



**Universidad
Europea** VALENCIA

GRADO EN INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL

Trabajo Fin de Grado

**Optimización de la Selección de Proyectos
para la Compensación de CO₂: Un Enfoque
Algorítmico**

Presentado por:

Fernando Belda Penadés

Dirigido por:

María Calero Pastor

CURSO ACADÉMICO 2023-2024

A mi familia
Papa, Mama, Maria, Carmen y Remy

Agradecimientos

A María Calero Pastor por tutorizar este Trabajo Fin de Grado.

A Fernando Antón y Rebeca Franco de Astara SA por ser parte de este proyecto.

A U4Impact por hacer posible la colaboración con Astara SA.

A todos los profesores que he tenido a lo largo de la carrera por haber fomentado la mejora continua como forma de vida.

A mi familia por su apoyo incondicional durante estos años.

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado (TFG) se diseña y desarrolla un algoritmo soportado por una herramienta para seleccionar proyectos de compensación de dióxido de carbono (CO₂) para la compañía de movilidad “Astara, S.A.”, con el objetivo de ser neutros en emisiones de carbono para 2027, tres años antes de lo estipulado por la agenda 2030. La selección de proyectos de compensación de CO₂ es crucial para que las empresas compensen sus emisiones mediante créditos de carbono. El TFG desarrolla un algoritmo basado en el proceso analítico jerárquico (AHP) para optimizar esta selección, denominado AHP-COPS (*Analytic Hierarchy Process - Carbon Offset Portfolio Selector*), que utiliza criterios y alcance definidos con Astara SA, actualizando los proyectos según su disponibilidad y variables descriptivas como CO₂ compensado, precio del proyecto y certificación. Este algoritmo se materializa en la herramienta COPS (*Carbon Offset Portfolio Selector*), que facilita su aplicación mediante una interfaz amigable y permite la actualización constante de proyectos. La herramienta COPS ha sido validada exitosamente, demostrando su capacidad para generar *rankings* de proyectos de compensación de CO₂ basados en los criterios de Astara SA, proporcionando una solución objetiva y transparente para seleccionar los proyectos más adecuados. Esta validación subraya la eficacia de COPS y representa un hito en la gestión sostenible de emisiones de carbono, ofreciendo un modelo replicable para otras empresas con objetivos similares en sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: optimización, selección, portafolio de proyectos, AHP, compensación, CO₂, créditos de carbono.

Abstract

In this Final Degree Project (TFG) an algorithm supported by a tool is designed and developed to select carbon dioxide (CO₂) offset projects for the mobility company "Astara, S.A.", with the objective of being carbon neutral by 2027, three years before the stipulated by the 2030 agenda. The selection of CO₂ offset projects is crucial for companies to offset their emissions through carbon credits. The TFG develops an algorithm based on the analytical hierarchical process (AHP) to optimize this selection, called AHP-COPS (*Analytic Hierarchy Process - Carbon Offset Portfolio Selector*), which uses criteria and scope defined with Astara SA, updating the projects according to their availability and descriptive variables such as offset CO₂, project price and certification. This algorithm is materialized in the COPS (*Carbon Offset Portfolio Selector*) tool, which facilitates its application through a user-friendly interface and allows constant updating of projects. The COPS tool has been successfully validated, demonstrating its ability to generate rankings of CO₂ offset projects based on Astara SA's criteria, providing an objective and transparent solution to select the most suitable projects. This validation underlines the effectiveness of COPS and represents a milestone in the sustainable management of carbon emissions, offering a replicable model for other companies with similar objectives in environmental sustainability.

Keywords: Optimization, Selection, Project portfolio, AHP, Offset, CO₂, Carbon credits.

Resum

En aquest Treball Fi de Grau (TFG) es dissenya i desenvolupa un algorisme suportat per una eina per a seleccionar projectes de compensació de diòxid de carboni (CO₂) per a la companyia de mobilitat “Astara, S. A.”, amb l'objectiu de ser neutres en emissions de carboni per a 2027, tres anys abans de l'estipulat per l'agenda 2030. La selecció de projectes de compensació de CO₂ és crucial perquè les empreses compensen les seues emissions mitjançant crèdits de carboni. El TFG desenvolupa un algorisme basat en el procés analític jeràrquic (AHP) per a optimitzar aquesta selecció, denominat AHP-COPS (*Analytic Hierarchy Process - Carbon Offset Portfolio Selector*), que utilitza criteris i abast definits amb Astara SA, actualitzant els projectes segons la seua disponibilitat i variables descriptives com a CO₂ compensat, preu del projecte i certificació. Aquest algorisme es materialitza en l'eina COPS (*Carbon Offset Portfolio Selector*), que facilita la seua aplicació mitjançant una interfície amigable i permet l'actualització constant de projectes. L'eina COPS ha sigut validada reeixidament, demostrant la seua capacitat per a generar rànquings de projectes de compensació de CO₂ basats en els criteris de Astara SA, proporcionant una solució objectiva i transparent per a seleccionar els projectes més adequats. Aquesta validació subratlla l'eficàcia de COPS i representa una fita en la gestió sostenible d'emissions de carboni, oferint un model replicable per a altres empreses amb objectius similars en sostenibilitat ambiental.

Paraules clau: optimització, selecció, cartera de projectes, AHP, compensació, CO₂, crèdits de carboni.

Índice

Capítulo 1. Introducción.....	19
1.1 Motivación.....	20
1.2 Objetivos.....	22
1.3 Estructura del documento.....	23
Capítulo 2. Marco teórico.....	25
2.1 Proyectos de compensación de CO2.....	25
2.1.1 Problemática.....	26
2.1.2 Metodologías de compensación.....	27
2.2 Modelos de optimización.....	31
2.2.1 Métodos clásicos.....	32
2.2.2 Proceso analítico jerárquico (AHP).....	34
Capítulo 3. Desarrollo del algoritmo AHP-COPS.....	37
3.1 Definición de variables.....	37
3.2 Proceso analítico jerárquico.....	41
3.3 Resumen de AHP-COPS.....	48
Capítulo 4. Diseño de la herramienta COPS.....	49
4.1 Tecnología utilizada.....	49
4.2 Aplicación COPS.....	51
4.2.1 Funcionalidades principales.....	51
4.2.2 Interfaz de la herramienta.....	52
Capítulo 5. Escenario de uso en Astara SA.....	61
5.1 Caso de uso: proyecto de compensación de CO2.....	61
5.2 COPS en Astara SA.....	63
5.3 AHP-COPS en Astara SA.....	66
5.4 Resultados de Astara SA.....	69

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro	71
6.1 Conclusiones	71
6.2 Trabajo futuro.....	72
Referencias.....	73
Anexos.....	75
Anexo A. AHP-COPS Matriz de comparación.....	75
Anexo B. AHP-COPS Matriz de comparación normalizada y prioridades locales	77

Índice de Figuras

Figura 1. Empresa de movilidad Astara, S.A. y U4Impact.....	19
Figura 2. Emisiones a compensar para la neutralidad (Astara, 2023).....	21
Figura 3. Certificaciones internacionales (Astara, 2023).	21
Figura 4. Neutralidad de carbono (<i>CarbonNeutral</i> , 2024).	26
Figura 5. Metodologías de compensación CO2 (Astara, 2023).	27
Figura 6. Tipos de proyectos de compensación de CO2 (Astara, 2023).....	31
Figura 7. COPS: Interfaz de inicio (<i>log in</i>).	53
Figura 8. COPS: Interfaz principal.	54
Figura 9. COPS: Interfaz de nuevo proyecto (1/3).	56
Figura 10. COPS: Interfaz de nuevo proyecto (2/3).	57
Figura 11. COPS: Interfaz de nuevo proyecto (3/3).	58
Figura 12. COPS: Interfaz del <i>ranking</i> de nuevo proyecto.	59
Figura 13. COPS: Interfaz del <i>ranking</i> de proyectos.	60
Figura 14. COPS: Información básica del proyecto de restauración.	64
Figura 15. COPS: Calidad del proyecto de restauración.....	65
Figura 16. COPS: Beneficios adicionales del proyecto de restauración.....	65
Figura 17. COPS: <i>Project Ranking</i> del proyecto de restauración.....	66
Figura 18. Resultados del <i>ranking</i> con AHP-COPS.....	69

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de variables definidas y escala de importancia	41
Tabla 2. Matriz de comparación.	44
Tabla 3. Matriz de comparación normalizada.....	45
Tabla 4. Cálculo del vector de prioridad.....	46
Tabla 5. Cálculo del valor propio máximo (λ_{max}).	47
Tabla 6. Datos introducidos en COPS.....	67
Tabla 7. Matriz de comparación CO2 compensado.....	67
Tabla 8. Matriz normalizada y prioridades locales CO2 compensado.	68
Tabla 9. Cálculo del <i>ranking</i>	68
Tabla 10. Resultado del <i>score</i>	68
Tabla 11. Resultado del <i>score</i> (comparativa).	69

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se presenta la motivación de este Trabajo Fin de Grado (TFG) ante la creciente necesidad de abordar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Se explica la motivación, los objetivos del trabajo y se resume el contenido y la estructura del documento.

Este TFG se ha desarrollado en colaboración con Astará SA, una empresa global líder en el sector de la movilidad que destaca por su enfoque en la innovación tecnológica, la sostenibilidad y la satisfacción del cliente como muestra la Figura 1. La empresa tiene presencia en numerosos mercados internacionales, opera una amplia red de concesionarios y centros de servicio y ofrece una variada gama de vehículos de marcas reconocidas. Además, Astará SA impulsa iniciativas de movilidad compartida, electrificación de flotas y desarrollo de infraestructuras para vehículos eléctricos.

A su vez, este TFG ha sido posible gracias a la plataforma U4Impact (Figura 1), una organización que pone en contacto a alumnos y corporaciones para resolver problemas reales en los TFG (U4Impact, 2024).



Figura 1. Empresa de movilidad Astará, S.A. y U4Impact.

1.1 Motivación

En un contexto global cada vez más consciente de la urgencia de abordar el cambio climático, los proyectos de compensación de dióxido de carbono (CO2) emergen como una estrategia vital para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos proyectos permiten a las empresas invertir en iniciativas que eliminan CO2 de la atmósfera, equilibrando así sus propias emisiones. Entre las opciones disponibles se encuentran métodos como la reforestación o la conservación de bosques (Climate Trade, 2023).

La inversión en proyectos de compensación de CO2 genera créditos de carbono que son unidades que representan la reducción o eliminación de una tonelada métrica de CO2 de la atmósfera (BBVA, 2024).

Astara SA ha establecido un ambicioso objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono para el año 2027, como se ilustra en la Figura 2. Según la hipótesis inicial de Astara SA, se requerirá la compensación de 4 a 5 kilotoneladas de CO2 por año para alcanzar este hito. Los proyectos de compensación cubrirán emisiones de vehículos de empleados que no han sido sustituidos por vehículos eléctricos, el consumo de combustibles no sostenibles en edificios, y las emisiones de coches comerciales y de demostración.

Lograr la neutralidad de las emisiones carbono para el 2030 es fundamental para cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por las Naciones Unidas para entre otros objetivos, mitigar el cambio climático (ONU, 2024).

Sin embargo, la selección de proyectos de compensación de CO2 puede ser un proceso complejo y desafiante debido la cantidad de certificaciones distintas para los proyectos. Astara SA define 7 certificaciones como las más importantes del mercado y sus diferencias tanto en coste, geografía y en percepción social como se muestra en la Figura 3.

La certificación de Verra es actualmente la mejor percibida entre las empresas e instituciones siendo el referente a seguir en cuestión de transparencia y gobernanza. Fuera de las certificaciones de ámbito privado como Verra o Gold Standard, CDM es la certificación y principal fuente de ingresos del fondo de adaptación de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climática (UNFCCC, por sus siglas en inglés) para financiar proyectos de compensación en países en desarrollo, parte del Protocolo de Kioto que son

especialmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático (UNFCCC, 2024).

To reach the first milestone - Carbon Neutral by 2027 - offsetting of ca. 4-5k tCO₂ per year plays a relevant role

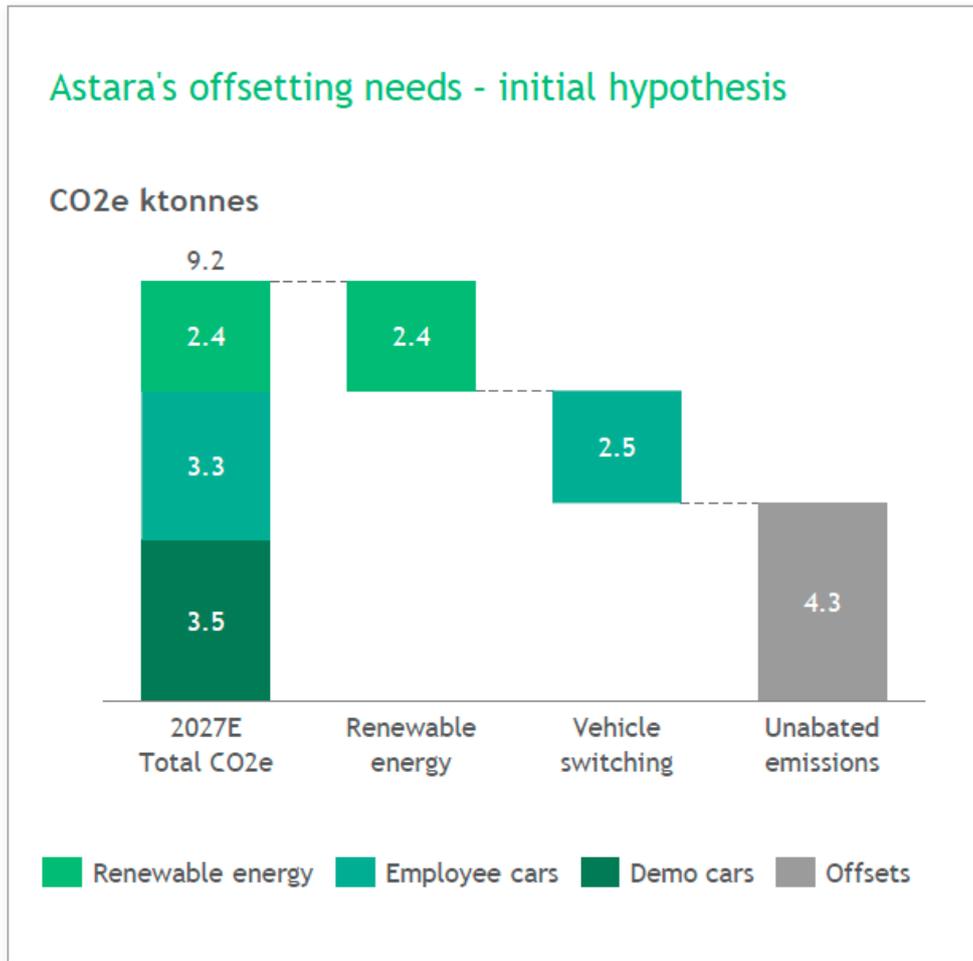


Figura 2. Emisiones a compensar para la neutralidad (Astara, 2023).

							
Type	Private	Private	Private	Private	Private	Private	Public
Founding organization	Verra	WWF and other int'l NGOs	State of California	WinRock international	WinRock international	Puro Earth	UN through the Kyoto Protocol
CO ₂ e M tons transacted ²	295	44	10	19	Not available	0.09	101
Average price ² (\$/tCO ₂)	\$4.17	\$3.94	\$2.12	\$11.37	Not available	\$100/t	\$2.12
	Highest registry premium for like projects			High-cost-skewed project mix			
Geography	Global	Global	US and Mexico	Global, some sectors only US	Global	Global	Global
Perception	Positive	Positive	Positive	Positive	Positive	Positive	Critical ³

Figura 3. Certificaciones internacionales (Astara, 2023).

