puede ser clasificado de la siguiente manera:

- **Biomasa aérea:** Comprende todas las partes visibles de la planta, como hojas, tallos y flores. La cantidad de carbono almacenado en esta biomasa puede variar ampliamente dependiendo de la especie, la edad y el tamaño de la planta. En árboles, por ejemplo, se estima que más del 50% de su peso seco corresponde a carbono (IPCC, 2006).
- **Biomasa subterránea:** Incluye raíces y otros tejidos subterráneos que también almacenan carbono. Las raíces no solo almacenan carbono, sino que también juegan un papel esencial en la absorción de agua y nutrientes del suelo, facilitando así el crecimiento de la planta.
- **Materia orgánica del suelo:** Cuando las plantas mueren o son descompuestas, parte del carbono que contenían se transfiere al suelo en forma de materia orgánica. Este carbono puede permanecer en el suelo durante largos períodos, contribuyendo al almacenamiento global de carbono en el suelo. Se estima que los suelos almacenan aproximadamente tres veces más carbono que la atmósfera (Lal, 2008).

El ciclo del carbono en la naturaleza es dinámico y complejo. Las plantas capturan CO<sub>2</sub>, lo almacenan en su biomasa y, a través de la descomposición, devuelven parte de ese carbono al suelo. Este proceso es fundamental para la regulación del clima y el mantenimiento de la salud del ecosistema.

#### 4.2 IMPORTANCIA ECOLÓGICA DE LA CAPTURA VERDE

La captura de CO<sub>2</sub> mediante plantas tiene múltiples beneficios ecológicos que trascienden la simple mitigación del cambio climático. Algunas de las contribuciones más significativas son las siguientes:

- **Mitigación del cambio climático:** Al capturar CO<sub>2</sub> de la atmósfera, las plantas ayudan a reducir la concentración de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la lucha contra el calentamiento global. Se estima que los ecosistemas terrestres absorben aproximadamente 2.6 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año, lo que representa alrededor del 30% de las emisiones globales (Le Quéré et al., 2018). Esta función es especialmente crítica en un contexto donde las emisiones continúan aumentando debido a la actividad humana.
- **Biodiversidad y hábitats:** Las plantas forman la base de los ecosistemas terrestres y son fundamentales para la biodiversidad. Los bosques, por ejemplo, albergan el 80% de la biodiversidad terrestre y son esenciales para la regulación de los ciclos hidrológicos, la conservación del suelo y la provisión de hábitats para una variedad de organismos (Fischer et al., 2012). La pérdida de vegetación puede tener efectos devastadores sobre la biodiversidad y la estabilidad del ecosistema.

- **Mejora de la calidad del aire:** Las plantas mejoran la calidad del aire mediante la absorción de contaminantes y la liberación de oxígeno durante la fotosíntesis. Este proceso no solo contribuye a mantener el equilibrio de oxígeno en la atmósfera, sino que también beneficia la salud pública al reducir la contaminación del aire. Estudios han demostrado que áreas urbanas con mayor cobertura vegetal tienen niveles más bajos de contaminación atmosférica y mejores resultados de salud (Nowak et al., 2014).
- **Ciclo del agua y regulación climática:** Las plantas juegan un papel crucial en el ciclo del agua a través de la transpiración, un proceso mediante el cual el agua es absorbida por las raíces y liberada a la atmósfera desde las hojas. Este proceso no solo contribuye a la formación de nubes y a la precipitación, sino que también ayuda a regular la temperatura local y mantener la humedad del suelo (Lal, 2008). Los ecosistemas vegetales son vitales para el mantenimiento del ciclo del agua, especialmente en regiones propensas a sequías.
- **Prevención de la erosión del suelo:** Las raíces de las plantas ayudan a estabilizar el suelo y prevenir la erosión. Al mantener la estructura del suelo y fomentar la infiltración del agua, las plantas contribuyen a la salud del ecosistema y a la conservación de los recursos hídricos.

### 4.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

La capacidad de las plantas para capturar CO<sub>2</sub> es influenciada por una serie de factores que pueden variar en función de las condiciones ambientales, las características de la planta y las prácticas de manejo. Algunos de los factores más relevantes son:

- **Especie vegetal:** Diferentes especies de plantas presentan tasas de fotosíntesis y almacenamiento de carbono muy variables. Por ejemplo, especies de crecimiento rápido como los álamos y eucaliptos pueden absorber CO<sub>2</sub> a un ritmo más elevado que especies de crecimiento más lento, como los robles o los pinos (González et al., 2021). Además, algunas especies tienen adaptaciones específicas que les permiten prosperar en condiciones extremas, aumentando su capacidad de captura de CO<sub>2</sub>.
- **Condiciones ambientales:** La temperatura, la luz y la disponibilidad de agua son factores críticos que influyen en la fotosíntesis y la captura de CO<sub>2</sub>. La temperatura óptima para la fotosíntesis varía entre especies, y condiciones de estrés hídrico pueden reducir drásticamente la capacidad de las plantas para fijar CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, estudios han demostrado que las sequías prolongadas pueden disminuir la productividad de la fotosíntesis en hasta un 50% en algunas especies (Pérez-López et al., 2016).
- **Gestión del ecosistema:** Las prácticas de manejo, como la reforestación, la agricultura sostenible y la conservación de hábitats naturales, son esenciales para mejorar la capacidad de las plantas para capturar CO<sub>2</sub>. La restauración de ecosistemas degradados puede aumentar significativamente el almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa (Paustian et al., 2016). Asimismo, la promoción de prácticas agrícolas que mejoren la salud del suelo, como la rotación de cultivos y la agricultura de conservación, puede aumentar la captura de carbono.

- **Cambio climático:** El cambio climático tiene efectos complejos sobre la capacidad de las plantas para capturar CO<sub>2</sub>. El aumento de las temperaturas puede acelerar la fotosíntesis en algunas especies, pero también puede aumentar la transpiración y el estrés hídrico. Asimismo, la variabilidad en las precipitaciones puede afectar la disponibilidad de agua, lo que a su vez influye en la productividad de las plantas. Aunque el aumento de CO<sub>2</sub> puede beneficiar el crecimiento de algunas plantas, los efectos del cambio climático podrían contrarrestar estas ventajas (Högy et al., 2013).
- **Interacciones biológicas:** Las interacciones entre especies, como la competencia, el mutualismo y la depredación, también pueden influir en la capacidad de las plantas para capturar CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, las asociaciones entre plantas y micorrizas pueden mejorar la absorción de nutrientes y agua, aumentando así la eficiencia fotosintética y la captura de carbono (Smith & Read, 2008).
- **Contaminación y estrés abiótico:** La contaminación del aire, como el ozono y otros contaminantes, puede afectar negativamente la fotosíntesis y la salud de las plantas. Además, factores como la salinidad del suelo y la contaminación del agua pueden limitar el crecimiento de las plantas y su capacidad para capturar CO<sub>2</sub> (Lehmann et al., 2011).

# 5 METODOLOGÍA Y CRITERIOS DE APLICACIÓN

---

La implementación de la captura de CO<sub>2</sub> mediante material vegetal como medida compensatoria en el marco de la evaluación ambiental requiere un enfoque metodológico riguroso y criterios bien definidos. Este apartado detalla los métodos de investigación, los enfoques de evaluación y los criterios para seleccionar y aplicar adecuadamente las estrategias de captura de carbono en proyectos ambientales.