Este TFG proporciona una solución a esta problemática al desarrollar un algoritmo soportado por una herramienta que clasifica los proyectos de compensación de CO2 en función de su eficacia y rentabilidad. Al hacerlo, facilita a las empresas como Astará SA la toma de decisiones informadas sobre dónde invertir para obtener el máximo retorno en términos de créditos de carbono. Además, al hacer que la inversión en proyectos de compensación de CO2 sea más accesible, este proyecto tiene el potencial de aumentar la cantidad de inversión en estos proyectos, lo que a su vez puede potenciar la lucha global contra el cambio climático.

El algoritmo soportado por la herramienta utiliza el proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés). Es un enfoque algorítmico que facilita la toma de decisiones complejas mediante la descomposición del problema en una jerarquía de criterios y subcriterios, permitiendo así una evaluación sistemática de múltiples alternativas (Saaty, 1980). Este método es especialmente útil en la selección de proyectos de compensación de CO2, ya que permite incorporar las preferencias y prioridades de la empresa en la evaluación de las diferentes opciones disponibles.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este TFG es desarrollar un algoritmo, al que denominaremos AHP-COPS (*Analytic Hierarchy Process - Carbon Offset Portfolio Selector*), soportado por una herramienta llamada COPS (*Carbon Offset Portfolio Selector*) que sea capaz de generar una clasificación de los proyectos de compensación de CO2. El algoritmo de optimización utilizado por la herramienta debe garantizar la clasificación de los proyectos desde los más óptimos a los menos, según los criterios establecidos. El algoritmo debe categorizar los proyectos insertados en la herramienta y con ello definir el portafolio de proyectos óptimos según los datos y criterios introducidos.

Para alcanzar el objetivo general, se definen los siguientes subobjetivos:

- Revisión de los métodos de optimización clásicos.
- Definición del criterio de Astará SA.
- Desarrollo del algoritmo AHP-COPS.
- Diseño de la herramienta COPS.
- Validación de AHP-COPS en Astará SA.

Por otra parte, con el algoritmo AHP-COPS soportado por la herramienta COPS implementado en este TFG, se contribuye a la consecución de los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2024):

ODS Número 9. Industria, innovación e infraestructuras

Meta 15.a: “Movilizar y aumentar de manera significativa los recursos financieros procedentes de todas las fuentes para conservar y utilizar de forma sostenible la diversidad biológica y los ecosistemas.”

Meta 15.b: “Movilizar un volumen apreciable de recursos procedentes de todas las fuentes y a todos los niveles para financiar la gestión forestal sostenible y proporcionar incentivos adecuados a los países en desarrollo para que promuevan dicha gestión, en particular con miras a la conservación y la reforestación.”

ODS Número 13. Acción por el clima

Meta 13.a: “Cumplir el compromiso de los países desarrollados que son partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de lograr para el año 2020 el objetivo de movilizar conjuntamente 100.000 millones de dólares anuales procedentes de todas las fuentes a fin de atender las necesidades de los países en desarrollo respecto de la adopción de medidas concretas de mitigación y la transparencia de su aplicación, y poner en pleno funcionamiento el Fondo Verde para el Clima capitalizándolo lo antes posible.”

1.3 Estructura del documento

Este TFG está compuesto por seis capítulos y dos anexos resumidos a continuación:

Capítulo 2. Marco teórico: En este capítulo se aborda la problemática de la selección de los proyectos de compensación y las metodologías existentes. A su vez, se analizan los modelos de optimización clásicos para delimitar el más apropiado para el desarrollo del algoritmo.

Capítulo 3. Desarrollo del algoritmo AHP-COPS: Se plantean y especifican las variables de estudio para la comprensión del problema. Además, se recopila la información necesaria para desarrollar el algoritmo AHP-COPS.

Capítulo 4. Diseño de la herramienta COPS: En este capítulo se diseña la herramienta COPS con el programa “*low-code*” llamado “*bubble.io*”, que soporta el algoritmo AHP-COPS.

Capítulo 5. Escenario de uso en Astar SA: Con el algoritmo desarrollado, se ejecuta un caso de estudio para la compañía de movilidad Astar SA. Aquí se analiza el comportamiento con un ejemplo real en COPS y los resultados obtenidos por el algoritmo AHP-COPS.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros: En el último capítulo, se comentan las conclusiones y los objetivos alcanzados. Además, se plantean posibles líneas de trabajo futuras.

Finalmente se recopilan las referencias bibliográficas y se incluyen dos anexos con la matriz de comparación, matriz de comparación normalizada y las prioridades locales para un caso de estudio.

Capítulo 2. Marco teórico

En este capítulo se aborda la problemática de la selección de proyectos de compensación y las metodologías existentes, y se analizan los modelos de optimización clásicos para delimitar el más apropiado para el desarrollo del algoritmo AHP-COPS.

2.1 Proyectos de compensación de CO2

En la vanguardia de la respuesta global al cambio climático, los proyectos de compensación de CO2 se erigen como pilares esenciales para contrarrestar las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos proyectos abarcan desde la reforestación hasta la implementación de tecnologías, buscando compensar las emisiones de CO2. Al adentrarse en la era de la responsabilidad ambiental, estos proyectos no solo ofrecen soluciones concretas para compensar nuestra huella de carbono, sino que también promueven la innovación y la colaboración intersectorial.

Según la certificación empresarial *CarbonNeutral®*, las emisiones no mitigadas durante el periodo definido deben ser compensadas mediante la compra y retirada de créditos de carbono elegibles. Esto es fundamental para garantizar que las empresas puedan alcanzar la neutralidad de carbono, a pesar de no poder eliminar todas sus emisiones internamente. Las medidas de reducción para lograr la neutralidad de carbono se ilustran en la Figura 4 (CarbonNeutral, 2024).

En este contexto, la optimización de la selección de proyectos de compensación de CO2 se presenta como un desafío crucial. La complejidad a la hora de seleccionar los mejores proyectos según los criterios establecidos y la influencia de factores económicos exigen la aplicación de una metodología de optimización algorítmica para garantizar la toma de decisiones más adecuadas basada en datos. Al abordar estas problemáticas, los proyectos de compensación de CO2 no solo se posicionan como agentes de cambio ambiental, sino también como impulsores de una transición hacia un futuro más sostenible y equitativo.

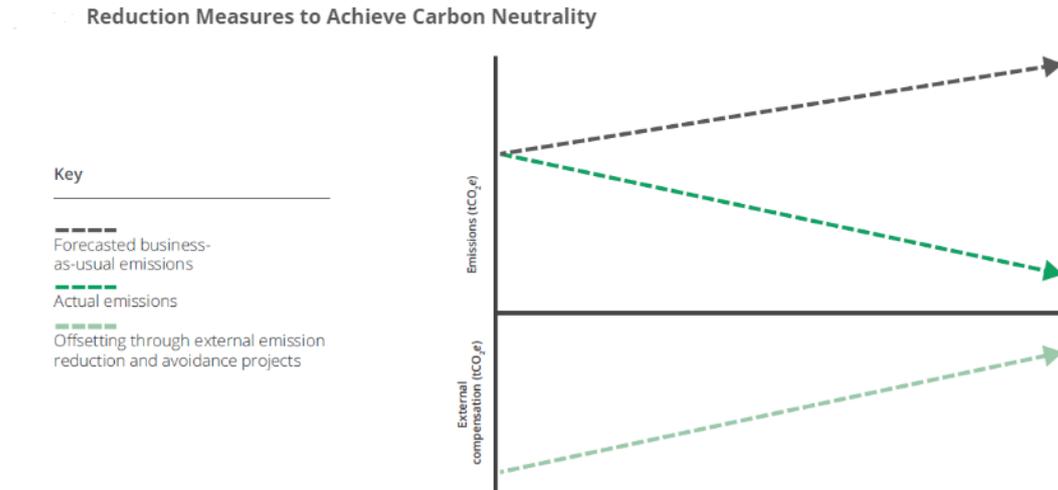


Figura 4. Neutralidad de carbono (CarbonNeutral, 2024).

De hecho, desde el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, se ha creado el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción (Real Decreto 163/2014) donde facilita la posibilidad de compensar toda o parte de sus emisiones de CO2, mediante una serie de proyectos forestales ubicados en territorio nacional (Miteco, 2024).

2.1.1 Problemática

La problemática actual de las empresas concienciadas con la compensación de los gases de efecto invernadero recae en la elección apropiada de los proyectos de compensación.

Debido a la complejidad de selección de los proyectos de compensación, las empresas actualmente seleccionan los proyectos de manera manual, lo que implica que el criterio de análisis y elección del proyecto recae íntegramente en el analista, y es este el que debe desarrollar su propia metodología de comparación. Esto implica cierta subjetividad personal difícilmente evitable.

Esta problemática genera a las empresas una deficiencia a la hora de desarrollar sus portafolios de proyectos de compensación y hace que lograr ser neutro en carbono sea más ineficiente y, por lo tanto, más caro.

Poder disponer de un criterio, una herramienta, y sobre todo, un algoritmo de comparación permite, que una vez se han establecido los objetivos de la compañía, los analistas puedan comparar proyectos siguiendo un mismo criterio comparativo, con lo que posteriormente poder generar el portafolio de proyectos

de compensación más ajustado y lograr el menor precio por tonelada de CO2 posible.

2.1.2 Metodologías de compensación

La lucha contra el cambio climático ha impulsado a las empresas y gobiernos a buscar maneras de reducir y compensar sus emisiones de CO2. Dentro de las estrategias de compensación de carbono, se distinguen tres aproximaciones principales: basadas en la naturaleza (*nature-based*), basadas en la tecnología (*technology-based*) y mixtas (*mix-based*). Cada una de estas aproximaciones tiene sus propias características, ventajas y desafíos (Astara, 2023).

Removal offsets: Pull carbon out of the atmosphere

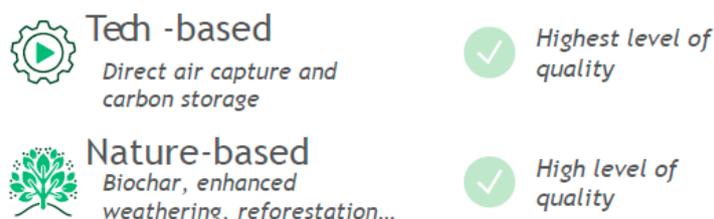


Figura 5. Metodologías de compensación CO2 (Astara, 2023).

2.1.2.1 Aproximaciones basadas en la naturaleza (*nature-based*)

Las soluciones basadas en la naturaleza involucran el uso de procesos naturales para absorber y almacenar carbono. Entre las principales estrategias se incluyen la reforestación, la restauración de ecosistemas, la conservación de bosques, el manejo de suelos agrícolas y pastizales, etc. Estas soluciones se fundamentan en el hecho de que los ecosistemas naturales, como los bosques y los océanos, actúan como sumideros de carbono al absorber CO2 de la atmósfera a través de la fotosíntesis y otros procesos biológicos. A continuación, se resumen algunas de las más utilizadas:

Reforestación y restauración de ecosistemas

La reforestación y la restauración de ecosistemas degradados son métodos efectivos para capturar carbono. Los árboles y plantas absorben CO2 y lo almacenan en su biomasa y en el suelo (Griscom, 2017). Este enfoque no solo ayuda a mitigar el cambio climático, sino que también proporciona beneficios colaterales, como la mejora de la biodiversidad, la regulación del ciclo del agua y la protección del suelo contra la erosión.

Manejo de suelos agrícolas y pastizales

Otra estrategia basada en la naturaleza es el manejo mejorado de suelos agrícolas y pastizales. Las prácticas agrícolas sostenibles, como el cultivo de cobertura, la rotación de cultivos y el uso de abonos orgánicos, pueden aumentar la cantidad de carbono almacenado en el suelo (Lal R. , 2004). Este enfoque también mejora la fertilidad del suelo y su capacidad de retención de agua, beneficiando a los agricultores y al medio ambiente.

Siembra directa

La siembra directa, también conocida como labranza cero, reduce la perturbación del suelo al eliminar o minimizar el arado. Esto ayuda a mantener la estructura del suelo y protege la materia orgánica, evitando la liberación de carbono almacenado. La siembra directa también mejora la infiltración de agua y reduce la erosión del suelo (Hobbs, 2008).

Conservación de bosques

La conservación de bosques existentes evita la liberación de carbono almacenado en la biomasa forestal y el suelo. Este método es particularmente efectivo en regiones tropicales, donde los bosques son densos y almacenan grandes cantidades de carbono. La conservación también protege la biodiversidad y mantiene los servicios ecosistémicos esenciales (Baccini, 2017).

Fertilización oceánica

La fertilización oceánica es una técnica experimental que busca aumentar la capacidad del océano para absorber CO2 mediante la adición de nutrientes, como el hierro, que estimulan el crecimiento de fitoplancton. El fitoplancton, a través de la fotosíntesis, absorbe CO2 y luego muere y se hunde en el fondo del océano, absorbiendo carbono (Martin, 1990).

2.1.2.2 Aproximaciones basadas en la tecnología

Las soluciones tecnológicas se centran en el desarrollo y aplicación de tecnologías avanzadas para capturar y almacenar CO2. Estas tecnologías incluyen la captura y almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés), la captura y utilización de carbono (CCU) y las energías renovables. Sus principales características son:

Captura y almacenamiento de carbono (CCS)

La tecnología de captura y almacenamiento de carbono implica la captura de CO₂ emitido por plantas industriales y de energía antes de que entre en la atmósfera, y su almacenamiento en formaciones geológicas subterráneas (IPCC, 2005). Esta tecnología puede reducir significativamente las emisiones de CO₂ de las industrias más contaminantes. Sin embargo, enfrenta desafíos técnicos y económicos, como los altos costes de implementación y la necesidad de garantizar la seguridad a largo plazo del almacenamiento de CO₂.

Captura y utilización de carbono (CCU)

La captura y utilización de carbono es una variante de CCS donde el CO₂ capturado se utiliza como materia prima para producir productos químicos, combustibles sintéticos o materiales de construcción (Hepburn, 2019). Esta tecnología tiene el potencial de crear nuevos mercados y oportunidades económicas, pero su desarrollo aún está en etapas tempranas y requiere avances tecnológicos para ser ampliamente adoptada.

BECCS (Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono)

BECCS es una tecnología que combina la producción de bioenergía con la captura y almacenamiento de carbono. El proceso implica el cultivo de biomasa (como cultivos energéticos o residuos agrícolas) que absorbe CO₂ de la atmósfera durante su crecimiento. Esta biomasa se utiliza luego para generar energía (electricidad o calor) a través de procesos de combustión, gasificación o fermentación. Durante estos procesos, el CO₂ emitido se captura y se almacena en formaciones geológicas profundas, como antiguos campos de petróleo y gas o formaciones salinas, evitando así su liberación a la atmósfera (IEA, 2020).

DACCS (Captura directa de aire con almacenamiento de carbono)

DACCS es una tecnología que implica la captura de CO₂ directamente del aire ambiente utilizando procesos químicos. El aire se hace pasar por filtros que contienen sustancias químicas que reaccionan con el CO₂, capturándolo. Una vez que el CO₂ se ha capturado, se separa de los otros gases y se comprime para su transporte y almacenamiento geológico, de manera similar a BECCS (N.A.S.E.M., 2019).

2.1.2.3 Aproximaciones mixtas

Las aproximaciones mixtas combinan soluciones basadas en la naturaleza y la tecnología para maximizar la reducción de emisiones de CO₂ y la captura de

carbono. Este enfoque reconoce que no existe una única solución para el problema del cambio climático y que una combinación de estrategias puede ofrecer los mejores resultados. Se resumen las aproximaciones más conocidas:

Integración de reforestación y CCS

Un ejemplo de enfoque mixto es la integración de proyectos de reforestación con tecnologías de CCS. Los proyectos de reforestación pueden capturar y almacenar carbono a corto plazo, mientras que las tecnologías de CCS pueden manejar las emisiones residuales de industrias que no pueden ser completamente descarbonizadas a través de energías renovables. Esta combinación puede proporcionar una solución más completa y efectiva para la reducción de emisiones (Fuss, 2014).