## 5.1 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Para abordar la captura de CO<sub>2</sub> mediante material vegetal, es fundamental aplicar métodos de investigación que permitan evaluar de manera precisa la efectividad de las diferentes estrategias. Estos métodos pueden incluir:

- **Revisión bibliográfica y análisis documental:** La recopilación de información existente sobre la captura de CO<sub>2</sub>, incluidas investigaciones anteriores, estudios de caso y experiencias en la implementación de medidas compensatorias, es esencial. Esta revisión debe centrarse en datos sobre la capacidad de diferentes especies vegetales para capturar CO<sub>2</sub>, así como en el rendimiento de las prácticas de manejo forestal y agrícola (Le Quéré et al., 2018).
- **Estudios de campo:** La realización de estudios experimentales en campo permite observar y medir directamente el rendimiento de las plantas en condiciones naturales. Se pueden establecer parcelas experimentales donde se planten diferentes especies vegetales y se midan las tasas de fotosíntesis, el crecimiento de la biomasa y la acumulación de carbono en el suelo y en las plantas. Estos estudios también pueden incluir monitoreos de la calidad del aire y otros parámetros ambientales que influyen en la capacidad de captura de carbono.
- **Modelado ecológico:** Los modelos computacionales son herramientas útiles para predecir y simular la capacidad de captura de CO<sub>2</sub> de diferentes ecosistemas vegetales bajo diversas condiciones climáticas y de manejo. Estos modelos permiten evaluar el impacto a largo plazo de la captura de carbono en función de factores como el cambio climático, la gestión del uso del suelo y las interacciones bióticas (Pérez-López et al., 2016).
- **Metodologías de muestreo:** Se pueden emplear diferentes técnicas de muestreo para recolectar datos relevantes. Por ejemplo, se pueden utilizar trampas de respirometría para medir la tasa de captura de CO<sub>2</sub> por parte de las plantas en tiempo real. Asimismo, se puede recurrir a técnicas de análisis de isótopos de carbono para determinar la fuente del carbono almacenado en la biomasa y el suelo (Baldocchi et al., 2010).
- **Monitoreo a largo plazo:** La captura de CO<sub>2</sub> es un proceso continuo que requiere seguimiento a lo largo del tiempo. La implementación de protocolos de monitoreo a largo plazo permite evaluar la efectividad de las medidas adoptadas y hacer ajustes según sea necesario. Esto puede incluir la recolección periódica de datos sobre la salud de las plantas, la diversidad de especies, y la calidad del suelo.

## 5.2 ENFOQUES DE EVALUACIÓN

La evaluación de la captura de CO<sub>2</sub> mediante material vegetal debe considerar diversos enfoques para garantizar que las medidas sean efectivas y sostenibles. Estos enfoques pueden incluir:

- **Evaluación de la capacidad de captura de carbono:** Es crucial cuantificar la capacidad de diferentes especies vegetales para capturar y almacenar carbono. Esto puede lograrse mediante la medición de la biomasa y el contenido de carbono en las plantas y el suelo, utilizando ecuaciones y modelos de estimación basados en datos de crecimiento y densidad (IPCC, 2006). Los coeficientes de captura de carbono específicos para cada especie deben ser documentados para guiar futuras selecciones de especies.
- **Análisis de costes y beneficios:** Es importante realizar un análisis de costes y beneficios que considere no solo los costes económicos de la implementación de medidas de captura de carbono, sino también los beneficios ambientales, sociales y económicos que pueden derivarse. Esto incluye la mejora de la calidad del aire, la restauración de hábitats, y el potencial para generar ingresos a través de mecanismos de compensación de carbono (González et al., 2021).
- **Evaluación de impactos ambientales:** Las medidas de captura de CO<sub>2</sub> deben ser evaluadas en términos de sus impactos ambientales generales. Se deben considerar no solo los beneficios de la captura de carbono, sino también los posibles efectos negativos en la biodiversidad, el uso del suelo y los recursos hídricos. Un enfoque de evaluación ambiental holística, que incluya análisis de riesgo, es esencial para asegurar que las medidas adoptadas sean sostenibles a largo plazo.
- **Participación comunitaria:** Involucrar a las comunidades locales en el proceso de evaluación e implementación es crucial para el éxito de las iniciativas de captura de carbono. La participación de la comunidad puede garantizar que las medidas sean culturalmente apropiadas y que se adapten a las necesidades locales. Además, la educación y la concienciación sobre la importancia de la captura de CO<sub>2</sub> pueden fomentar un mayor apoyo y participación en estos esfuerzos (Lal, 2008).
- **Certificación y estándares de calidad:** La aplicación de estándares de calidad y certificación para proyectos de captura de CO<sub>2</sub> puede garantizar la transparencia y la credibilidad de los resultados obtenidos. Existen diversas iniciativas y protocolos que establecen directrices para la medición y verificación de la captura de carbono, lo que ayuda a asegurar que las prácticas implementadas cumplan con los requisitos establecidos (Paustian et al., 2016).

## 5.3 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE MEDIDAS

La selección de las especies vegetales y las prácticas de manejo para la captura de CO<sub>2</sub> debe basarse en criterios bien definidos que aseguren la efectividad y sostenibilidad de las medidas implementadas. Algunos de estos criterios incluyen:

- **Adaptabilidad al entorno local:** Las especies seleccionadas deben ser adecuadas para las condiciones ambientales locales, como el tipo de suelo, la disponibilidad de agua, y el clima. Especies autóctonas suelen ser preferibles, ya que están adaptadas a las condiciones locales y pueden contribuir a la restauración de la biodiversidad (Fischer et al., 2012).

- **Eficiencia en la captura de carbono:** Las especies deben ser elegidas en función de su capacidad demostrada para capturar y almacenar carbono. Esto puede incluir la selección de especies de crecimiento rápido que produzcan alta biomasa en poco tiempo, así como aquellas que tengan un alto contenido de carbono en sus tejidos (González et al., 2021).
- **Beneficios ecosistémicos:** Además de la captura de CO<sub>2</sub>, las especies seleccionadas deben proporcionar otros beneficios ecosistémicos, como la mejora de la calidad del suelo, la conservación del agua, y el apoyo a la biodiversidad. Las especies que proporcionan hábitats para fauna y que promueven la salud del ecosistema son particularmente valiosas (Nowak et al., 2014).
- **Manejo sostenible:** Las prácticas de manejo adoptadas deben ser sostenibles y no comprometer el futuro de los recursos naturales. Esto incluye el uso responsable del agua, la reducción de insumos químicos, y la implementación de técnicas de manejo que minimicen el impacto ambiental.
- **Viabilidad económica:** Es fundamental que las medidas de captura de CO<sub>2</sub> sean económicamente viables, tanto para la implementación inicial como para el mantenimiento a largo plazo. Se deben considerar las posibles fuentes de financiamiento, como incentivos gubernamentales, donaciones o mecanismos de mercado de carbono.

## 5.4 CAPACIDAD DE SECUESTRO DE CO<sub>2</sub> EN EL MONTE MEDITERRÁNEO

### 5.4.1 CARACTERÍSTICAS MONTE MEDITERRÁNEO

Se trata de un bosque xerófilo, con un sotobosque leñoso, aromático y espinoso. Contiene un número modesto de especies vegetales y presenta una marcada tendencia hacia la desertificación, ya sea por la destrucción de la capa vegetal o por la acción erosiva de las lluvias sobre el suelo.