Uso de biomasa con captura de carbono

Otra estrategia mixta es el uso de biomasa para producir energía, combinado con la captura y almacenamiento de carbono (Bio-CCS). La biomasa, cuando se cultiva de manera sostenible, puede ser una fuente de energía neutra en carbono. Al capturar y almacenar el CO₂ producido durante la combustión de biomasa, se puede lograr una reducción neta de CO₂ en la atmósfera, conocida como emisiones negativas (Smith, 2016).

Agricultura regenerativa y energías renovables

La combinación de prácticas agrícolas regenerativas con la implementación de energías renovables en comunidades rurales es otra aproximación mixta. Las prácticas agrícolas sostenibles pueden mejorar la captura de carbono en el suelo, mientras que las energías renovables pueden proporcionar una fuente de energía limpia para las operaciones agrícolas. Este enfoque puede mejorar la sostenibilidad y la resiliencia de las comunidades rurales, al tiempo que reduce las emisiones de CO₂ (Lal R. , 2016).

Las tres aproximaciones en los proyectos de compensación de CO₂ (basadas en la naturaleza, basadas en la tecnología y mixtas) se resumen en la Figura 6.

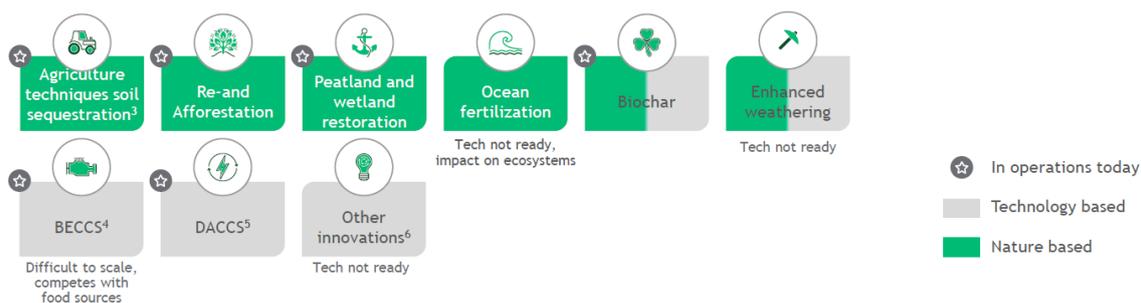


Figura 6. Tipos de proyectos de compensación de CO2 (Astara, 2023).

Cada aproximación ofrece distintas ventajas y enfrentan diferentes desafíos. Las soluciones basadas en la naturaleza son valoradas por sus beneficios ecológicos y sociales, mientras que las soluciones tecnológicas son cruciales para la descarbonización de sectores industriales. Las aproximaciones mixtas, que combinan elementos de ambas, representan una estrategia integral para abordar el cambio climático de manera más efectiva. La elección de la estrategia más adecuada depende del contexto específico, los recursos disponibles y los objetivos a largo plazo de la empresa o entidad que implementa los proyectos de compensación.

2.2 Modelos de optimización

La optimización de la selección de proyectos de compensación de CO2 se beneficia enormemente de la aplicación de modelos de optimización para la toma de decisiones. Estos modelos ofrecen un enfoque sistemático y cuantitativo para seleccionar las combinaciones más efectivas de proyectos que maximizan la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, considerando las diversas restricciones y objetivos involucrados.

En esencia, los modelos de optimización son herramientas matemáticas y algorítmicas diseñadas para encontrar la mejor solución posible entre múltiples opciones. En el contexto de la compensación de CO2, estos modelos pueden abordar la complejidad de evaluar el impacto ambiental, los costes asociados, la viabilidad financiera y otros factores críticos.

Existen diferentes tipos de modelos de optimización, como programación lineal, programación entera, programación no lineal y optimización multiobjetivo. La programación lineal, por ejemplo, se utiliza para maximizar o minimizar una función lineal sujeta a ciertas restricciones, mientras que la optimización

multiobjetivo permite considerar simultáneamente varios objetivos, como la reducción de emisiones y los costes asociados.

La aplicación de estos modelos a la selección de proyectos de compensación de CO2 implica la formulación precisa de objetivos y restricciones, así como la consideración de datos relevantes, como la capacidad de absorción de carbono, los costes de implementación y las políticas ambientales vigentes. La utilización de algoritmos de optimización permite explorar eficientemente el espacio de soluciones, identificando combinaciones óptimas que equilibren factores clave para tomar decisiones informadas y estratégicas (Hillier, 2001). En los siguientes apartados se resumen las características más relevantes de los métodos clásicos y del proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés).

2.2.1 Métodos clásicos

La selección de proyectos de compensación de CO2 para maximizar la eficacia y rentabilidad es un desafío significativo para las empresas que desean contribuir a la sostenibilidad ambiental. Para abordar este problema, es esencial entender las metodologías clásicas de optimización y evaluar sus fortalezas y debilidades en comparación con el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

2.2.1.1 Programación lineal (PL)

La programación lineal es una técnica matemática utilizada para la optimización de un objetivo lineal sujeto a restricciones lineales (Dantzig, 1963). Se usa ampliamente en problemas de asignación de recursos. Su fortaleza radica en su capacidad para encontrar soluciones óptimas en problemas bien definidos y estructurados. Sin embargo, su debilidad es que no puede manejar relaciones no lineales ni múltiples objetivos de manera efectiva, lo que limita su aplicabilidad en contextos complejos como la evaluación de proyectos de compensación de CO2, donde las variables y restricciones pueden no ser lineales ni simples.

2.2.1.2 Programación lineal entera mixta (PLEM)

Esta variante de la programación lineal permite que algunas variables sean enteras, lo cual es útil cuando las decisiones son discretas (Nemhauser, 1988). Su fortaleza es su capacidad para modelar problemas más realistas, como decisiones de inversión en proyectos específicos. No obstante, su debilidad reside en su complejidad computacional, especialmente cuando el problema tiene una gran cantidad de variables y restricciones, haciendo que la solución sea computacionalmente intensiva y difícil de escalar.

2.2.1.3 Programación cuadrática (PQ)

La programación cuadrática extiende la programación lineal al permitir funciones objetivo-cuadráticas (Fletcher, 1987). Esto es útil para problemas donde la relación entre variables no es lineal, pero sigue siendo convexa. Su fortaleza es su capacidad para modelar problemas más complejos que la programación lineal. Sin embargo, su debilidad es que requiere que las funciones objetivo sean convexas, lo cual puede no ser siempre el caso en problemas de selección de proyectos de compensación de CO₂, donde las relaciones entre variables pueden ser más complejas y no necesariamente convexas.

2.2.1.4 Programación no lineal (PNL)

Este método permite la optimización de funciones objetivo y restricciones que son no lineales (Baccini, 2017). Es una técnica poderosa para abordar problemas complejos y realistas. Su principal fortaleza es su flexibilidad y aplicabilidad a una amplia gama de problemas. Sin embargo, la PNL tiene importantes debilidades, incluyendo la posible existencia de múltiples óptimos locales y la necesidad de algoritmos sofisticados para encontrar soluciones globales. Esto hace que sea menos adecuada para problemas donde la estructura del problema no es bien comprendida o es altamente compleja.

2.2.1.5 Optimización estocástica

Este enfoque considera la incertidumbre en los parámetros del modelo, utilizando métodos probabilísticos para encontrar soluciones óptimas (Birge, 2011). Su fortaleza radica en su capacidad para manejar incertidumbre y variabilidad, lo cual es crucial en contextos de inversión en proyectos de compensación de CO₂, donde los resultados pueden ser inciertos. Sin embargo, su principal debilidad es la necesidad de una gran cantidad de datos para modelar adecuadamente la incertidumbre y su complejidad computacional, lo que puede ser una barrera para las empresas con recursos limitados.

2.2.1.6 Programación dinámica (PD)

La programación dinámica descompone un problema en subproblemas más pequeños y resuelve cada uno de ellos de manera recursiva (Bellman, 1957). Es muy efectiva para problemas con estructura temporal o secuencial. Su fortaleza es su capacidad para encontrar soluciones óptimas en problemas secuenciales y con múltiples etapas. Sin embargo, su debilidad es su alta demanda

computacional y la dificultad para aplicarla en problemas que no tienen una estructura claramente definida como secuencial o temporal.

2.2.1.7 Teoría de grafos y optimización en redes

Este método utiliza grafos para modelar y resolver problemas de optimización en redes (Ahuja, 1993). Es particularmente útil para problemas de flujo y enrutamiento. Su fortaleza es su capacidad para modelar y resolver problemas de transporte y comunicación eficientemente. Sin embargo, su debilidad es su aplicabilidad limitada a problemas que pueden ser representados adecuadamente como grafos. Los problemas de selección de proyectos de compensación de CO2 a menudo no se prestan fácilmente a esta representación.

2.2.1.8 Optimización multiobjetivo (OMO)

La optimización multiobjetivo busca soluciones que consideren múltiples objetivos simultáneamente. Es muy útil en contextos donde se deben balancear múltiples criterios, como la rentabilidad y la sostenibilidad (Deb, 2001). Su fortaleza es su capacidad para proporcionar un conjunto de soluciones óptimas conocidas como el "frente de Pareto". Sin embargo, su debilidad es la complejidad en la interpretación y selección de la solución final del "frente de Pareto", especialmente cuando las preferencias de los decisores no están claramente definidas.

2.2.1.9 Optimización multicriterio (OMC)

Similar a la optimización multiobjetivo, la optimización multicriterio considera múltiples criterios, pero se enfoca en proporcionar una única solución basada en las preferencias del decisor (Keeney, 1993). Su fortaleza es su capacidad para integrar múltiples criterios en la toma de decisiones. Sin embargo, su debilidad es la necesidad de un método para cuantificar y comparar diferentes criterios, lo cual puede ser subjetivo y complejo.

2.2.2 Proceso analítico jerárquico (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico (conocido como AHP, por sus siglas en inglés) es un método de toma de decisiones multicriterio que descompone un problema complejo en una jerarquía de subproblemas más simples. Cada uno de estos subproblemas puede ser analizado independientemente, lo que permite una evaluación detallada y sistemática. Los elementos de la jerarquía se comparan

par a par en términos de su contribución a cada criterio, y estos juicios se utilizan para calcular una puntuación global para cada opción (Saaty, 1980).

Fortalezas del AHP:

1. Descomposición jerárquica: la capacidad de descomponer un problema en niveles jerárquicos hace que el AHP sea ideal para problemas complejos con múltiples criterios y subcriterios.
2. Comparación par a par: facilita la evaluación relativa de opciones, lo que puede ser más intuitivo y manejable que evaluar todas las opciones simultáneamente.
3. Incorporación de juicios subjetivos: permite la incorporación de juicios cualitativos y cuantitativos, lo que es útil en contextos donde los datos pueden ser incompletos o inciertos.
4. Agregación de preferencias: AHP permite la agregación de preferencias de múltiples decisores, proporcionando una solución consensuada.
5. Transparencia y trazabilidad: cada paso del proceso es transparente y trazable, lo que facilita la justificación de las decisiones tomadas.

Debilidades del AHP:

1. Consistencia de juicios: requiere que los juicios sean consistentes, lo cual puede ser difícil de lograr en la práctica.
2. Escalabilidad: puede ser menos eficiente en problemas con un gran número de criterios y opciones debido a la cantidad de comparaciones necesarias.

Comparación y justificación del AHP:

AHP es particularmente adecuado para la selección de proyectos de compensación de CO₂ debido a su capacidad para manejar múltiples criterios de evaluación, su flexibilidad para incorporar juicios subjetivos y cuantitativos, y su estructura jerárquica que facilita una comprensión detallada y sistemática del problema. A diferencia de los métodos clásicos de optimización, que pueden ser limitados por la necesidad de linealidad, convexidad o grandes cantidades de datos, AHP proporciona una metodología robusta y flexible que puede adaptarse a las complejidades y particularidades de la selección de proyectos de compensación de CO₂.

En conclusión, mientras que los métodos clásicos de optimización tienen sus fortalezas y pueden ser útiles en contextos específicos, el AHP ofrece una

solución más holística y adaptable para la selección de proyectos de compensación de CO2. Su capacidad para manejar múltiples criterios y su enfoque en la comparación par a par permiten a las empresas tomar decisiones más informadas y alineadas con sus objetivos de sostenibilidad y rentabilidad.

Capítulo 3. Desarrollo del algoritmo AHP-COPS

En este capítulo se definen las variables a considerar y se desarrolla el algoritmo AHP-COPS (*Analytic Hierarchy Process - Carbon Offset Portfolio Selector*). Las variables han sido identificadas y definidas de forma conjunta con la empresa Astara SA, además, se presenta el criterio de valoración de cada una de ellas, condición que determina el peso final de las mismas en el algoritmo AHP-COPS.

3.1 Definición de variables

El primer paso para definir el algoritmo AHP-COPS de selección de proyectos de compensación de CO₂ es identificar y definir las variables a considerar, estableciendo su tipo y prioridad. Para ello, me he basado en el documento “*Astara ESG Strategy*” (Astara, 2023). El primer paso ha sido analizarlo y definir las variables a partir de esta información, para posteriormente, consensuarlo con el criterio experto de Astara SA, formado por Fernando Antón y Rebeca Franco, responsables del departamento de sostenibilidad de Astara SA.

En total se han identificado 13 variables a las que, de manera conjunta con Astara SA, se les ha asignado un valor en la escala de prioridad/importancia de 1 a 9, siendo 1 el valor más bajo en cuanto a importancia, y 9, el valor máximo en cuanto a importancia. En concreto, se considera la siguiente escala: (1) Importante; (3) Moderadamente importante; (5) Fuertemente importante; (7), Muy fuertemente importante; y (9), Importancia extrema. Los valores 2, 4, 6 y 8 representan puntos intermedios. Este valor de importancia tiene como objetivo establecer un criterio inicial de entrada al algoritmo, el cual es necesario para posteriormente establecer las relaciones de las variables entre sí.

3.1.1 CO₂ Compensado durante el periodo de permanencia

La variable de CO₂ compensado almacena las toneladas de CO₂ que compensa el proyecto durante el periodo de permanencia. Es una variable tipo decimal (*float*) y su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 9.

3.1.2 Precio del proyecto

La variable del precio del proyecto alberga el precio total del proyecto. Esta variable es tipo decimal (*float*) y su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 9.

3.1.3 Certificación

La variable de certificación de tipo booleana determina si el proyecto en cuestión tiene una de las 7 certificaciones aceptadas por la compañía como se muestra en la figura 3 (capítulo 1). Su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 9.

3.1.4 Localización

La variable de localización engloba tres posibilidades. “*Not near*” se refiere a aquellos proyectos de compensación no localizados en los países o regiones donde opera la compañía. “*Country*” se refiere a los proyectos localizados en alguno de los países donde opera la compañía. “*Community*” se refiere a los proyectos que tengan lugar en las proximidades de las zonas operacionales próximas de la compañía. Tiene por tanto un rango de (1 a 3) y se considera una variable de tipo entera donde 1 es “*Not near*”, 2 es “*Country*” y 3 es “*Community*”. Su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 6.

3.1.5 Tipo de proyecto

La variable de tipo de proyecto es el valor porcentual que determina el grado de técnicas naturales utilizadas en el proyecto en una escala de 0% a 100%. Las técnicas consideradas 100% “basadas en la naturaleza” son:

- Manejo de suelos agrícolas y pastizales
- Reforestación y restauración de ecosistemas
- Siembra directa
- Conservación de bosques
- Fertilización oceánica

Las técnicas consideradas híbridas (50%) son:

- Integración de reforestación y CCS
- Uso de biomasa con captura de carbono

Las técnicas consideradas 0% “basadas en la naturaleza” y 100% “basadas en tecnología” son:

- Captura y almacenamiento de carbono (CCS)
- Captura y utilización de carbono (CCU)
- Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS)
- Captura directa de aire con almacenamiento de carbono (DACCS)

Los proyectos con técnicas que no estén incluidas en la lista anterior, se deberá determinar el valor de la variable conforme los criterios internos de la compañía. Su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 5.

3.1.6 MVR

La variable de MVR (monitoreo, verificación y reporte) determina si el proyecto analizado tiene los mecanismos o metodologías para monitorear, verificar y reportar los avances y resultados del proyecto. Esta variable es de tipo booleana y su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 8.

3.1.7 Fugas

La variable de fugas representa si la reducción de las emisiones de carbono del propio proyecto no se compensa en el mercado a través de la compra de créditos de carbono. Esta variable es de tipo booleana y su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 6.

3.1.8 Permanencia

La variable de permanencia determina la durabilidad del proyecto en cuestión medido en años. Deben establecerse garantías adecuadas para tener en cuenta el riesgo de reversión de la compensación de las emisiones. Esta es una variable de tipo decimal (*float*) y su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 8.

3.1.9 Calidad del agua

La variable de calidad del agua se basa en los indicadores de:

- a) Estimación de la reducción de contaminantes.
- b) Potencial impacto positivo en el índice de calidad del agua.
- c) Mejora en transparencia y turbidez.

Los criterios de evaluación son proyecciones basadas en estudios previos, modelos predictivos y planes de gestión. Esta variable tiene rango (1 a 10), es de tipo entera y su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 2.

3.1.10 Calidad del aire

La variable de calidad del aire se basa en los indicadores de:

- a) La reducción esperada de contaminantes (PM2.5, PM10, NO_x, SO₂, CO, O₃).
- b) Mejora en el índice de calidad del aire.
- c) Disminución en la frecuencia de eventos de contaminación.
- d) Incremento de vegetación que mejora la calidad del aire.

Los criterios de evaluación son proyecciones basadas en modelos predictivos y experiencias similares en otros proyectos. Esta variable tiene rango (1 a 10), es de tipo entera y su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 2.

3.1.11 Calidad del suelo

La variable de calidad del suelo se basa en los indicadores:

- a) Aumento de materia orgánica, reducción de contaminantes (metales pesados, pesticidas).
- b) Disminución de la erosión.
- c) Compactación del suelo.
- d) Incremento en la biodiversidad del suelo.

Los criterios de evaluación son proyecciones basadas en estudios de suelos similares y modelos de gestión de suelos. Esta variable tiene rango (1 a 10), es de tipo entera y su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 2.

3.1.12 Comunidad local

La variable de comunidad local se basa en los siguientes indicadores:

- a) Empleo generado por el proyecto.
- b) Mejoras en el acceso a servicios básicos.
- c) Nivel de participación comunitaria.
- d) Percepción de la comunidad sobre el impacto del proyecto.

Este impacto incluye tanto aspectos económicos como sociales, pero no ambientales. Los criterios de evaluación son estudios de impacto social, experiencias previas y encuestas. Esta variable tiene rango (1 a 10), es de tipo entera y su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 3.

3.1.13 Biodiversidad

La variable de biodiversidad se basa en los indicadores:

- a) Aumento en el número de especies protegidas.
- b) Incremento en la diversidad de especies.
- c) Restauración o protección de hábitats.
- d) Control de especies invasoras.

Los criterios de evaluación son estudios de impacto ambiental y modelos de biodiversidad. Esta variable tiene rango (1 a 10), es de tipo entera y su valor en la escala de prioridades/importancia (1 a 9) es de 3.

La Tabla 1 resume las variables definidas y su escala de prioridad/importancia.

Variable	Descripción	Importancia
1	CO2 Compensado al año	9
2	Precio del proyecto	9
3	Certificación	9
4	Localización	6
5	Tipo de proyecto	5
6	MVR	8
7	Fugas	6
8	Permanencia	8
9	Calidad del agua	2
10	Calidad del aire	2
11	Calidad del suelo	2
12	Comunidad Local	3
13	Biodiversidad	3

Tabla 1. Resumen de variables definidas y escala de importancia

3.2 Proceso analítico jerárquico

El proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) como se ha explicado en capítulos anteriores, es una metodología de toma de decisiones multicriterio desarrollada por Thomas L. Saaty en 1980. Esta técnica es particularmente útil para problemas complejos donde se deben considerar múltiples criterios y alternativas. El AHP descompone un problema en una jerarquía de criterios, subcriterios y alternativas, facilitando así una evaluación estructurada y cuantitativa de las opciones (Saaty, 1980).

3.2.1 Definición del problema y objetivo

El primer paso en el AHP es definir claramente el problema que se intenta resolver y el objetivo que se desea alcanzar. Esto establece la base sobre la cual se estructurará la jerarquía de decisión. En el contexto de este estudio, el objetivo es seleccionar los proyectos de compensación de CO2 que mejor se alineen con los objetivos estratégicos y de sostenibilidad de la empresa.

Es esencial que esta definición sea precisa y esté alineada con los objetivos generales de la empresa. Un problema bien definido permite establecer una jerarquía clara y estructurada, lo cual facilita la posterior comparación y evaluación de las alternativas disponibles.

3.2.2 Estructuración de la jerarquía

La estructura jerárquica del AHP se compone de tres niveles principales:

Nivel 1: El objetivo general de la decisión.

Nivel 2: Los criterios que afectan la decisión.

Nivel 3: Las alternativas entre las cuales se va a elegir.

En el caso específico de la selección de proyectos de compensación de CO2, la jerarquía ha sido representada de la siguiente manera:

Objetivo: Selección óptima de proyectos de compensación de CO2.

Criterios: Los criterios son las variables definidas en el punto 3.1.

Alternativas: Diferentes proyectos de compensación de CO2 disponibles.

Esta estructuración permite descomponer el problema en partes más manejables, facilitando así una evaluación más detallada y precisa de cada componente. La claridad en la jerarquía es crucial para el éxito del AHP, ya que cada nivel debe estar claramente definido y relacionado con el objetivo general.

3.2.3 Comparación por pares

La comparación por pares es una de las características distintivas del AHP. En este paso, se realiza una comparación entre los criterios y las alternativas en cada nivel de la jerarquía. Este proceso implica evaluar la importancia relativa de un criterio frente a otro y de una alternativa frente a otra, respecto a un criterio específico.

Para llevar a cabo esta comparación, se utiliza la misma escala de importancia utilizada en las variables:

- 1: Importante.
- 3: Moderadamente importante.
- 5: Fuertemente importante.
- 7: Muy fuertemente importante.
- 9: Importancia extrema.

Los valores intermedios (2, 4, 6, 8) representan juicios intermedios entre las definiciones anteriores.

Este proceso de comparación por pares ayuda a capturar las percepciones y juicios subjetivos de los expertos o decisores, convirtiéndolos en datos cuantificables que pueden ser utilizados para el análisis posterior. En nuestro caso, esta escala de importancia mantiene los valores que se han asignado de manera conjunta con el criterio experto de Astara SA en la definición de las variables.

3.2.4 Construcción de matrices de comparación

Las comparaciones por pares se representan en matrices cuadradas, donde cada elemento de la matriz se obtiene comparando dos elementos a la vez. Cada matriz refleja las evaluaciones de importancia relativa entre los elementos comparados.

Para lograr esta comparativa, se utiliza la escala de importancia definida en la Tabla 1. Con la escala de importancia, podemos extraer la importancia relativa entre los elementos comparados, construyendo la Tabla 2, que representa la matriz de comparación.

Para la obtención de los valores de la Tabla 2, se ha dividido el valor de la escala de importancia de una variable entre el valor de la escala de importancia de la otra variable. De esta forma, para el caso de CO₂ compensado-Precio del proyecto, su valor en la escala de importancia es de 9 en ambos casos dando como resultado 1. Esto implica que su importancia relativa es la misma, o dicho de otra manera, son igual de importantes. Sin embargo, para el caso Localización- CO₂ compensado, la relación es 0,67. Esto se debe puesto que Localización tiene un valor de 6 y CO-compensado 9, lo que la división nos daría 2/3 o dicho de otra manera, 0,67.

Columna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Optimización de proyectos de compensación de CO2	CO2 Compensado	Precio del proyecto	Certificación	Localización	Tipo de proyecto	MVR	Fugas	Permanencia	Calidad del agua	Calidad del aire	Calidad del suelo	Comunidad Local	Biodiversidad
CO2 Compensado	1,00	1,00	1,00	0,67	0,56	0,78	0,67	0,89	0,22	0,22	0,22	0,33	0,33
Precio del proyecto	1,00	1,00	1,00	0,67	0,56	0,78	0,67	0,89	0,22	0,22	0,22	0,33	0,33
Certificación	1,00	1,00	1,00	0,67	0,56	0,78	0,67	0,89	0,22	0,22	0,22	0,33	0,33
Localización	1,50	1,50	1,50	1,00	0,83	1,17	1,00	1,33	0,33	0,33	0,33	0,50	0,50
Tipo de proyecto	1,80	1,80	1,80	1,20	1,00	1,40	1,20	1,60	0,40	0,40	0,40	0,60	0,60
MVR	1,29	1,29	1,29	0,86	0,71	1,00	0,86	1,14	0,29	0,29	0,29	0,43	0,43
Fugas	1,50	1,50	1,50	1,00	0,83	1,17	1,00	1,33	0,33	0,33	0,33	0,50	0,50
Permanencia	1,13	1,13	1,13	0,75	0,63	0,88	0,75	1,00	0,25	0,25	0,25	0,38	0,38
Calidad del agua	4,50	4,50	4,50	3,00	2,50	3,50	3,00	4,00	1,00	1,00	1,00	1,50	1,50
Calidad del aire	4,50	4,50	4,50	3,00	2,50	3,50	3,00	4,00	1,00	1,00	1,00	1,50	1,50
Calidad del suelo	4,50	4,50	4,50	3,00	2,50	3,50	3,00	4,00	1,00	1,00	1,00	1,50	1,50
Comunidad Local	3,00	3,00	3,00	2,00	1,67	2,33	2,00	2,67	0,67	0,67	0,67	1,00	1,00
Biodiversidad	3,00	3,00	3,00	2,00	1,67	2,33	2,00	2,67	0,67	0,67	0,67	1,00	1,00

Tabla 2. Matriz de comparación.

3.2.6 Normalización de la matriz

Para normalizar la matriz de comparación mostrada en la Tabla 2, cada valor de una columna se divide por la suma de esa columna. Este proceso se repite para cada columna de la matriz de comparación y así obtenemos la matriz normalizada (ver Tabla 3), en la que el sumatorio de los valores de cada columna es igual a 1.

Columna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Optimización de proyectos de compensación de CO2	CO2 Compensado	Precio del proyecto	Certificación	Localización	Tipo de proyecto	MVR	Fugas	Permanencia	Calidad del agua	Calidad del aire	Calidad del suelo	Comunidad Local	Biodiversidad
CO2 Compensado	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
Precio del proyecto	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
Certificación	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
Localización	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Tipo de proyecto	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061
MVR	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
Fugas	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Permanencia	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
Calidad del agua	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151
Calidad del aire	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151
Calidad del suelo	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151
Comunidad Local	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101
Biodiversidad	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101

Tabla 3. Matriz de comparación normalizada.

3.2.7 Cálculo del vector de prioridad

El vector de prioridad es un componente esencial del AHP. Este vector se obtiene a partir de las matrices de comparación por pares y representa la importancia relativa de los diferentes criterios o alternativas en el contexto de la decisión a tomar. Cada componente del vector de prioridad corresponde a un criterio o una alternativa específica y refleja su importancia relativa respecto a los otros elementos en la misma matriz de comparación.

El vector de prioridad se obtiene promediando los valores normalizados de cada fila como se muestra en la Tabla 4. Sirve para cuantificar las preferencias o juicios subjetivos de los decisores de una manera sistemática y matemática, y su valor oscila entre 0 y 1, siendo 1 la suma de todos los vectores de prioridad.

Optimización de proyectos de compensación de CO2	Vector de Prioridad
CO2 Compensado	0,034
Precio del proyecto	0,034
Certificación	0,034
Localización	0,050
Tipo de proyecto	0,061
MVR	0,043
Fugas	0,050
Permanencia	0,038
Calidad del agua	0,151
Calidad del aire	0,151
Calidad del suelo	0,151
Comunidad Local	0,101
Biodiversidad	0,101

Tabla 4. Cálculo del vector de prioridad.

3.2.8 Verificación de la consistencia

La verificación de la consistencia es un paso crucial en el AHP para asegurar que las comparaciones por pares realizadas sean coherentes y razonables. Este proceso implica evaluar si las preferencias expresadas en las matrices de comparación son consistentes, lo que es esencial para la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos. Para ello, necesitamos calcular el valor propio máximo (λ_{max}).

Cálculo del valor propio máximo (λ_{max})

Multiplicamos la matriz de comparación original por el vector de prioridad y dividimos por los respectivos valores del vector de prioridad. La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos para cada variable, en concreto, 13 en todos los casos. Esto nos adelanta que, el promedio del cálculo del valor propio máximo será 13 al igual que el número de variables.

Optimización de proyectos de compensación de CO2	Cálculo del valor propio máximo (λ_{max})
CO2 Compensado	13,000
Precio del proyecto	13,000
Certificación	13,000
Localización	13,000
Tipo de proyecto	13,000
MVR	13,000
Fugas	13,000
Permanencia	13,000
Calidad del agua	13,000
Calidad del aire	13,000
Calidad del suelo	13,000
Comunidad Local	13,000
Biodiversidad	13,000

Tabla 5. Cálculo del valor propio máximo (λ_{max}).

Para la verificación de la consistencia en el AHP, se utiliza el valor propio máximo (λ_{max}) de la matriz de comparación. Este valor ayuda a calcular el Índice de Consistencia (IC) y la Razón de Consistencia (RC), que determinan si las comparaciones realizadas son coherentes.

Dado el valor propio máximo (λ_{max}) de 13 para todas las variables, procederemos con los cálculos necesarios.

Cálculo del índice de consistencia (IC)

El índice de consistencia (IC) se calcula utilizando la fórmula:

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{n - 1} = \frac{(13 - 13)}{13 - 1} = 0$$

Cálculo de la razón de consistencia (RC)

La RC se obtiene dividiendo el IC por el Índice Aleatorio (IA). El IA depende del tamaño de la matriz (n). Para n =13, el valor típico de IA es de 1.56 (Saaty, 1980).

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0}{1.56} = 0$$

Un RC menor a 0.1 indica que las comparaciones son razonablemente consistentes. En nuestro caso, la RC es 0, lo que indica que las comparaciones realizadas son perfectamente consistentes (Saaty, 1980) (Saaty, 2008). Esto significa que las decisiones basadas en estas comparaciones son altamente fiables y no presentan inconsistencias, asegurando que los juicios subjetivos han sido evaluados de manera lógica y coherente, facilitando una selección precisa y justificable de los proyectos de compensación de CO2.

Una vez obtenida la lógica del funcionamiento de la matriz, matriz de normalizada y vector de prioridad, el algoritmo AHP-COPS replica la misma lógica para la comparativa de los proyectos, multiplicando el vector de prioridad por las prioridades locales. Las prioridades locales se calculan de igual manera que el vector de prioridad, pero a nivel de proyecto en vez de criterio. En el capítulo 5, se muestra el cálculo paso a paso para un proyecto de compensación de CO2 simulado.

3.3 Resumen de AHP-COPS

En resumen, en este capítulo se ha definido el algoritmo AHP-COPS, especificando todas las variables implicadas y mostrando los cálculos del vector de prioridad. El AHP-COPS cumple con el índice de consistencia y está listo para ser el motor de la herramienta COPS y proporcionar la clasificación de los proyectos de más óptimos a menos.

Capítulo 4. Diseño de la herramienta COPS

En este capítulo se presenta la funcionalidad e interfaz de la herramienta COPS (*Carbon Offset Portfolio Selector*) desarrollada para la empresa Astara SA. También se introduce la tecnología de desarrollo utilizada.

Esta aplicación web está diseñada para optimizar la selección de proyectos de compensación de CO₂ mediante el uso del algoritmo AHP-COPS. COPS es una solución avanzada que facilita la toma de decisiones informadas y basadas en datos, alineando cada elección con los objetivos estratégicos y los criterios de sostenibilidad de la empresa.