Las especies vegetales están adaptadas al fuego, que es recurrente durante los veranos secos. Por ello, poseen cortezas gruesas y resistentes que les permiten protegerse, así como hojas cubiertas de cera para minimizar la pérdida de agua en los meses cálidos.

En estos bosques predominan las especies perennifolias, como la encina, en medio de una vegetación xerófila y esclerófila, adaptada a la aridez estival. También son comunes el lentisco, el aladierno, diversas lianas como la zarzaparrilla, y arbustos como las jaras, el romero y el tomillo. Entre las especies que producen flores se encuentran el pino carrasco, el pino piñonero, la sabina y el madroño; mientras que en las regiones más húmedas abundan el quejigo y el alcornoque. Al transitar hacia otras regiones, este bosque puede conformar bosques mixtos con otras especies frondosas o bosques de galería.

#### 5.4.1.1 RELIEVE DEL BOSQUE MEDITERRÁNEO

El bosque mediterráneo predomina en relieves planos y llanuras, con la ocasional presencia de serranías y, sobre todo, en valles. Las montañas circundantes suelen ser jóvenes, con mesetas relevantes y altamente pobladas. Se caracterizan por tener suelos bastante delgados, donde la roca madre se encuentra a poca profundidad. Esto los hace especialmente vulnerables a la desertificación, ya que la falta de vegetación permite que las lluvias intensas, concentradas en periodos breves, arrastren una significativa proporción del suelo. La acción antrópica ha provocado que estos ecosistemas tengan un alto grado de fragmentación, dificultando el intercambio genético entre las especies.



#### 5.4.1.2 CLIMA DEL BOSQUE MEDITERRÁNEO

El clima mediterráneo se caracteriza por inviernos templados, otoños cálidos, primaveras lluviosas y veranos secos, durante los cuales son comunes los incendios forestales, a los que la vegetación está adaptada (vegetación pirófila). En promedio, la temperatura se mantiene por encima de los 20 °C, con variaciones estacionales. Las precipitaciones no son muy abundantes a lo largo del año, aunque pueden superar los 1000 mm en determinadas regiones. Este tipo de clima se distingue del clima mediterráneo costero (más estable y húmedo) y del clima mediterráneo continental (más seco y con mayores variaciones térmicas).

#### 5.4.1.3 ÁRBOLES DEL BOSQUE MEDITERRÁNEO

En el bosque mediterráneo, encontramos árboles del género *Quercus*, que incluye las encinas (*Quercus ilex*), los alcornoques (*Quercus suber*) y los robles (*Quercus robur*). Las encinas son conocidas por producir bellotas.

En el género *Pinus*, se pueden identificar diversas especies de pinos, como el pino piñonero (*Pinus pinea*), el pino negro (*Pinus nigra*) y el pino silvestre (*Pinus silvestris*), que se caracterizan por tener hojas en forma de acícula, las cuales pierden muy poca agua. Todas estas plantas son gimnospermas.

#### 5.4.1.4 PLANTAS HERBÁCEAS Y ARBUSTIVAS DEL BOSQUE MEDITERRÁNEO

Entre las especies arbustivas y herbáceas, encontramos plantas de porte más grande, como las jaras (*Cistus*) y las retamas (*Retama*), así como arbustos del género *Juniperus* (*Juniperus communis*, *Juniperus oxycedrus*), junto con matorrales más pequeños como tomillos (*Thymus*), romeros (*Rosmarinus*), lavandas (*Lavandula*) y cardos (*Onopordum*). Dependiendo de la época del año, también podemos encontrar hinojo, cicuta y adormidera.

### 5.4.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Durante la fotosíntesis, las plantas absorben dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera y, mediante la energía de la luz solar, disocian el carbono y lo combinan con otros elementos para producir las moléculas orgánicas que conforman las hojas, las ramas, los troncos y las raíces. Sin embargo, esta perspectiva suele plantearse teniendo en cuenta únicamente las plantas en sí mismas. Cuando consideramos también los suelos, que almacenan carbono orgánico procedente de los detritos vegetales y animales, así como de los microorganismos, y evaluamos el proceso en el ecosistema en su conjunto, el balance resulta más complejo.

Cada año, las tierras emergidas retiran de la atmósfera aproximadamente un 30% del CO<sub>2</sub> emitido por las actividades humanas, de manera que ese carbono queda “secuestrado” en el suelo o la vegetación. Los suelos representan un almacén con una capacidad tres veces mayor que la de las plantas y retienen el doble de carbono del que existe en la atmósfera. Así, incluso si todas las tierras emergidas del planeta alcanzaran su máxima capacidad de vegetación, su biomasa solo lograría retirar el carbono correspondiente a diez años de nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, si se mantuvieran las tasas actuales de emisión.

Además, el carbono almacenado en los suelos es mucho más estable y duradero que el de la vegetación. Este suele permanecer en el suelo durante siglos o incluso milenios. En comparación, el carbono secuestrado por las plantas es más lábil, ya que, al morir, parte de su carbono regresa a la atmósfera en un intervalo de tiempo relativamente corto.

Los cambios en el suelo y la vegetación están estrechamente relacionados y dependen del tipo de vegetación. En los árboles, el aumento de CO<sub>2</sub> estimula el crecimiento vegetal y el secuestro de carbono en sus tejidos; sin embargo, esto suele traducirse en un descenso de las reservas de carbono en el suelo. Por el contrario, los ecosistemas de pastizales y herbazales presentan pequeños incrementos en la biomasa, que, en general, van acompañados de grandes incrementos en las reservas de carbono del suelo.

Las micorrizas se desarrollan en las raíces y son el resultado de la simbiosis entre una gran diversidad de hongos y las plantas. En esta asociación, la planta proporciona al hongo hidratos de carbono y vitaminas que este no puede sintetizar por sí mismo; a su vez, el hongo ofrece a la planta una extensa red de hifas que aumenta su capacidad para captar nutrientes y agua.

Ante un aumento de CO<sub>2</sub> que propicie el crecimiento vegetal, las plantas se ven forzadas a captar más recursos del suelo (agua y nutrientes), lo que estimula la actividad de la red de microorganismos que viven asociados a sus raíces, incluyendo las micorrizas. Sin embargo, debido al funcionamiento de su metabolismo, la mayoría de estos microorganismos consumen hidratos de carbono del suelo, utilizándolos como “alimento”, y emiten CO<sub>2</sub> a la atmósfera como subproducto, lo que disminuye el carbono secuestrado en el suelo. Este fenómeno es especialmente acentuado en los ecosistemas dominados por árboles, ya que, al crecer más, requieren más nutrientes y estimulan más la actividad de las micorrizas y otros microorganismos, en comparación con los ecosistemas dominados por matorrales y plantas herbáceas.

Es fundamental encontrar un equilibrio positivo entre el carbono absorbido y el emitido. Los matorrales representan una estructura intermedia entre las herbáceas y los árboles. Además de proporcionar refugio y follaje en los sistemas agrosilvopastoriles con recursos de agua limitados, los matorrales disminuyen la erosión, mantienen la biodiversidad, diversifican el paisaje y facilitan la regeneración arbórea. Su presencia está en aumento, en gran parte debido al abandono de cultivos y al incremento de los incendios.

La relación *Root:Shoot* sirve para estimar los efectos del monte y el cambio de uso del suelo, según lo recogido en los inventarios nacionales de emisión de gases de efecto invernadero.

Para calcular el porcentaje de materia seca, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de materia seca} = (B_{\text{seca}} (\text{g}) / B_{\text{húmeda}} (\text{g})) \cdot 100 \quad (8)$$

donde:

- B<sub>seca</sub>: es la masa de la muestra después de haber sido secada, es decir, solo la materia sólida sin agua/humedad.
- B<sub>húmeda</sub>: es la masa de la muestra antes de secarla, incluyendo tanto la materia sólida como el agua/humedad presente

Una vez obtenidos los cálculos de la parte aérea y subterránea en materia seca, se procede a calcular la relación *Root:Shoot*, donde R representa la relación entre el peso seco de la raíz y el peso seco de la parte aérea:

$$R = W_{\text{root}} / W_{\text{shoot}} \quad (9)$$

donde:

- W<sub>root</sub>: es el peso seco de la raíz.
- W<sub>shoot</sub>: es el peso seco de la parte aérea

La estimación del carbono almacenado en la biomasa subterránea se realiza mediante un estudio biométrico de la parte aérea. Por ejemplo, en un análisis de captura de CO<sub>2</sub>, se analizó la concentración de carbono en cada uno de los componentes de dos matorrales: *Cistus ladanifer* y *Erica arborea* (Vallejo et al., 2012).

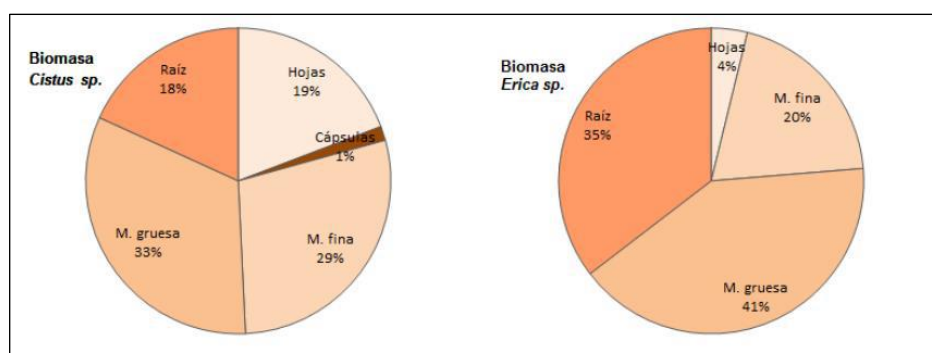


Figura 1.- Distribución de la biomasa de *Cistus ladanifer* L. y *Erica arborea* L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Martín-Ramos, P., & Martín-Gil, J., s.f.

Los valores del contenido de carbono no presentaron variaciones significativas entre las partes aérea y radical, con porcentajes de  $48.38 \pm 1.02\%$  en *Cistus ladanifer* y  $50.56 \pm 1.38\%$  en *Erica arborea*. Estos valores son consistentes con los proporcionados por el Mapa Forestal Español 1:25,000 (MFE25), que indican  $49.64 \pm 1.04\%$  y  $50.57 \pm 1.62\%$ , respectivamente, y son muy cercanos al 50% propuesto por el IPCC.

Los valores de la relación R son los siguientes:

- *Cistus ladanifer*:  $R=0.22$
- *Erica arborea*:  $R=0.55$

Es importante señalar que la fenología influye en la relación R. El análisis elemental confirma que el porcentaje de carbono en las fracciones de las partes aéreas y radical no difiere de manera significativa. Por lo tanto, el uso de un valor global de 0.5 como contenido de carbono en la planta puede considerarse apropiado para ambas especies. Sin embargo, el porcentaje de distribución de la biomasa varía significativamente entre ellas.

En lo que respecta al almacenamiento de carbono, dado que el contenido de este no depende de la fracción analizada, sino que está directamente relacionado con la biomasa, se puede cuantificar de forma directa a través de la biomasa aérea, que es relativamente fácil de determinar, mediante la relación *Root:Shoot*. De esta forma, al tener en cuenta las formaciones radiculares, se puede concluir que los reservorios de carbono son mayores.

Según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), existen dos metodologías para medir el CO<sub>2</sub> absorbido, ambas metodologías de cálculo se encuentran en el marco de las directrices y orientaciones sobre buenas prácticas del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), utilizadas a su vez en la elaboración del Inventario Nacional de gases de efecto invernadero de España.:

1. Ex post: Cálculo basado en los datos reales de la repoblación en un momento concreto.
2. Ex ante: Cálculo basado en el crecimiento de las especies durante el proyecto.

En ambos casos, se considerará únicamente la biomasa viva (tanto aérea como subterránea), excluyendo de la contabilización la materia orgánica muerta y el carbono orgánico del suelo.

#### 5.4.2.1 CÁLCULO EX ANTE:

Se considera necesario facilitar una estimación de las absorciones de CO<sub>2</sub> que puede generar un proyecto, con el fin de conocer de manera anticipada y aproximada cuántas absorciones se podrán ceder para compensación. Este cálculo se basa en la determinación de las absorciones de CO<sub>2</sub> por ejemplar plantado, lo que permite extrapolar los resultados a todo el proyecto<sup>2</sup>.

La complejidad en la determinación de la metodología radica en la gran heterogeneidad del nivel de detalle de la información disponible actualmente. Se ha detectado que existe abundante información sobre el crecimiento de algunas especies forestales españolas, mientras que para otras la información es escasa. Además, las fuentes de información son diversas, variando en el nivel de detalle y los datos de partida proporcionados.

Para el cálculo de las absorciones de dióxido de carbono, se considera, como punto de partida, la siguiente fórmula de las *Orientaciones sobre Buenas Prácticas en el Sector Cambio de Uso de la Tierra y la Silvicultura de 2003* del IPCC:

$$\Delta C = \Delta C_{bv} \quad (10)$$

donde:

- $\Delta C$ : variación anual de las reservas de carbono, en t C/año.
- $\Delta C_{bv}$ : variación anual de las reservas de carbono en la biomasa viva, tanto subterránea como aérea.

La expresión se descompone de la siguiente manera:

$$\Delta C = \Delta C_{bv} = \Delta C_{\text{crecimiento}} + \Delta C_{\text{pérdidas}} \quad (11)$$

<sup>2</sup> IPCC, 2003, Orientaciones sobre Buenas Prácticas en el Sector Cambio de Uso de la Tierra y la Silvicultura

donde:

- $\Delta C_{\text{crecimiento}}$ : aumento de las reservas de carbono en la biomasa viva sobre el suelo y bajo el suelo por efecto del crecimiento, en toneladas de carbono, en t C.
- $\Delta C_{\text{pérdidas}}$ : disminución de las reservas de carbono en la biomasa viva por efecto de las pérdidas derivadas de la recolección, de la recogida de leña y de las perturbaciones, en toneladas de carbono, en t C.

Las pérdidas se incluirán de forma implícita en la fórmula, ya que los cálculos se realizan en función del número de pies<sup>3</sup> que se prevé que sobrevivirán después de un determinado número de años. De este modo, la fórmula que expresa la variación de las reservas de carbono por pie, y que se utilizará para los cálculos ex ante, queda de la siguiente manera:

$$\Delta C = \Delta C_{\text{bv}} = \Delta C_{\text{crecimiento}} = \sum [V_{\text{ncc}} \cdot \text{FC} \cdot \text{FEB} \cdot \text{D} \cdot (1+R)] \quad (12)$$

donde:

- $V_{\text{ncc}}$ : volumen maderable con corteza según especie para el año n, expresado en m<sup>3</sup>.
- FC: fracción de carbono de la materia seca, en t C/t m.s.
- FEB: factor de expansión de biomasa para convertir el incremento neto anual (incluida la corteza) en incremento de biomasa arbórea sobre el suelo, sin dimensiones.
- D: densidad básica de la madera, en t m.s./m<sup>3</sup>.
- R: relación raíz-vástago, sin dimensiones.