4.1 Tecnología utilizada

Para el desarrollo de la herramienta COPS, se ha empleado la plataforma “*Bubble.io*”, una de las herramientas más innovadoras y eficientes en el campo del desarrollo de aplicaciones web “*low-code, no-code*” (Airdev, 2024).

Bubble es una plataforma de desarrollo sin código que permite a los usuarios diseñar, desarrollar y desplegar aplicaciones web totalmente funcionales sin necesidad de escribir código tradicional. Fundada en 2012, *Bubble* ha revolucionado la manera en que las aplicaciones web son creadas, democratizando el acceso al desarrollo de software y permitiendo que cualquier persona, con menor experiencia y conocimientos técnicos en programación, pueda construir aplicaciones complejas.

Características principales de *Bubble*

1. **Interfaz de arrastrar y soltar:** *Bubble* permite a los usuarios construir aplicaciones utilizando una interfaz visual de arrastrar y soltar, facilitando la creación de interfaces de usuario intuitivas y atractivas.
2. **Base de datos integrada:** La plataforma incluye un sistema de gestión de bases de datos que permite a los usuarios crear y gestionar datos directamente dentro de la aplicación.

3. **Flujos de trabajo personalizables:** *Bubble* ofrece la capacidad de diseñar flujos de trabajo personalizados, permitiendo a los usuarios definir cómo se comporta la aplicación en respuesta a diversas acciones del usuario.
4. **Plugins y extensiones:** La plataforma soporta una amplia gama de *plugins* y extensiones que amplían la funcionalidad de las aplicaciones, desde integraciones con servicios externos hasta componentes de interfaz avanzada.
5. **Despliegue y hospedaje:** *Bubble* facilita el despliegue de aplicaciones con un solo clic, proporcionando también servicios de hospedaje y mantenimiento, lo que elimina la necesidad de infraestructura adicional.

La elección de *Bubble* para el desarrollo de la herramienta COPS se basa en varias ventajas clave que esta plataforma ofrece:

Bubble permite un desarrollo significativamente más rápido en comparación con los métodos tradicionales de codificación. La capacidad de construir aplicaciones mediante una interfaz visual reduce drásticamente el tiempo necesario para pasar del concepto a la implementación. Esto ha permitido desarrollar la herramienta COPS como producto mínimo viable (MVP, por sus siglas en inglés) en un tiempo reducido, respondiendo rápidamente a la necesidad de gestionar proyectos de compensación de CO2 de manera eficiente, y como MVP, que le aporte valor a Astara SA, constituyendo el núcleo de nuevas versiones futuras de COPS.

La plataforma no requiere conocimientos avanzados de programación, lo que ha facilitado el desarrollo de la herramienta, permitiendo centrarse en el ámbito de la sostenibilidad y el algoritmo AHP-COPS.

Bubble ofrece flexibilidad para personalizar tanto la interfaz de usuario como la lógica de la aplicación. Esto ha sido crucial para adaptar COPS a las necesidades específicas de Astara SA, permitiendo la creación de flujos de trabajo personalizados y la integración del algoritmo AHP-COPS.

La plataforma soporta la integración con numerosos servicios y API externas, lo que permite expandir la funcionalidad de COPS conforme evolucionen las necesidades de la empresa. Además, *Bubble* es escalable, permitiendo que la aplicación crezca en funcionalidad y capacidad junto con las necesidades de Astara SA.

En resumen, la elección de *Bubble* para el desarrollo de la herramienta COPS ha sido un factor clave en su éxito. La plataforma ha proporcionado una combinación de velocidad, flexibilidad, y accesibilidad que ha permitido crear una aplicación potente y funcional en un tiempo récord. *Bubble* ha facilitado la creación de una herramienta que no solo satisface las necesidades actuales de gestión de proyectos de compensación de CO₂, sino que también está preparada para evolucionar y crecer junto con la empresa y sus objetivos de sostenibilidad.

4.2 Aplicación COPS

El principal objetivo de COPS es proporcionar a Astar SA una aplicación web robusta y eficiente para optimizar la selección de proyectos de compensación de CO₂ mediante el uso del algoritmo AHP-COPS. La herramienta permite evaluar proyectos, asegurando que las decisiones tomadas maximicen los beneficios ambientales, económicos y sociales. De este modo, al utilizar COPS, Astar SA puede identificar los proyectos que ofrecen el mejor equilibrio entre precio, CO₂ compensado, calidad y sus beneficios adicionales.

4.2.1 Funcionalidades principales

COPS permite a los usuarios ingresar los valores de diversas variables críticas para cada proyecto de compensación de CO₂. Estas variables son las identificadas y explicadas en el capítulo 3, y que resumimos aquí:

1. **CO₂ Compensado (decimal)**: Toneladas de CO₂ que el proyecto es capaz de compensar.
2. **Precio del proyecto (decimal)**: Precio total asociado con la implementación del proyecto.
3. **Certificación (binaria)**: Si el proyecto cuenta con una certificación aceptada.
4. **Localización (1, 2, 3)**: Clasificación de la ubicación del proyecto (por ejemplo, local, nacional, internacional).
5. **Tipo de proyecto (%)**: Naturaleza del proyecto (basado en la naturaleza, híbrido, tecnológico).
6. **Monitoreo, verificación y reporte (MVR) (binaria)**: Si el proyecto incluye mecanismos de monitoreo, verificación y reporte.
7. **Fugas (binaria)**: Riesgo de que las reducciones de emisiones sean compensadas en otros lugares.

8. **Permanencia (decimal):** Durabilidad y estabilidad del proyecto a largo plazo.
9. **Calidad del agua (1 a 10):** Impacto del proyecto en la calidad del agua.
10. **Calidad del aire (1 a 10):** Impacto del proyecto en la calidad del aire.
11. **Calidad del suelo (1 a 10):** Impacto del proyecto en la calidad del suelo.
12. **Comunidad local (1 a 10):** Beneficios del proyecto para la comunidad local.
13. **Biodiversidad (1 a 10):** Impacto del proyecto en la biodiversidad local.

La herramienta COPS utiliza el algoritmo AHP-COPS para comparar las variables introducidas y calcular una puntuación global para cada proyecto que llamaremos *score*. Este enfoque multicriterio asegura que todas las dimensiones importantes sean consideradas en la toma de decisiones.

A su vez, COPS genera reportes detallados que muestran los proyectos mejor clasificados y justifican las decisiones con base en los datos ingresados y los cálculos realizados. Estos reportes incluyen:

1. **Resumen de evaluaciones:** Presenta un resumen de las puntuaciones de todos los proyectos evaluados.
2. **Detalle de comparaciones:** Muestra las matrices de comparación y los vectores de prioridad.
3. **Verificación de consistencia:** Incluye los valores de IC y RC, asegurando la transparencia y validez de las evaluaciones.

Al utilizar COPS, Astara SA asegura una rigurosidad a la hora de comparar proyectos ya que utiliza un enfoque sistemático y matemáticamente robusto para evaluar y comparar sus proyectos. También proporciona transparencia gracias a la documentación y justificación de las decisiones tomadas, lo que facilita la rendición de cuentas y la aceptación de los involucrados.

Todo ello se traslada en el aumento de la eficiencia en las inversiones en proyectos de compensación de CO₂, automatizando la clasificación de los proyectos y ahorrando con ello tiempo y recursos.

4.2.2 Interfaz de la herramienta

COPS está diseñada para facilitar la gestión y selección de proyectos de compensación de CO₂ en Astara SA. A continuación, se describe en detalle la

interfaz de la aplicación y sus funcionalidades. Cabe resaltar que la interfaz se ha realizado en inglés bajo petición de Astará SA.

4.2.2.1 Interfaz de inicio COPS

La interfaz de inicio de sesión es el punto de entrada a la aplicación COPS (ver Figura 7). En esta interfaz, los usuarios deben autenticarse para acceder a la plataforma. La interfaz es minimalista y eficiente, destacando el logotipo de Astará SA en la esquina superior izquierda para reafirmar la identidad de la empresa. En el centro de la interfaz, el texto "COPS" junto con la descripción "Carbon Offset Portfolio Selector", explicando claramente el propósito de la aplicación. Un botón "Log in" invita a los usuarios a iniciar sesión. En la esquina superior derecha, se encuentran iconos para ayuda, configuraciones y ajustes de la aplicación, proporcionando acceso rápido a funciones de soporte y personalización.

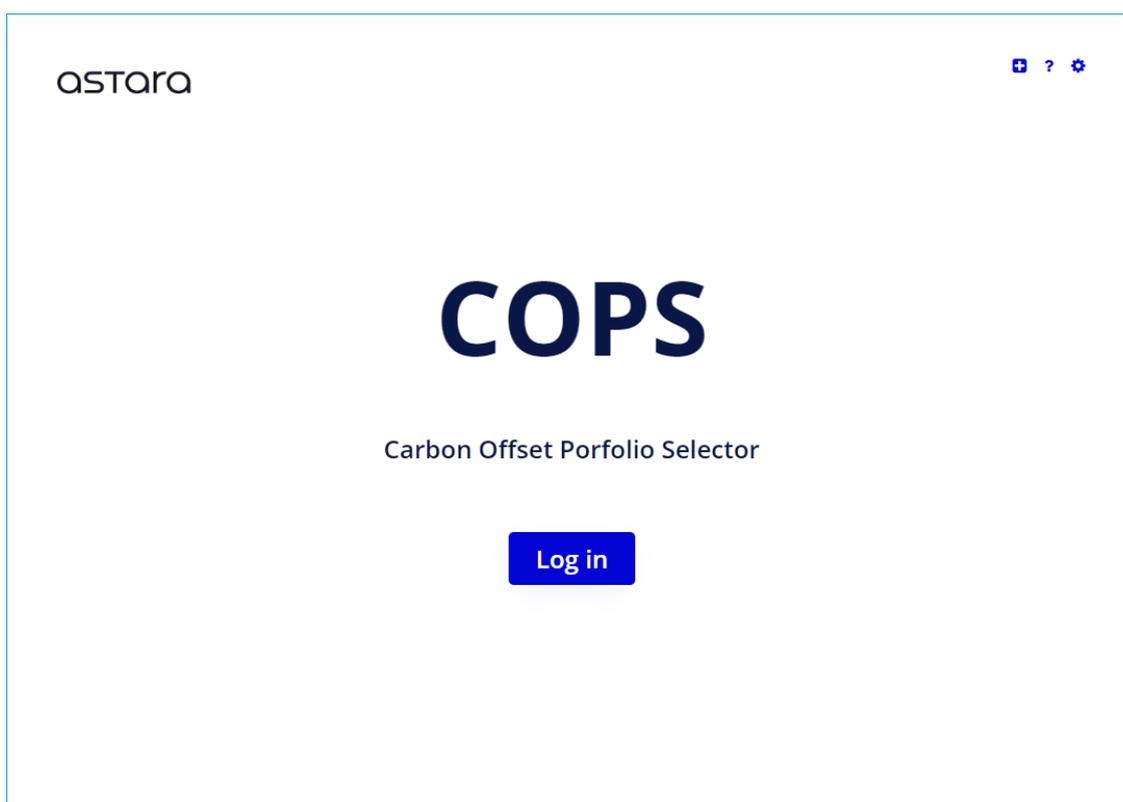


Figura 7. COPS: Interfaz de inicio (*log in*).

4.2.2.2 Interfaz principal COPS

Una vez iniciada la sesión, los usuarios son dirigidos a la interfaz principal (ver Figura 8). Esta interfaz es fundamental para la creación, visualización y administración de los diferentes portafolios y proyectos de compensación de CO2. La barra de navegación superior mantiene una estructura consistente con la interfaz de inicio, incluyendo el logotipo de Astara SA y la barra de búsqueda para facilitar la localización rápida de proyectos o portafolios específicos.

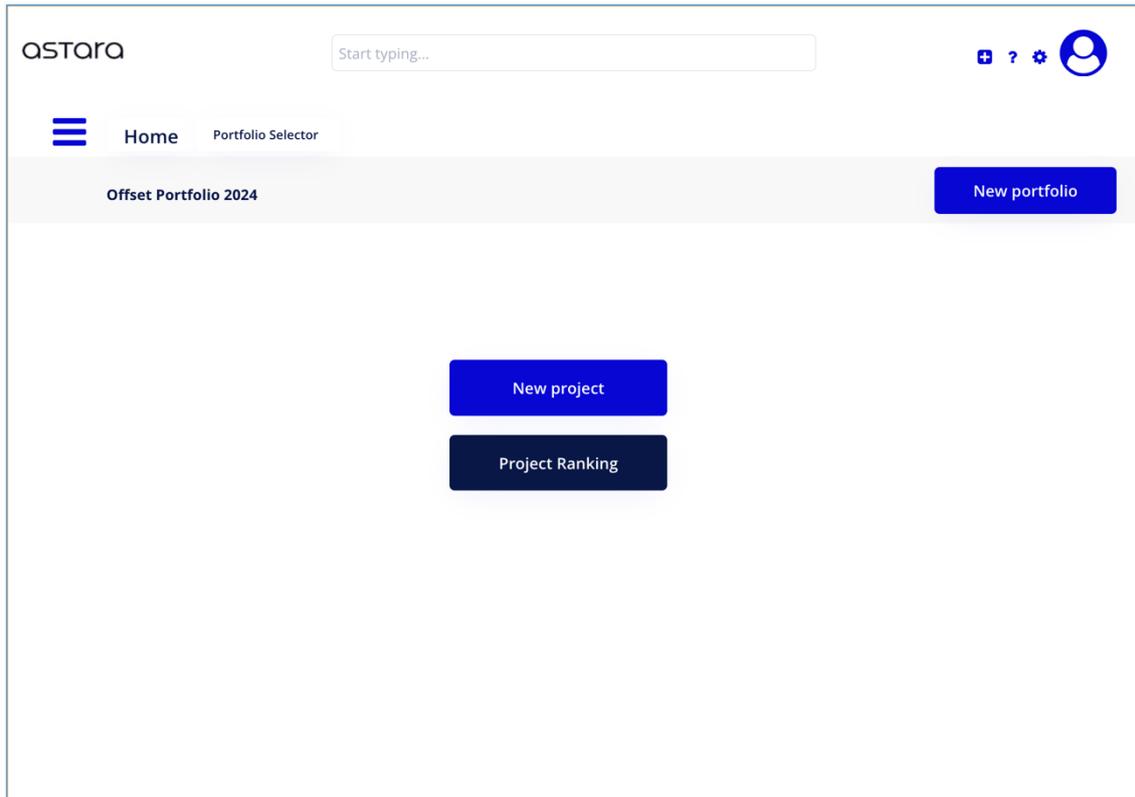


Figura 8. COPS: Interfaz principal.

El menú principal incluye opciones como "Home" y "Portfolio Selector", permitiendo a los usuarios navegar fácilmente entre la página principal y la interfaz de selección de portafolios. En esta sección, se muestra el portafolio seleccionado, en este caso "Offset Portfolio 2024", indicando el año objetivo para la compensación de CO2. Esta claridad ayuda a los usuarios a conocer en qué portafolio se encuentran trabajando.

El botón "New Portfolio" en la esquina superior derecha es para la creación de nuevos portafolios. Al hacer clic en este botón, los usuarios pueden definir un nuevo conjunto de proyectos, establecer un nombre, objetivos y criterios

específicos que serán utilizados para evaluar los proyectos dentro de este portafolio. Esta funcionalidad permite una organización clara y eficiente de los portafolios a largo plazo.

En el centro de la pantalla, se encuentran dos botones principales: "New Project" y "Project Ranking". El botón "New Project" permite a los usuarios agregar nuevos proyectos al portafolio actual. Al seleccionarlo, los usuarios son dirigidos a una interfaz de entrada de datos donde pueden ingresar detalles específicos sobre cada nuevo proyecto. Esta función es esencial para mantener actualizada la cartera de proyectos.

El botón "Project Ranking" lleva a al resumen de las calificaciones de los proyectos de ese portafolios en concreto. Con ello, se puede acceder a la tabla de calificación de los proyectos analizados y ver las comparaciones de unos y otros.