Los valores según especies de los parámetros de la fórmula anterior se obtienen de diversas fuentes:

1. El producto FEB·D se obtiene, para cada especie, a partir de los datos incluidos en el *Informe de Inventarios de GEI de España 1990-2012* (2014). Este informe se basa en cálculos realizados por el CREAM (Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales) para cada especie. Los valores han sido validados intencionalmente a través de la Acción Cost E21, lo que los hace más ajustados a la realidad nacional en comparación con los factores por defecto del IPCC y se consideran conservadores. Los valores de FEB·D que no han sido calculados por el CREAM se obtienen mediante comparación con especies similares o se les asigna el valor por defecto de 0,8 (1,6 · 0,5), de acuerdo con la publicación IPCC-1996.
2. El valor de la fracción de carbono de la materia seca (FC) es el que se toma por defecto en el IPCC, fijado en 0,5 t C/t m.s.
3. Los valores del factor de expansión de las raíces (R) se obtienen a partir de los datos proporcionados en el siguiente artículo: Ruiz Peinado, G., Montero, M., & del Río, M. (2014). *Modelos para estimar las reservas de carbono en la biomasa de especies de coníferas y de frondosas en España*. Para las especies no incluidas en el estudio, se han hecho asimilaciones entre especies consideradas como similares en cuanto a esta variable
4. En cuanto al volumen maderable con corteza ( $V_{\text{ncc}}$ ):
  - La relación volumen/tiempo se determina a partir de las siguientes fuentes:
    - Madrigal Collazo, J., Álvarez González, R., Rodríguez Soallero, A., & Rojo Alboreca. Fundación Conde del Valle de Salazar (1999). *Tablas de producción para los montes españoles*.
    - Tabla 7 de las publicaciones “Las Coníferas en el Primer Inventario Forestal Nacional” y “Las Frondosas en el Primer Inventario Forestal Nacional” (1979).

---

<sup>3</sup> Plantas individuales

- Para las especies no incluidas en las tablas anteriores, se calcula la relación tiempo-diámetro para posteriormente determinar el volumen, utilizando:
  - Anexo 2 (Ajustes parabólicos D-t) de las publicaciones “Las Coníferas en el Primer Inventario Forestal Nacional” y “Las Frondosas en el Primer Inventario Forestal Nacional” (1979).
  - Tabla 201 del Tercer Inventario Forestal Nacional (1997-2007).
- Para las especies *Quercus ilex*, *Quercus suber* y *Larix spp.*, la relación diámetro-tiempo se ha obtenido a partir de la información incluida en el *Informe de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en España 1990-2012*. La relación diámetro-volumen se ha extraído de la Tabla 201 del Tercer Inventario Forestal Nacional.

Según las *Orientaciones sobre Buenas Prácticas en el Sector Cambio de Uso de la Tierra y la Silvicultura de 2003* del IPCC (GPG-LULUCF 2003), la fórmula de partida para el cálculo de las absorciones de CO<sub>2</sub> generadas por un proyecto de reforestación es la siguiente:

$$\text{Remociones netas antropogénicas (CO}_2\text{)} = \text{CO}_2 \text{ proyecto} - \text{CO}_2 \text{ línea base}^4 - \text{CO}_2 \text{ fugas}^5 \quad (13)$$

Por otro lado, la variación de las reservas de carbono obtenidas por un proyecto de reforestación, según GPG-LULUCF 2003, se determina considerando los siguientes depósitos:

$$\Delta C = \Delta C_{bv} + \Delta C_{mom} + \Delta C_{suelos} \quad (14)$$

donde:

- $\Delta C_{mom}$ : variación anual de las reservas de carbono en la materia orgánica muerta, como madera en descomposición y restos de materia vegetal, en t C/año.
- $\Delta C_{suelos}$ : variación anual de carbono almacenado en el suelo, en t C/año.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, para los cálculos se considerará únicamente la variación de las reservas de carbono en la biomasa viva ( $\Delta C_{bv}$ ).

$$\Delta C = \Delta C_{bv} = \Delta C_{crecimiento} + \Delta C_{pérdidas} = \sum [V_{ncc} \cdot FC \cdot FEB \cdot D \cdot (1+R)] \quad (15)$$

Por último, la conversión de toneladas de carbono (t C) a toneladas de CO<sub>2</sub> (t CO<sub>2</sub>) se lleva a cabo mediante la relación entre el peso molecular del CO<sub>2</sub> y el peso del átomo de carbono:

$$\Delta \text{CO}_2 = \Delta C \cdot (44/12) \quad (16)$$

<sup>4</sup> Escenario "sin intervención"

<sup>5</sup> Emisiones indirectas fuera del área del proyecto de reforestación

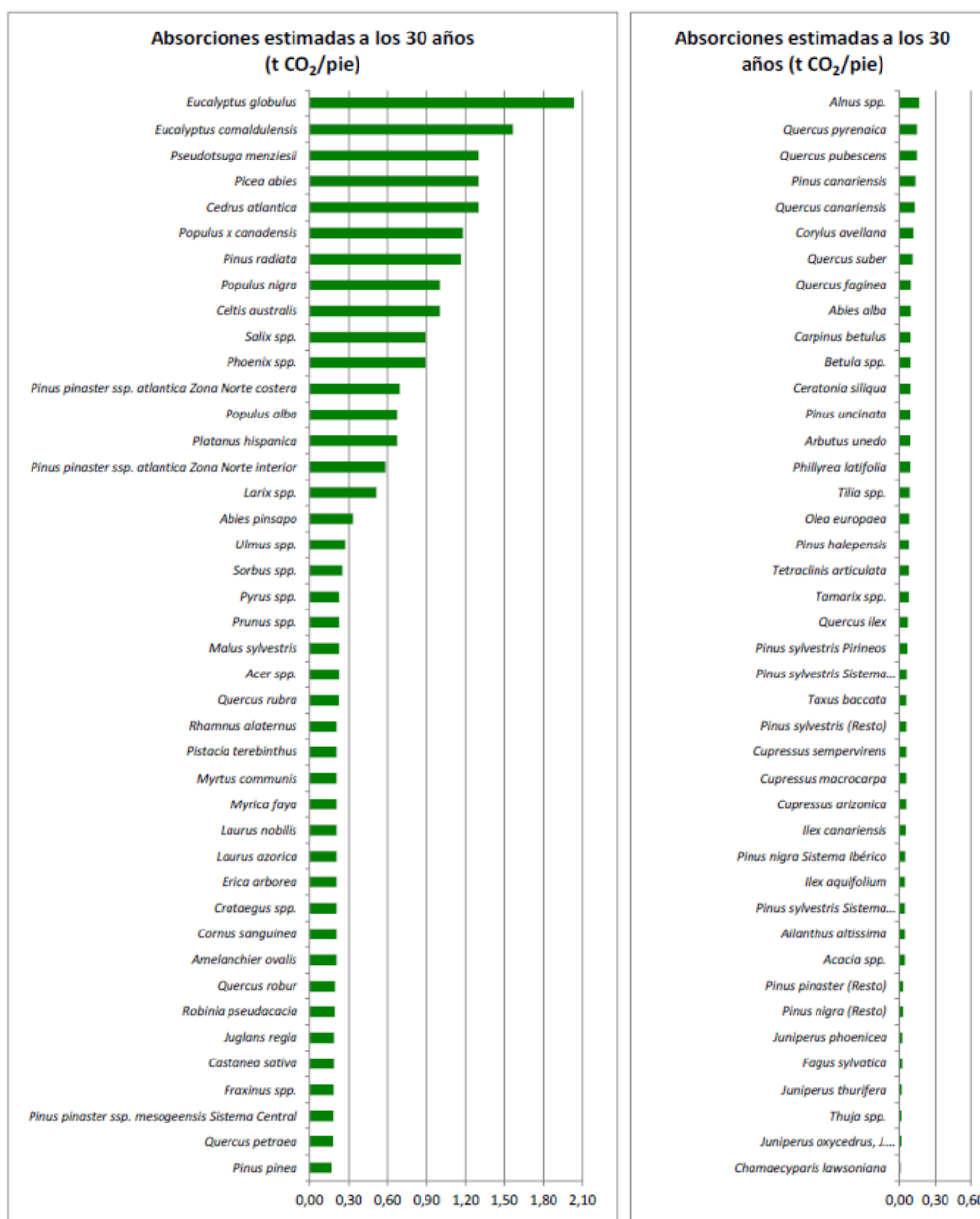


Figura 2.- Absorciones unitarias estimadas a los 30 años según especie.

#### 5.4.2.2 CÁLCULO EX POST:

Se trata de estimaciones en el momento en que las absorciones están teniendo lugar. Así, los cálculos se realizan en base a modelos que estiman el peso de la biomasa seca de los árboles según especies a partir de datos reales de la repoblación en un momento concreto (especie, diámetro y altura).

Una vez se ha determinado el peso de la biomasa seca a partir de estas ecuaciones, el peso del carbono fijado se calculará en función del valor de FC (fracción de carbono contenido en la materia seca) que, de forma genérica, es de 0,5 kg C /kg m.s. (IPCC, 2003). Por último, como se explicaba en la ecuación 16, la conversión de C fijado a CO<sub>2</sub>, se realiza a partir de la relación de los pesos moleculares, es decir, multiplicando el valor del C fijado por 44/12.

Los modelos de estimación de biomasa se estructuran de la siguiente manera:

- Variables explicadas: Peso seco de las distintas fracciones de biomasa del árbol.
- Variables independientes: Diámetro norma y altura total del árbol.

- Análisis estadístico: Ajuste de sistemas de ecuaciones mediante distintos procedimientos.

Se ha realizado una revisión bibliográfica para conocer la mejor información disponible al respecto y, por el momento, se dispone de ecuaciones para un total de 28 especies forestales arbóreas cuyas fuentes se indican a continuación<sup>6</sup>:

- Gregorio Montero, Ricardo Ruiz-Peinado, Miren Muñoz, 2014, Modelos de biomasa para estimar los stocks de carbono para coníferas y frondosas en España, CIFOR-INIA.
  - *Abies alba*
  - *Abies pinsapo*
  - *Alnus glutinosa*
  - *Castanea sativa*
  - *Ceratonia siliqua*
  - *Eucalyptus globulus*
  - *Fagus sylvatica*
  - *Fraxinus angustifolia*
  - *Juniperus thurifera*
  - *Olea europaea*
  - *Pinus canariensis*
  - *Pinus halepensis*
  - *Pinus nigra*
  - *Pinus pinaster*
  - *Pinus pinea*
  - *Pinus sylvestris*
  - *Pinus uncinata*
  - *Populus x euroamericana*
  - *Quercus canariensis*
  - *Quercus faginea*
  - *Quercus ilex*
  - *Quercus pyrenaica*
  - *Quercus suber*
- Esteban Gómez-García, Modelos dinámicos de crecimiento para rodales regulares de *Betula pubescens* Ehrh., y de *Quercus robur* L. en Galicia, (nº 5).
  - *Betula* ssp.
- Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. Facultad de Forestales, Universidad politécnica de Santiago de Compostela, (nº3).
  - *Pinus pinaster* (atlántico)
  - *Pinus radiata*

---

<sup>6</sup> MITECO, Guía para la estimación de absorciones de Dióxido de Carbono

- Carbon and nutrient stocks in mature *Quercus robur* L. stands in NW Spain. Facultad de Forestales, Universidad politécnica de Santiago de Compostela, (nº4).
  - *Quercus robur*
- Pérez-Cruzado, C., Merino, A., Rodríguez-Soalleiro, R., 2011, Biomass and Bioenergy, A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in northwest Spain (nº 35)
  - *Eucalyptus nitens*



# 6 PROPUESTA

---

La necesidad de mitigar el cambio climático y proteger la biodiversidad ha llevado a un aumento en la búsqueda de estrategias efectivas para la captura de CO<sub>2</sub>. La captura verde, que implica la utilización de ecosistemas y vegetación para capturar y almacenar carbono, representa una solución viable y sostenible. Esta propuesta se enfoca en la integración de la captura verde como medida compensatoria dentro del marco de la evaluación ambiental, destacando su importancia y proporcionando un enfoque detallado para su implementación.

## 6.1 OBJETIVO DE LA PROPUESTA

El objetivo principal de esta propuesta es establecer un marco para incluir la captura verde en las medidas de compensación de la evaluación ambiental. Esto implica la promoción de prácticas que aumenten la captura de carbono mediante la restauración de ecosistemas y la reforestación. Se busca no solo compensar las emisiones de CO<sub>2</sub>, sino también restaurar la salud del medio ambiente y promover el bienestar de las comunidades locales.

## 6.2 JUSTIFICACIÓN

La inclusión de la captura verde en las medidas de compensación es esencial por varias razones clave:

- **Mitigación del cambio climático:** Los ecosistemas vegetales, incluidos bosques y humedales, tienen la capacidad de capturar grandes cantidades de CO<sub>2</sub>. Según Le Quéré et al. (2018), los bosques y otros ecosistemas naturales son responsables de la captura de aproximadamente 2.6 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> al año, lo que destaca su papel crucial en la lucha contra el cambio climático.
- **Restauración de la biodiversidad:** La captura verde no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también promueve la biodiversidad. La restauración de hábitats mediante la reforestación y la creación de corredores ecológicos ayuda a preservar las especies autóctonas y a mejorar la resiliencia de los ecosistemas frente a cambios ambientales (Fischer et al., 2012).
- **Beneficios socioeconómicos:** La implementación de medidas de captura verde puede generar beneficios significativos para las comunidades locales, incluyendo oportunidades de empleo en la reforestación, la gestión sostenible de los recursos naturales y el ecoturismo. Estos beneficios pueden contribuir a la mejora de la calidad de vida y a la creación de una economía más sostenible (Lal, 2008).
- **Cumplimiento de políticas ambientales:** La inclusión de la captura verde en las medidas de compensación está alineada con las políticas ambientales y acuerdos internacionales, como el Acuerdo de París, que abogan por la reducción de emisiones y la conservación de ecosistemas. Esta alineación proporciona un marco legal y normativo que respalda la implementación de estas prácticas.