4.2.2.3 Interfaz de nuevo proyecto

Registrar un nuevo proyecto en COPS implica introducir toda su información, es decir, la información de las variables definidas en la Tabla 1. Para mayor claridad, esta introducción de datos se ha dividido en distintos bloques: información básica del proyecto, calidad del proyecto y beneficios adicionales, de forma que en cada bloque se muestra una interfaz distinta.

En la primera interfaz al añadir un nuevo proyecto, los usuarios ingresan la información básica sobre un nuevo proyecto de compensación de CO₂ (ver Figura 9).

Las variables en información básica son:

1. **Nombre del proyecto:** Permite identificar claramente cada proyecto.
2. **Cantidad de CO₂ compensado:** Especifica la cantidad de emisiones de CO₂ que el proyecto se propone compensar.
3. **Precio final del proyecto (EUR):** Detalla el coste total del proyecto, crucial para evaluar su viabilidad económica.
4. **Certificación del proyecto:** Indica si el proyecto cuenta con certificaciones reconocidas, asegurando que cumple con estándares de calidad.
5. **Zona:** Donde se lleva a cabo el proyecto: Se define si es la zona 1, 2 o 3.
6. **Tipo de proyecto:** Define la naturaleza del proyecto (por ejemplo, basado en la naturaleza, híbrido o tecnológico).

Figura 9. COPS: Interfaz de nuevo proyecto (1/3).

Los botones "Save" y "Exit" permiten a los usuarios guardar los datos ingresados o salir sin guardar, respectivamente. Una vez completada esta sección, los usuarios pueden proceder a la siguiente sección utilizando el botón "Next".

La segunda interfaz se enfoca en la calidad del proyecto, abordando aspectos críticos para asegurar la efectividad y durabilidad de este (ver Figura 10). Las variables que se incluyen son:

1. **Mecanismos de monitoreo, verificación y reporte (MVR):** Determina si el proyecto cuenta con procesos adecuados para monitorear, verificar y reportar sus resultados.
2. **Prevención de fugas (Leakage):** Evalúa si el proyecto puede evitar que las reducciones de emisiones se compensen en otros lugares, asegurando así la integridad de las reducciones de CO2.
3. **Periodo de permanencia:** El periodo de permanencia donde se mide el tiempo en años que el proyecto mantiene su capacidad de absorción de CO2, evitando la reversión de las compensaciones.

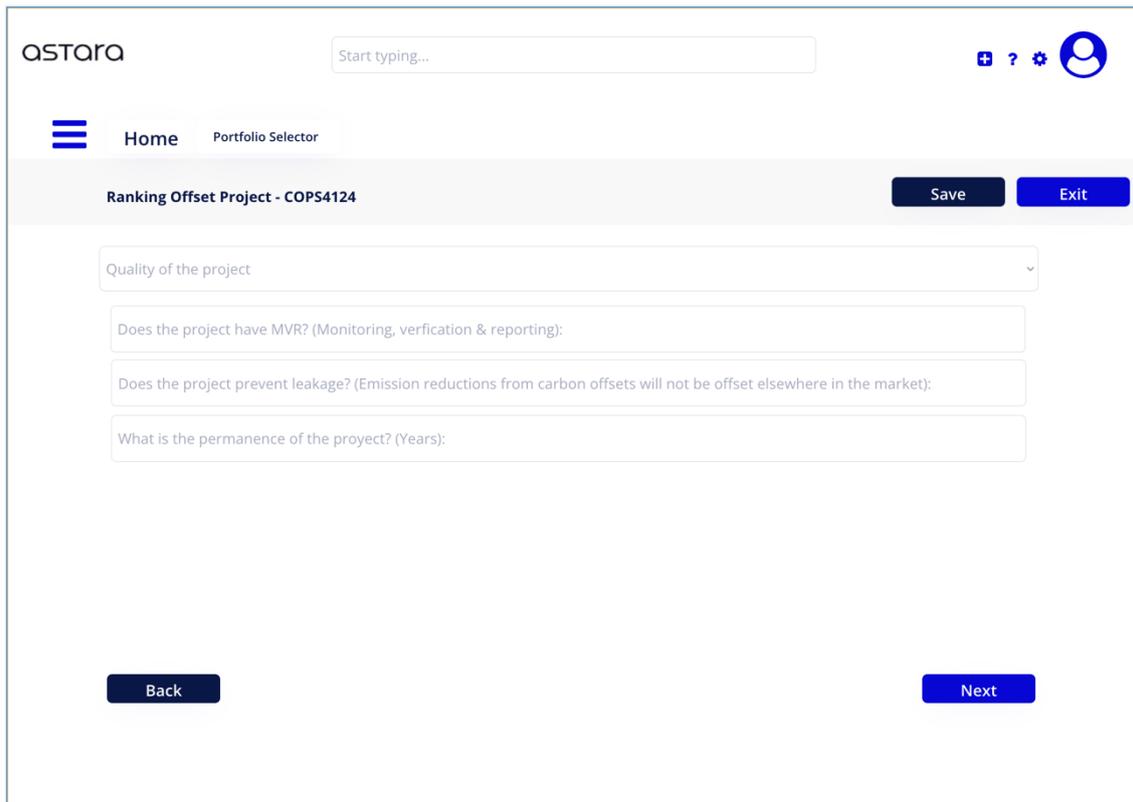


Figura 10. COPS: Interfaz de nuevo proyecto (2/3).

Estas variables son esenciales para la evaluación de la solidez del proyecto. Los usuarios pueden regresar a la sección anterior con el botón "Back" o avanzar a la siguiente sección con "Next".

La tercera interfaz se centra en los beneficios adicionales del proyecto, evaluando el impacto del proyecto más allá de la compensación de CO2 (ver Figura 11). Las variables que incluyen son:

1. **Impacto en la calidad del agua:** Mide cómo el proyecto mejora o afecta la calidad del agua en la zona.
2. **Impacto en la calidad del aire:** Evalúa la contribución del proyecto a la mejora de la calidad del aire.
3. **Impacto en la calidad del suelo:** Determina si el proyecto contribuye a mejorar la salud y fertilidad del suelo.
4. **Impacto en la comunidad local:** Considera los beneficios sociales y económicos para la comunidad local.
5. **Impacto en la biodiversidad:** Analiza cómo el proyecto ayuda a preservar o mejorar la biodiversidad local.

Figura 11. COPS: Interfaz de nuevo proyecto (3/3).

Estos beneficios adicionales permiten evaluar el impacto integral del proyecto, destacando su contribución a la sostenibilidad ambiental y social. Los usuarios pueden guardar los datos ingresados con el botón "Save", regresar a la sección anterior con "Back" o finalizar la entrada de datos y calcular el ranking con "Next".

La interfaz final en el proceso de evaluación es la clasificación del proyecto nuevo (ver Figura 12). En esta pantalla, se muestra la clasificación global del proyecto basada en los datos ingresados y el análisis realizado mediante AHP-COPS. Los usuarios pueden ver la calificación general en el campo "Final Ranking of the Project".

La sección central de la pantalla muestra un indicador visual de la calificación del proyecto, proporcionando su posición respecto al resto de proyectos. Esto facilita la comprensión rápida del rendimiento del proyecto en comparación con otros. Una vez han obtenido el *ranking*, con el botón "Finish" volvería a la interfaz de inicio.

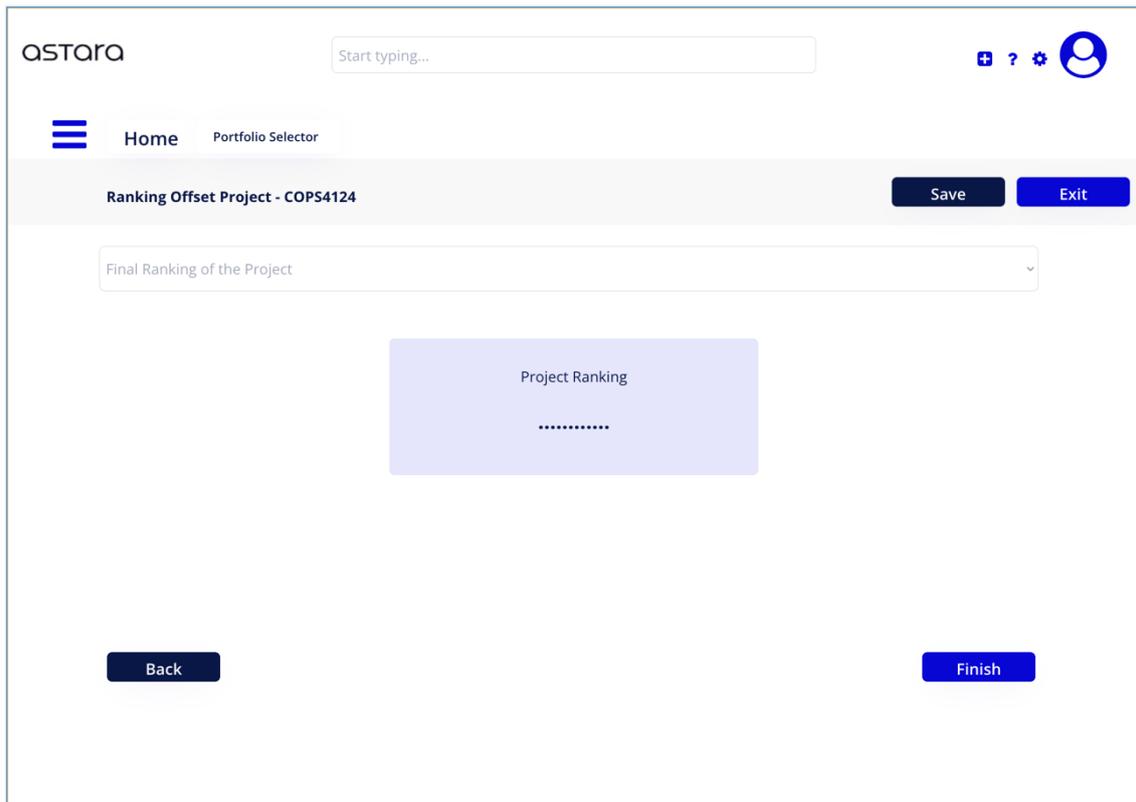


Figura 12. COPS: Interfaz del *ranking* de nuevo proyecto.

4.2.2.4 Interfaz del *ranking* de proyectos

En la interfaz del *ranking* de proyectos, los usuarios pueden ver el listado de proyectos ordenados de mayor a menor nota (*score*). Esto permite de manera rápida y fácil ver cuáles son actualmente los proyectos óptimos según el criterio de Astara SA (ver Figura 13).

La interfaz muestra la información más relevante del proyecto como la certificación, CO2 compensado, precio y precio por tonelada. A su vez, se muestra el *score* del proyecto el cual ha sido calculado con el algoritmo AHP-COPS. Este *score* es el que determina la posición en el ranking (a mayor *score*, mejor posición).

ASTARA Start typing...

Home Portfolio Selector

Offset Portfolio 2024 - Project Ranking [New Project] [Exit]

Ranking	Project ID	Name	Certification	CO2 (tonnes)	Price (€)	€/ton CO2	Score
1	4124	Soil SEQ	Verra	14863,81	468117,82	31,49	40
2	8914	BCC13	Verra	11146,65	383516,39	34,40	31
3	4235	SOL30	Gold Standard	6462,00	189465,32	29,32	29

[Back]

Figura 13. COPS: Interfaz del *ranking* de proyectos.

4.2.2.5 Resumen de COPS

La aplicación COPS está diseñada para guiar a los usuarios a través del proceso de gestión de proyectos de compensación de CO2 de manera clara, eficiente y amigable. Cada sección de la aplicación permite una entrada de datos detallada y estructurada, asegurando que todas las variables críticas sean consideradas en la evaluación y selección de proyectos. Esto facilita la toma de decisiones informadas y alineadas con los objetivos estratégicos de sostenibilidad de Astara SA.

La estructura lógica y el diseño intuitivo de la aplicación aseguran que los usuarios puedan navegar y utilizar la herramienta con facilidad, desde la creación de nuevos proyectos hasta la evaluación y calificación de estos. La aplicación no solo ayuda a identificar los proyectos más viables y beneficiosos, sino que también asegura que las decisiones sean transparentes, coherentes y basadas en datos sólidos. Con COPS, Astara SA está equipada para avanzar de manera efectiva en sus objetivos de sostenibilidad y reducción de la huella de carbono.

Capítulo 5. Escenario de uso en Astara SA

En este capítulo se valida el funcionamiento de AHP-COPS para la obtención del *ranking*, a partir del análisis de un proyecto de compensación de CO₂ simulado para el portafolio de Astara SA en la herramienta COPS.

5.1 Caso de uso: proyecto de compensación de CO₂

El proyecto a analizar titulado “Restauración tecnológica de ecosistemas urbanos” es una iniciativa innovadora que tiene como objetivo compensar las emisiones de CO₂ en un entorno urbano utilizando tecnologías avanzadas de captura y almacenamiento de carbono (CCS). Se llevará a cabo en una ciudad europea con una alta densidad de población y problemas ambientales significativos, como la contaminación del aire y la degradación del suelo. A continuación, se muestran la información del proyecto para cada una de las variables. Este proyecto se compara con otros dos proyectos simulados ya introducidos el portafolios de la herramienta COPS.

5.1.1 CO₂ Compensado

El proyecto se compromete a capturar y almacenar 14.863,81 toneladas de CO₂ durante su periodo de ejecución. Este objetivo se alcanzará mediante la implementación de tecnologías de CCS que capturan CO₂ directamente del aire y lo almacenan de manera segura.

5.1.2 Precio del proyecto

El coste total del proyecto asciende a 468.117,82 euros. Este presupuesto cubre todos los aspectos del proyecto, incluidos los costes de instalación de tecnologías CCS, actividades de remediación del suelo, sensores de monitoreo y programas de participación comunitaria.

5.1.3 Certificación

El proyecto ha obtenido la certificación de Verra aceptada por Astara SA, lo que garantiza su conformidad con estándares reconocidos de compensación de carbono y sostenibilidad.

5.1.4 Localización

Aunque el proyecto no se encuentra en las proximidades directas de las operaciones de Astara SA, ha sido seleccionado por su relevancia ambiental en una ciudad europea con altos niveles de contaminación y degradación del suelo.

5.1.5 Tipo de proyecto

Este proyecto se basa completamente en tecnologías avanzadas de captura y almacenamiento de carbono (CCS), y no emplea técnicas naturales. Esto incluye la instalación de dispositivos que capturan CO2 del aire y lo almacenan en formaciones geológicas seguras.

5.1.6 Monitoreo, verificación y reporte (MVR)

Actualmente, el proyecto cuenta con mecanismos de monitoreo, verificación y reporte.

5.1.7 Fugas

Existen fugas en el proyecto, lo que significa que parte de las reducciones de emisiones de carbono pueden no ser permanentes y podrían necesitar ajustes en la estrategia de compensación.

5.1.8 Permanencia

La durabilidad del proyecto está estimada en 7.42 años, durante los cuales se espera que las medidas de compensación de CO2 sean efectivas y sostenibles.

5.1.9 Calidad del agua

El impacto del proyecto en la calidad del agua es (5), lo que indica que las actividades del proyecto podrían tener consecuencias adversas en los recursos hídricos locales.

5.1.10 Calidad del aire

Se espera una ligera mejora en la calidad del aire (3) debido a la reducción de contaminantes a través de tecnologías CCS.

5.1.11 Calidad del suelo

El proyecto tiene un impacto positivo significativo en la calidad del suelo (8), mejorando su composición y reduciendo contaminantes.

5.1.12 Comunidad local

El proyecto tiene un impacto positivo en la comunidad local (5), creando empleos y mejorando el acceso a servicios básicos, aunque se necesita más involucramiento comunitario.

5.1.13 Biodiversidad

El impacto del proyecto en la biodiversidad es moderado (3), con algunas mejoras en la diversidad de especies y la restauración de hábitats urbanos.

El proyecto de “Restauración tecnológica de ecosistemas urbanos” representa una inversión interesante para Astara SA, aun así, la manera de conocer si este proyecto es mejor o peor que otros disponibles, es a través del *ranking* proporcionado por el algoritmo AHP-COPS.

5.2 COPS en Astara SA

Para la comprobación del funcionamiento del algoritmo AHP-COPS, se analiza el proyecto de “Restauración tecnológica de ecosistemas urbanos”. El primer paso es obtener los datos necesarios en la herramienta COPS. Para ello, seleccionamos “*New Project*” y nos lleva a la primera interfaz para introducir los datos del proyecto en cuestión.

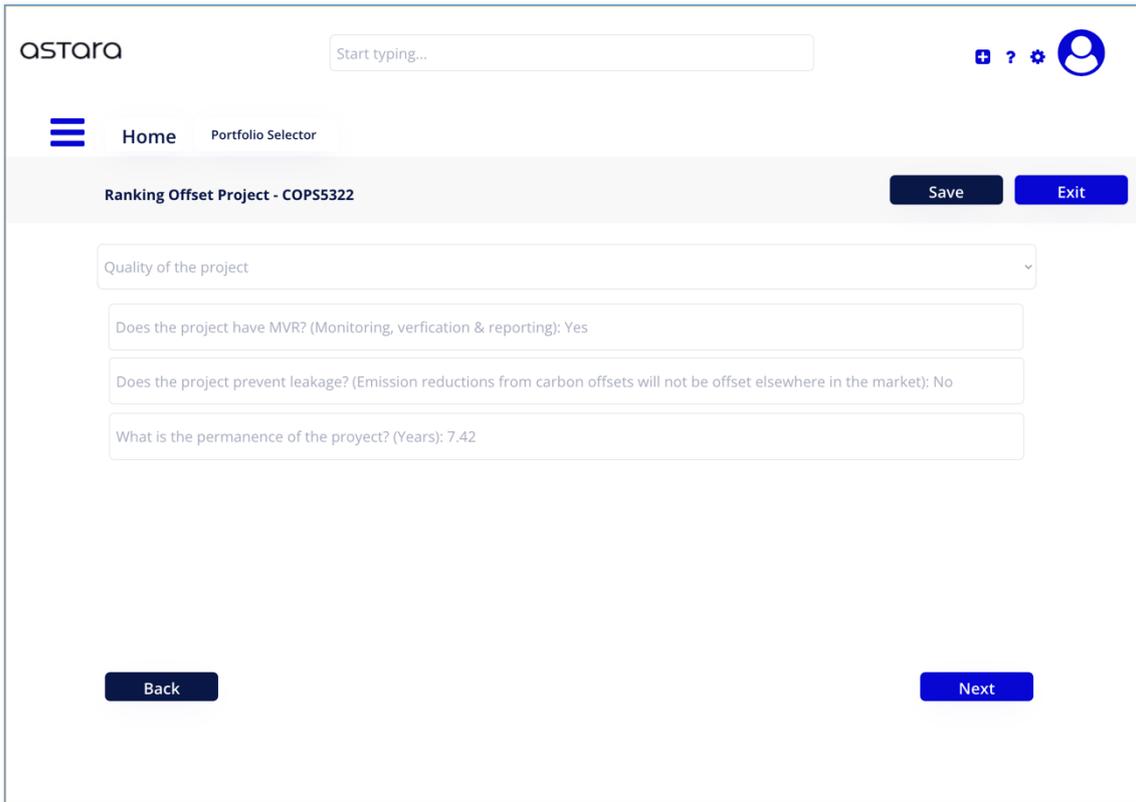
La primera interfaz de COPS nos pregunta acerca de las variables relacionadas con la información básica del proyecto (Figura 14). Aquí introducimos la información extraída del proyecto en el formato aceptado por cada uno de los campos de la interfaz.

La siguiente interfaz de COPS (Figura 15) nos pregunta sobre la calidad del proyecto. Aquí se incluye si tiene sistemas de MVR a lo que respondemos que sí. Posteriormente sabemos que no previene las fugas por lo que la respuesta dentro del sistema debe ser que no. Y finalmente sabemos que la permanencia del proyecto es de 7.42 años.

The screenshot shows the ASTARA web interface. At the top left is the logo 'ASTARA' and a search bar with the text 'Start typing...'. On the right, there are icons for a plus sign, a question mark, a gear, and a user profile. Below the header, there is a navigation menu with 'Home' and 'Portfolio Selector'. The main content area is titled 'Ranking Offset Project - COPS5322' and includes a 'Save' button and an 'Exit' button. The form contains several input fields with the following data: 'Basic Information about the Project' (dropdown), 'Name of the project: Restauración Tecnológica de Ecosistemas Urbanos', 'Quantity of CO2 compensated by the project: 14.863,81', 'Final Price of the project (EUR): 468.117,82', 'Project Certification: Verra', 'Zone where the project takes place: 2', and 'Type of project: 3'. A 'Next' button is located at the bottom right of the form.

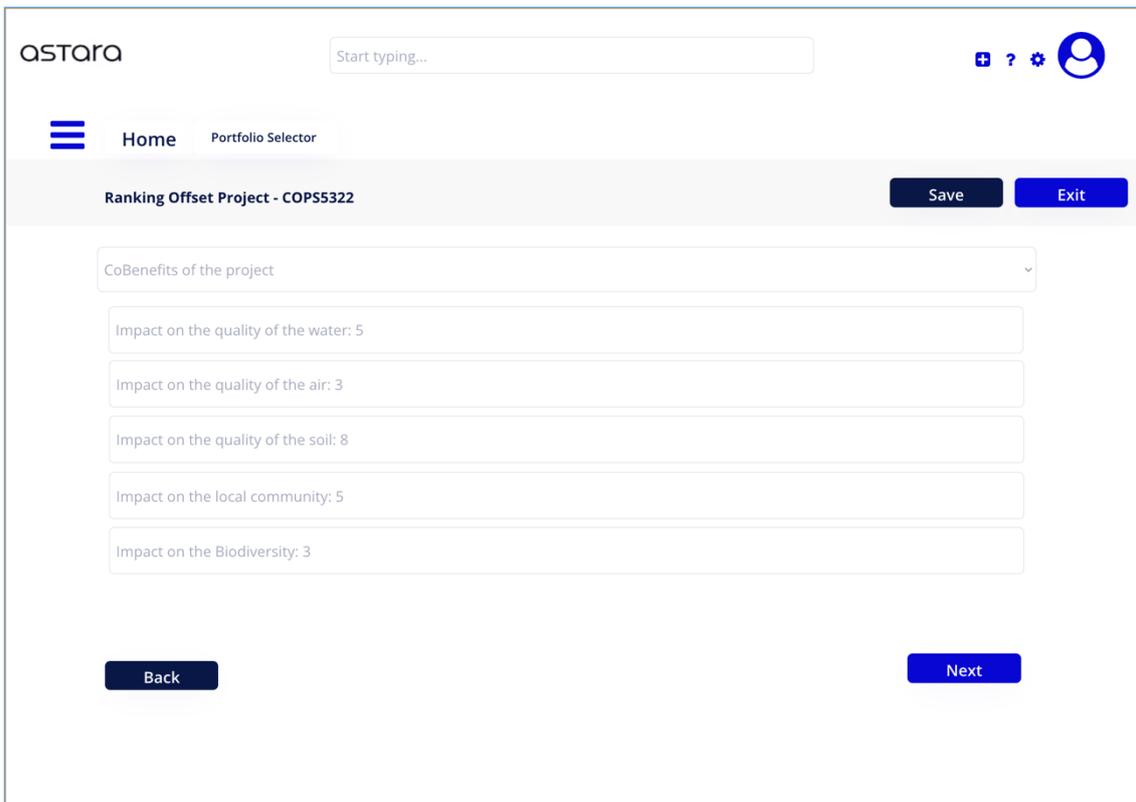
Figura 14. COPS: Información básica del proyecto de restauración.

Con toda esta información pasaríamos a la última interfaz previa al *ranking* (Figura 16). En esta última interfaz de la ingesta de datos del proyecto, introducimos los valores de cada uno de los beneficios adicionales del proyecto como son la calidad ambiental (agua, aire, terreno) y el impacto en la comunidad local y en la biodiversidad.



The screenshot shows the Astara web application interface. At the top left is the 'astara' logo. To its right is a search bar with the placeholder text 'Start typing...'. Further right are icons for a plus sign, a question mark, a gear, and a user profile. Below the search bar is a navigation menu with 'Home' and 'Portfolio Selector'. The main content area is titled 'Ranking Offset Project - COPS5322' and includes 'Save' and 'Exit' buttons. The form contains a dropdown menu labeled 'Quality of the project'. Below it are three text input fields: 'Does the project have MVR? (Monitoring, verification & reporting): Yes', 'Does the project prevent leakage? (Emission reductions from carbon offsets will not be offset elsewhere in the market): No', and 'What is the permanence of the project? (Years): 7.42'. At the bottom of the form are 'Back' and 'Next' buttons.

Figura 15. COPS: Calidad del proyecto de restauración.



The screenshot shows the Astara web application interface. At the top left is the 'astara' logo. To its right is a search bar with the placeholder text 'Start typing...'. Further right are icons for a plus sign, a question mark, a gear, and a user profile. Below the search bar is a navigation menu with 'Home' and 'Portfolio Selector'. The main content area is titled 'Ranking Offset Project - COPS5322' and includes 'Save' and 'Exit' buttons. The form contains a dropdown menu labeled 'CoBenefits of the project'. Below it are five text input fields: 'Impact on the quality of the water: 5', 'Impact on the quality of the air: 3', 'Impact on the quality of the soil: 8', 'Impact on the local community: 5', and 'Impact on the Biodiversity: 3'. At the bottom of the form are 'Back' and 'Next' buttons.

Figura 16. COPS: Beneficios adicionales del proyecto de restauración.

Con estos datos dentro de COPS, ya tenemos la información necesaria por lo que se calcula el *ranking* del proyecto (ver Figura 17).

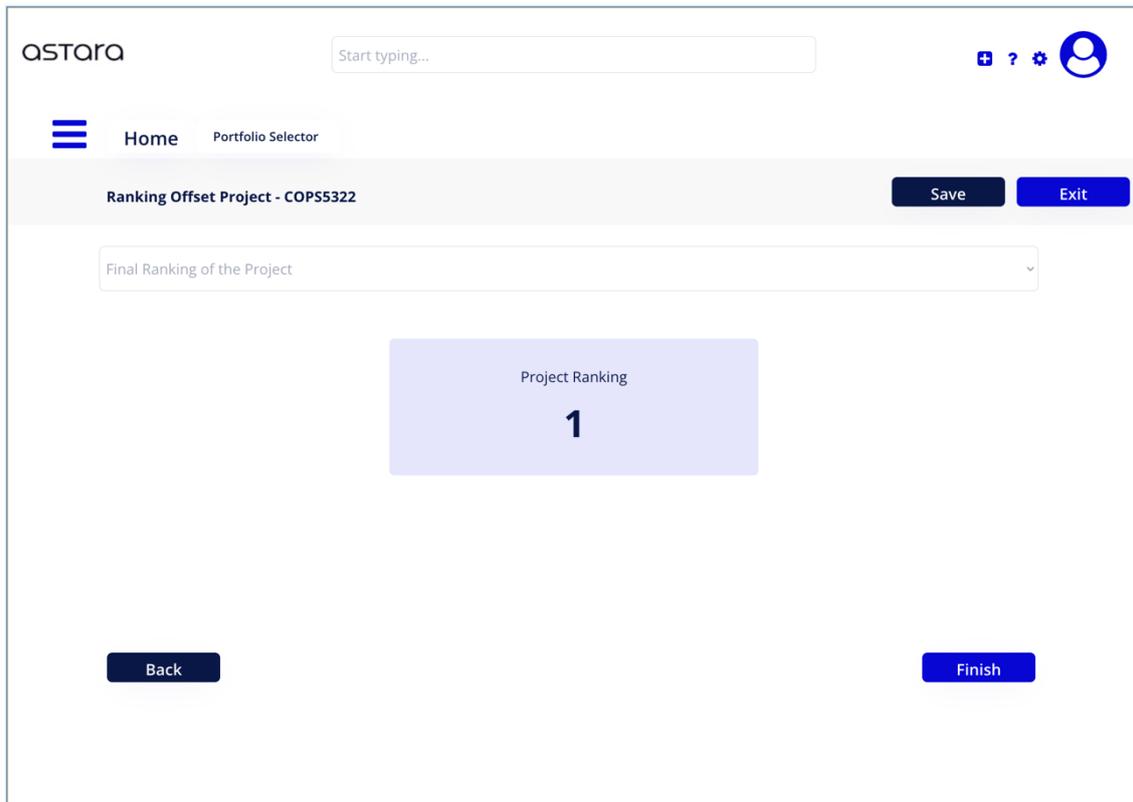


Figura 17. COPS: *Project Ranking* del proyecto de restauración.

Finalmente, el proyecto “Restauración tecnológica de ecosistemas urbanos” se ha posicionado en el primer lugar, siendo el mejor proyecto del portafolio.

5.3 AHP-COPS en Astara SA

Con los datos del nuevo proyecto “Restauración tecnológica de ecosistemas urbanos” podemos realizar una extracción de los datos que el algoritmo AHP-COPS va a utilizar para replicar de forma manual el resultado del *ranking*. Así, posteriormente podremos comparar con el *ranking* obtenido dentro de la herramienta siendo el valor más alto, el mejor proyecto.

Para ello, primero extraemos los datos necesarios para el cálculo manual de *ranking*. Actualmente hay tres proyectos dentro de COPS (COPS-4234, COPS-8914, y el que acabamos de introducir, COPS-5322), y sus datos se muestran en la Tabla 6.

Datos	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
CO2 Compensado	6462,00	11146,65	14863,81
Precio del proyecto	189465,32	383516,39	468117,82
Certificación	1,00	1,00	1,00
Localización	1,00	3,00	2,00
Tipo de proyecto	1,00	2,00	3,00
MVR	1,00	0,00	1,00
Fugas	1,00	1,00	1,00
Permanencia	9,46	16,40	7,42
Calidad del agua	9,00	4,00	5,00
Calidad del aire	2,00	4,00	3,00
Calidad del suelo	1,00	7,00	8,00
Comunidad Local	8,00	1,00	5,00
Biodiversidad	6,00	4,00	3,00

Tabla 6. Datos introducidos en COPS.

Con los datos de los proyectos, el algoritmo AHP-COPS realiza la matriz de comparación de los proyectos entre sí, respecto a cada uno de los criterios. La Tabla 7 muestra dicha matriz de comparación para el criterio de CO2 compensado. Los cálculos completos del resto de criterios se muestran en el Anexo A.

CO2 Compensado	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	0,580	0,435
COPS-8914	1,725	1,000	0,819
COPS-5322	2,300	1,221	1,000

Tabla 7. Matriz de comparación CO2 compensado.

Con la matriz de comparación, el algoritmo obtiene la matriz normalizada. Con ello, se calculan las prioridades locales de cada proyecto respecto a cada criterio, obteniendo un total de 39 prioridades locales, 13 por cada proyecto. La Tabla 8 muestra dicha matriz de comparación normalizada para el criterio de CO2 compensado. La matriz normalizada calculada junto a las prioridades locales del resto de criterios se muestra en el Anexo B.

CO2 Compensado	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,199	0,207	0,193	0,200
COPS-8914	0,343	0,357	0,363	0,355
COPS-5322	0,458	0,436	0,444	0,446

Tabla 8. Matriz normalizada y prioridades locales CO2 compensado.

Para obtener el *ranking*, el algoritmo AHP-COPS, dado un proyecto y un criterio, realiza la multiplicación de su prioridad local (proyecto) por su prioridad global (criterio). De forma que se obtiene la Tabla 9.

Cálculo <i>ranking</i>	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
CO2 Compensado	0,01	0,01	0,02
Precio del proyecto	0,01	0,01	0,02
Certificación	0,01	0,01	0,01
Localización	0,01	0,03	0,02
Tipo de proyecto	0,01	0,02	0,03
MVR	0,02	0,00	0,02
Fugas	0,02	0,02	0,02
Permanencia	0,01	0,02	0,01
Calidad del agua	0,08	0,03	0,04
Calidad del aire	0,03	0,07	0,05
Calidad del suelo	0,01	0,07	0,08
Comunidad Local	0,06	0,01	0,04
Biodiversidad	0,05	0,03	0,02

Tabla 9. Cálculo del *ranking*.