## 6.3 ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN

Para llevar a cabo la propuesta, se deben considerar diversas estrategias de implementación que aseguren la efectividad de la captura verde como medida de compensación. A continuación, se detallan estas estrategias:

1. **Identificación de áreas prioritarias:** Realizar un análisis geoespacial para identificar áreas degradadas y con potencial de captura de carbono. Este análisis debe considerar factores como el tipo de suelo, la topografía, la disponibilidad de agua y las condiciones climáticas. Utilizar herramientas como sistemas de información geográfica (SIG) permitirá una mejor visualización y planificación (Zomer et al., 2014).

2. **Selección de especies vegetales:** Es crucial seleccionar especies autóctonas y adaptadas a las condiciones locales para maximizar la efectividad de la captura de carbono. Estas especies deben ser evaluadas en función de su tasa de crecimiento, su capacidad para almacenar carbono y su rol en el ecosistema. Además, se deben considerar factores como la resistencia a plagas y enfermedades, así como su capacidad para mejorar la calidad del suelo (González et al., 2021).
3. **Desarrollo de programas de reforestación y restauración:** Implementar programas que fomenten la reforestación y la restauración de ecosistemas, estableciendo un enfoque participativo que incluya a las comunidades locales. Estos programas deben estar diseñados para restaurar la vegetación autóctona y aumentar la diversidad biológica. La utilización de métodos como la siembra directa y la agroforestería puede ser efectiva para promover la regeneración natural y mejorar la captura de carbono (Murray et al., 2019).
4. **Monitoreo y evaluación continua:** Establecer un sistema riguroso de monitoreo y evaluación para medir la efectividad de las medidas de captura verde. Este sistema debe incluir indicadores de desempeño, como las tasas de captura de CO<sub>2</sub>, el crecimiento de la vegetación y la salud del ecosistema. La recopilación de datos debe realizarse de manera regular, permitiendo ajustes en las estrategias implementadas y garantizando la transparencia en la comunicación de resultados a las partes interesadas (Dandois et al., 2020).
5. **Educación y sensibilización comunitaria:** Implementar programas de educación y sensibilización dirigidos a las comunidades locales sobre la importancia de la captura de carbono y los beneficios de la restauración ecológica. Estas iniciativas pueden incluir talleres, campañas informativas y actividades prácticas que fomenten la participación activa de los ciudadanos en la implementación de prácticas de captura verde.

## 6.4 CONSIDERACIONES Y DESAFÍOS

La implementación de la captura verde como medida de compensación presenta varios desafíos que deben ser abordados para asegurar su éxito:

- **Financiación y recursos:** La disponibilidad de recursos financieros es crucial para la ejecución de proyectos de captura verde. Es necesario explorar diversas fuentes de financiamiento, como subvenciones gubernamentales, inversiones privadas y donaciones de organizaciones no gubernamentales. Además, se deben establecer mecanismos de mercado de carbono que permitan a las empresas compensar sus emisiones a través de inversiones en proyectos de captura verde (Bennett et al., 2019).
- **Compromiso de las partes interesadas:** La colaboración entre diferentes actores, incluidos gobiernos, comunidades locales, ONGs y el sector privado, es esencial para el éxito de las iniciativas de captura verde. Se deben establecer mecanismos de participación que permitan la inclusión de diversas perspectivas y el desarrollo de un enfoque colaborativo para la implementación de medidas de compensación.
- **Cambio climático y adaptabilidad:** Es importante considerar el impacto del cambio climático en las especies seleccionadas y en las prácticas de manejo. Las condiciones climáticas cambiantes pueden afectar la viabilidad de ciertas especies y la efectividad de las medidas de captura. Se debe promover la investigación sobre especies resistentes y prácticas adaptativas que aseguren la sostenibilidad a largo plazo de las iniciativas (Omar et al., 2021).
- **Evaluación de riesgos ambientales:** Las prácticas de captura verde deben ser evaluadas en términos de sus impactos ambientales generales. Es fundamental llevar a cabo evaluaciones de riesgo que identifiquen posibles efectos negativos en la biodiversidad, el uso del suelo y la calidad del agua. Esto asegurará que las medidas implementadas no comprometan la salud del ecosistema y cumplan con los estándares ambientales requeridos.

# 7 CONCLUSIONES

---

El presente Trabajo de Fin de Máster ha explorado la viabilidad de incluir la captura de CO<sub>2</sub> mediante material vegetal como medida compensatoria dentro del marco de la evaluación ambiental, ofreciendo un enfoque integral que destaca la importancia de las prácticas sostenibles en la mitigación del cambio climático. A través de un análisis detallado de los conceptos fundamentales, las metodologías de captura de carbono y la propuesta de integración de la captura verde en las políticas ambientales, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

La captura de CO<sub>2</sub> mediante material vegetal no solo representa una estrategia efectiva para compensar las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también contribuye a la restauración de ecosistemas y la mejora de la calidad del medio ambiente. Este enfoque se alinea con las directrices internacionales y los compromisos establecidos en iniciativas como la *Misión Ciudades Inteligentes y Climáticamente Neutras* de la Unión Europea, que subraya la necesidad de adoptar soluciones basadas en la naturaleza para enfrentar la crisis climática.

La *Misión Ciudades Inteligentes y Climáticamente Neutras* tiene como objetivo que 100 ciudades europeas alcancen la neutralidad climática para 2030, promoviendo la innovación en áreas como la planificación urbana sostenible, la movilidad y la eficiencia energética. Uno de los ejes fundamentales de esta misión es la implementación de soluciones basadas en la naturaleza, incluyendo la creación y restauración de espacios verdes urbanos. Los árboles, jardines y parques no solo contribuyen a la captura de CO<sub>2</sub>, sino que también mejoran la calidad del aire, reducen las temperaturas urbanas y promueven la biodiversidad local.

El uso de la captura de CO<sub>2</sub> mediante vegetación en el contexto urbano, como parte de esta misión, ofrece múltiples beneficios. Además de contribuir a la neutralidad climática, mejora la habitabilidad de las ciudades y su resiliencia ante los impactos del cambio climático. La capacidad de los ecosistemas vegetales, especialmente los bosques y humedales, para capturar y almacenar carbono se ha documentado ampliamente, demostrando su relevancia en la lucha contra el cambio climático (Le Quéré et al., 2018). Esta estrategia no solo es relevante a nivel global, sino también en la transformación urbana que promueve la *Misión Ciudades Inteligentes y Climáticamente Neutras*.

A lo largo del trabajo, se ha argumentado que la inclusión de la captura verde en las medidas de compensación ofrece múltiples beneficios ecosistémicos y socioeconómicos. Además de la compensación de las emisiones de CO<sub>2</sub>, esta práctica puede mejorar la biodiversidad, conservar el agua y promover la salud del suelo, generando así un efecto positivo en la resiliencia de los ecosistemas (Fischer et al., 2012). Las iniciativas de reforestación y restauración no solo restauran el equilibrio ecológico, sino que también pueden proporcionar oportunidades económicas y sociales a las comunidades locales, contribuyendo a su bienestar y desarrollo sostenible.

La propuesta de implementación de la captura verde presentada en este trabajo resalta la importancia de un enfoque holístico que involucre a múltiples actores, incluidos gobiernos, comunidades locales, ONGs y el sector privado. Este enfoque colaborativo es esencial para garantizar la efectividad y sostenibilidad de las iniciativas de captura de carbono. Asimismo, se ha subrayado la necesidad de un sistema de monitoreo y evaluación que permita medir el impacto de estas medidas, asegurando la transparencia y la adaptabilidad en la gestión de los proyectos implementados.

Sin embargo, la inclusión de la captura verde en las medidas de compensación enfrenta varios desafíos. La financiación adecuada, el compromiso de las partes interesadas y la adaptación a las condiciones climáticas cambiantes son factores cruciales que deben abordarse para garantizar el éxito de estas iniciativas. La búsqueda de recursos financieros a través de mecanismos de mercado de carbono y la promoción de la participación comunitaria son pasos fundamentales para superar estos obstáculos y maximizar los beneficios de la captura verde.

Es importante resaltar la oportunidad de plantear la captura de CO<sub>2</sub>, ya sea mediante captura verde, captura azul u otro tipo de captura, como una medida compensatoria en la evaluación ambiental para aquellos planes, programas o proyectos en los que las medidas correctoras, así como las MTD<sup>7</sup> aplicables, no puedan lograr una minimización suficiente del impacto ambiental vinculado al plan, programa o proyecto propuesto.

La captura podría integrarse en iniciativas de reforestación, restauración de áreas degradadas (como aquellas afectadas por incendios forestales, inundaciones, zonas industriales abandonadas, terrenos agrícolas agotados, etc.) o planes de cambio climático en espacios urbanos alineados con compromisos internacionales, como el Acuerdo de París, y con iniciativas específicas de la Unión Europea, como la *Misión Ciudades Inteligentes y Climáticamente Neutras*, sin necesidad de que dichas iniciativas estén vinculadas al espacio geográfico específico donde se plantea el plan, programa o proyecto sometido a evaluación ambiental. Este enfoque permite una aplicación más flexible y eficaz de las estrategias de captura de CO<sub>2</sub>, en beneficio tanto del medio ambiente como de las comunidades locales, asegurando así un futuro más sostenible y resiliente ante los desafíos del cambio climático.

En conclusión, la investigación llevada a cabo en este Trabajo de Fin de Máster ha demostrado que la captura de CO<sub>2</sub> mediante material vegetal es una herramienta valiosa en la lucha contra el cambio climático y debe ser integrada de manera efectiva en las medidas compensatorias de la Evaluación Ambiental. La implementación de prácticas sostenibles no solo contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también promueve la restauración ecológica y el desarrollo sostenible.

---

<sup>7</sup> Mejores Técnicas Disponibles

# REFERENCIAS

---

- Ahn, S., et al. (2019). Advances in CO<sub>2</sub> capture technology: A review. *Environmental Science & Technology*, 53(14), 8170-8186. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01777>
- Alongi, D. M. (2014). Carbon payments for mangrove conservation: A global review. *Ecological Economics*, 107, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.08.004>
- Baldocchi, D. D., et al. (2010). Forecasting global change: a case for ecological forecasting. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(7), 360-368. <https://doi.org/10.1890/090126>
- Bennett, N. J., et al. (2019). The role of social capital in the management of the marine environment: A case study of small-scale fisheries. *Ocean & Coastal Management*, 174, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.04.001>
- BOE. (2013). Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental. *Boletín Oficial del Estado*, 296, 98151-98354. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2013-12913>
- Canadell, J. G., & Raupach, M. R. (2008). Managing forests for climate change mitigation. *Science*, 320(5882), 1456-1457. <https://doi.org/10.1126/science.1155458>
- Coffman, M., et al. (2020). The role of direct air capture in climate change mitigation. *Environmental Science & Technology*, 54(8), 4911-4921. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01973>
- Dandois, J. P., et al. (2020). The role of remote sensing in quantifying carbon stocks in forested ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111627. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111627>
- Davis, S. J., et al. (2018). Carbon capture and storage: A global perspective. *Environmental Research Letters*, 13(12), 124042. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf89c>
- Díaz-Pinés, E., Rubio, A., & Montes, F. (2011). Storage of carbon in Spanish forest ecosystems under different climate and land use scenarios. *European Journal of Forest Research*, 130, 715-727. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0456-6>
- Doney, S. C., et al. (2012). Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 4, 11-37. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120710-100811>
- European Commission. (2019). The European Green Deal. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)

European Commission. (2020). Guidance on the preparation of the Environmental Impact Assessment Report. [https://ec.europa.eu/environment/eia/pdf/EIA\\_guidance.pdf](https://ec.europa.eu/environment/eia/pdf/EIA_guidance.pdf)

Fischer, C., Preonas, L., & Newell, R. G. (2012). Environmental and technology policies for climate mitigation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 64(1), 109-127. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2012.01.001>

Fischer, C., et al. (2012). The role of forests in the global carbon cycle. *Global Change Biology*, 18(1), 1-3. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02556.x>

García, C., Martínez, J. A., & López, M. (2020). La participación pública en la evaluación de impacto ambiental en España: Análisis y propuestas. *Revista de Estudios Ambientales*, 25(1), 55-72.

González, A., et al. (2021). Carbon sequestration potential of different tree species in temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 482, 118781. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118781>

Gomez, C. R., et al. (2021). Grey carbon capture: Technological and economic perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110128>

Höhne, N., den Elzen, M., & Escalante, D. (2017). Regional GHG reduction targets based on effort sharing: A comparison of studies. *Climate Policy*, 17(5), 639-651. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1242058>

Houghton, R. A. (2012). Carbon sequestration in forests and soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, 99-113. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105528>

Huang, K., et al. (2020). Membrane technologies for CO<sub>2</sub> capture: A review. *Separation and Purification Technology*, 236, 116257. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116257>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Sixth Assessment Report. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/>

Krause, R. M., & Gutscher, H. (2020). Incentives for carbon sequestration in agriculture. *Nature Sustainability*, 3, 243-244. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0492-7>

Lal, R. (2008). Carbon sequestration. *Physics Today*, 61(8), 44-49. <https://doi.org/10.1063/1.2975338>

Lehmann, J., et al. (2011). Biochar for environmental management: an introduction. *Biochar for Environmental Management*, 1-14. <https://doi.org/10.4324/9780203823922>

Le Quéré, C., et al. (2018). Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data*, 10(4), 2141-2194. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>

MITECO. (2020). Informe de Evaluación Ambiental. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

McLeod, E., et al. (2011). A global perspective on mangrove conservation and restoration. *The Nature Conservancy*. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.07.007>

Nowak, D. J., et al. (2014). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 193, 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.028>

Paustian, K., et al. (2016). Climate-smart soils. *Nature Climate Change*, 6(2), 102-104. <https://doi.org/10.1038/nclimate2929>

Pérez-López, U., et al. (2016). Drought effects on the photosynthesis of Mediterranean evergreen oaks: a synthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 220, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.01.013>

Ruth, M. F., et al. (2019). Adsorption technologies for carbon capture: A review. *Environmental Science & Technology*, 53(9), 5326-5337. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00175>

Socolow, R. H., et al. (2011). Direct air capture of CO<sub>2</sub> with chemicals: A technology assessment for the APS Panel on Public Affairs. American Physical Society.

Vallejo, V. R., Aronson, J., Pausas, J. G., & Cortina, J. (2012). Restauración de ecosistemas mediterráneos. Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino de España.

Zhang, X., et al. (2017). A review of CO<sub>2</sub> capture technologies. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 66, 56-70. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.08.018>