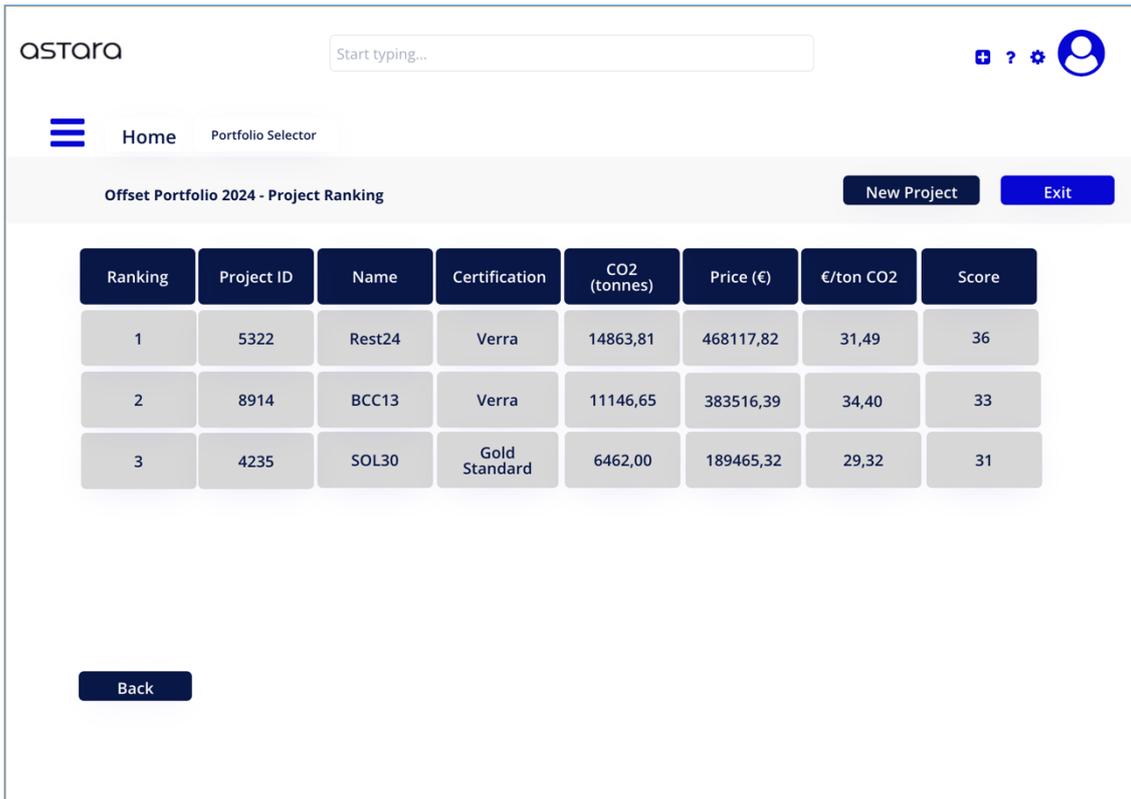
La suma del valor de cada criterio de cada proyecto es lo que se denomina en la herramienta como *score* como muestra la Tabla 10 y que determina el *ranking*. Con este resultado, el algoritmo AHP-COPS ha calculado que el proyecto con el ID COPS-5322 que pertenece al título “Restauración Tecnología de Ecosistemas Urbanos”, es el mejor proyecto de todos los disponibles en el portafolios, seguido de COPS-8914 y COPS-4235. Este *score* se volverá a recalcular conforme se van añadiendo nuevos proyectos.

COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
0,31	0,33	0,36

Tabla 10. Resultado del *score*.

5.4 Resultados de Astara SA

Para comprobar el funcionamiento de COPS, y sobre todo del algoritmo AHP-COPS, comparamos los resultados obtenidos por el cálculo manual del *ranking* con el obtenido en la herramienta.



The screenshot shows the Astara web interface. At the top, there is a search bar with the text 'Start typing...'. Below it, a navigation menu includes 'Home' and 'Portfolio Selector'. The main content area is titled 'Offset Portfolio 2024 - Project Ranking' and contains a table with the following data:

Ranking	Project ID	Name	Certification	CO2 (tonnes)	Price (€)	€/ton CO2	Score
1	5322	Rest24	Verra	14863,81	468117,82	31,49	36
2	8914	BCC13	Verra	11146,65	383516,39	34,40	33
3	4235	SOL30	Gold Standard	6462,00	189465,32	29,32	31

Buttons for 'New Project' and 'Exit' are visible in the top right, and a 'Back' button is at the bottom left.

Figura 18. Resultados del *ranking* con AHP-COPS

Como podemos comprobar en la Figura 18 y en la Tabla 10, que replicamos a continuación para mayor claridad, los resultados tanto a nivel de *score* como a nivel de *ranking* coinciden perfectamente con los resultados obtenidos por el cálculo manual.

COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
0,31	0,33	0,36

Tabla 11. Resultado del *score* (comparativa).

Con esto podemos concluir que la herramienta COPS y sobre todo el algoritmo AHP-COPS funcionan correctamente. La herramienta COPS replica cada cálculo realizándolo igual que la definición del algoritmo. Se concluye pues el desarrollo de COPS y AHP-COPS y se procede a las conclusiones

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro

En este capítulo se presentan las conclusiones del proyecto realizado para optimizar la selección de proyectos de compensación de CO₂ en la compañía Astara SA. Además, se plantean posibles líneas de trabajos futuros para extender el presente TFG.

6.1 Conclusiones

Este TFG se ha desarrollado en el ámbito de la mitigación del cambio climático. En concreto, en la compensación de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) producidas por las empresas, las cuales no pueden ser evitadas o reducidas debido a la naturaleza de sus operaciones. Estas empresas invierten en proyectos de compensación de CO₂ para lograr ser neutros antes del 2030.

Como principales aportaciones de este TFG realizado en colaboración con Astara SA destacamos el algoritmo AHP-COPS (*Analytic Hierarchy Process - Carbon Offset Portfolio Selector*) y la herramienta COPS (*Carbon Offset Portfolio Selector*).

El algoritmo AHP-COPS se ha desarrollado en base al proceso analítico jerárquico. AHP-COPS genera un *ranking* de los proyectos de compensación de CO₂ en base a las 13 variables definidas de manera conjunta con Astara SA (CO₂ compensado, precio del proyecto, certificación, localización, tipo de proyecto, MVR, fugas, permanencia, calidad del agua, calidad del aire, calidad del suelo, comunidad local y biodiversidad). Se recogen los valores de todas estas variables y a través de las prioridades locales calculadas, AHP-COPS genera el *score* del proyecto en cuestión (a mayor *score*, mejor *ranking*).

La herramienta COPS se ha desarrollado como una aplicación web donde Astara SA introduce los datos del proyecto de compensación a analizar y el algoritmo AHP-COPS genera el *ranking*. Una vez se han introducido varios proyectos, en la interfaz de COPS podemos ver de una forma intuitiva un *ranking* comparativo de los mismos, lo que facilita a Astara SA la selección de los proyectos óptimos de una manera objetiva, transparente y basada en el mismo método.

Una de las principales limitaciones del TFG ha sido no incluir métodos metaheurísticos, como algoritmos genéticos o sistemas multiagente, en el desarrollo del algoritmo AHP-COPS. Esta exclusión limita la comparación de su eficiencia y efectividad con estos métodos matemáticos.

6.2 Trabajo futuro

Los trabajos futuros de este TFG se pueden agrupar en tres líneas de actuación diferentes:

- Estudio y aplicación de métodos metaheurísticos (Inteligencia Artificial) en el algoritmo AHP-COPS como pueden ser:
 - Algoritmos evolutivos (genéticos).
 - Recocido o templado simulado (*simulated annealing*).
 - Búsquedas tabú, aleatoria, avariciosa.
 - Sistemas multiagente (colonias de hormigas).

- Mejora de la aplicación COPS.
 - Automatización de la ingesta de datos de los proyectos de compensación de CO2.
 - Generación de informes personalizados.
 - Implementación de nuevas funcionalidades.
 - Conexión con los sistemas ERP de Astar SA.

- Adaptación de los sistemas AHP-COPS y COPS a otras compañías.

Referencias

- Ahuja, R. K. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall.
- Airdev. (8 de February de 2024). *What is Bubble.io*.
<https://www.airdev.co/post/what-is-bubble-beginners-guide-building-bubble-app>
- Astara. (2023). *Bringing Astara to the future on ESG*.
- Baccini, A. (2017). *Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss*. *Science*, 358(6360), 230-234.
- Bazaraa, M. S. (2013). *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. Wiley.
- BBVA. (15 de Junio de 2024). Obtenido de BBVA:
<https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-los-creditos-de-carbono-hacia-un-mercado-global-de-emisiones/>
- Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press.
- Birge, J. R. (2011). *Introduction to Stochastic Programming*. Springer.
- CarbonNeutral. (2024). *The CarbonNeutral Protocol*. Obtenido de Step 4: Reduce:
<https://www.carbonneutral.com/the-carbonneutral-protocol/5-steps-to-achieving-carbonneutral-certification/step-4-reduce>
- Climate Trade. (21 de Junio de 2023). Todo lo que necesitas saber sobre los créditos de carbono. Obtenido de Impacto Climático:
<https://climatetrade.com/es/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-los-creditos-de-carbono/>
- Dantzig, G. B. (1963). *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press.
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons.
- Fletcher, R. (1987). *Practical Methods of Optimization*. John Wiley & Sons.
- Fuss, S. (2014). *Betting on negative emissions*. *Nature Climate Change*, 4(10), 850-853.
- Griscom, B. W. (2017). *Natural climate solutions*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645-11650.
- Hepburn, C. (2019). *The technological and economic prospects for CO2 utilization and removal*. *Nature*, 575(7781), 87-97.
- Hillier, F. S. (2001). *Introduction to Operations Research*. McGraw-Hill.

- Hobbs, P. R. (2008). *The role of conservation agriculture in sustainable agriculture*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 363(1491), 543-555.
- IEA. (2020). *Energy Technology Perspectives 2020*. BECCS.
- IPCC. (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*.
- Keeney, R. L. (1993). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*. Cambridge University Press.
- Lal, R. (2004). *Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security*. Science, 304(5677), 1623-1627.
- Lal, R. (2016). *Beyond COP21: potential and challenges of the "4 per Thousand" initiative*. Journal of Soil and Water Conservation, 71(1), 20A-25A.
- Martin, J. H. (1990). *Glacial-interglacial CO2 change: The iron hypothesis*. Paleoceanography, 5(1), 1-13.
- Miteco. (2024). Información general sobre el Registro de huella, compensación y proyectos de absorción de CO2. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/registro-huella/que_es_registro.html
- N.A.S.E.M. (2019). *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. Chapter 5: Direct Air Capture. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.
- Nemhauser, G. L. (1988). *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley-Interscience.
- ONU. (15 de Junio de 2024). Obtenido de Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (2008). *Decision making with the analytic hierarchy process*. International Journal of Services Sciences, 1(1), 83-98.
- Smith, P. (2016). *Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions*. Nature Climate Change, 6(1), 42-50.
- U4Impact. (2024). La plataforma que conecta empresas y universitarios a través de los trabajos final de grado y máster. Obtenido de <https://www.u4impact.org/>
- UNFCCC. (2024). *What is the CDM*. Obtenido de CDM: Clean Development Mechanism: <https://cdm.unfccc.int/about/index.html>

Anexos

Anexo A. AHP-COPS Matriz de comparación

Este anexo incluye todas las matrices de comparación del proyecto “Restauración Tecnología de Ecosistemas Urbanos”.

CO2 Compensado	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	0,580	0,435
COPS-8914	1,725	1,000	0,819
COPS-5322	2,300	1,221	1,000

Precio del proyecto	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	0,494	0,405
COPS-8914	2,024	1,000	0,819
COPS-5322	2,471	1,221	1,000

Certificación	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	1,000	1,000
COPS-8914	1,000	1,000	1,000
COPS-5322	1,000	1,000	1,000

Localización	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	0,333	0,500
COPS-8914	3,000	1,000	1,500
COPS-5322	2,000	0,667	1,000

Tipo de proyecto	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	0,500	0,333
COPS-8914	2,000	1,000	0,667
COPS-5322	3,000	1,500	1,000

MVR	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	1,000	1,000
COPS-8914	0,000	1,000	0,000
COPS-5322	1,000	1,000	1,000

Fugas	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	1,000	1,000
COPS-8914	1,000	1,000	1,000
COPS-5322	1,000	1,000	1,000

Permanencia	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	0,577	1,275
COPS-8914	1,734	1,000	2,210
COPS-5322	0,784	0,452	1,000

Calidad del agua	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	2,250	1,800
COPS-8914	0,444	1,000	0,800
COPS-5322	0,556	1,250	1,000

Calidad del aire	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	0,500	0,667
COPS-8914	2,000	1,000	1,333
COPS-5322	1,500	0,750	1,000

Calidad del suelo	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	0,143	0,125
COPS-8914	7,000	1,000	0,875
COPS-5322	8,000	1,143	1,000

Comunidad Local	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	8,000	1,600
COPS-8914	0,125	1,000	0,200
COPS-5322	0,625	5,000	1,000

Biodiversidad	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322
COPS-4235	1,000	1,500	2,000
COPS-8914	0,667	1,000	1,333
COPS-5322	0,500	0,750	1,000

Anexo B. AHP-COPS Matriz de comparación normalizada y prioridades locales

Este anexo incluye todas las matrices de comparación normalizadas y el valor de las prioridades locales del proyecto “Restauración Tecnología de Ecosistemas Urbanos”.

CO2 Compensado	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,199	0,207	0,193	0,200
COPS-8914	0,343	0,357	0,363	0,355
COPS-5322	0,458	0,436	0,444	0,446

Precio del proyecto	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,182	0,182	0,182	0,182
COPS-8914	0,368	0,368	0,368	0,368
COPS-5322	0,450	0,450	0,450	0,450

Certificación	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,333	0,333	0,333	0,333
COPS-8914	0,333	0,333	0,333	0,333
COPS-5322	0,333	0,333	0,333	0,333

Localización	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,167	0,167	0,167	0,167
COPS-8914	0,500	0,500	0,500	0,500
COPS-5322	0,333	0,333	0,333	0,333

Tipo de proyecto	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,167	0,167	0,167	0,167
COPS-8914	0,333	0,333	0,333	0,333
COPS-5322	0,500	0,500	0,500	0,500

MVR	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,500	0,333	0,500	0,444
COPS-8914	0,000	0,333	0,000	0,111
COPS-5322	0,500	0,333	0,500	0,444

Fugas	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,333	0,333	0,333	0,333
COPS-8914	0,333	0,333	0,333	0,333
COPS-5322	0,333	0,333	0,333	0,333

Permanencia	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,284	0,284	0,284	0,284
COPS-8914	0,493	0,493	0,493	0,493
COPS-5322	0,223	0,223	0,223	0,223

Calidad del agua	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,500	0,500	0,500	0,500
COPS-8914	0,222	0,222	0,222	0,222
COPS-5322	0,278	0,278	0,278	0,278

Calidad del aire	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,222	0,222	0,222	0,222
COPS-8914	0,444	0,444	0,444	0,444
COPS-5322	0,333	0,333	0,333	0,333

Calidad del suelo	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,063	0,063	0,063	0,063
COPS-8914	0,438	0,438	0,438	0,438
COPS-5322	0,500	0,500	0,500	0,500

Comunidad Local	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,571	0,571	0,571	0,571
COPS-8914	0,071	0,071	0,071	0,071
COPS-5322	0,357	0,357	0,357	0,357

Biodiversidad	COPS-4235	COPS-8914	COPS-5322	Prioridades Locales
COPS-4235	0,462	0,462	0,462	0,462
COPS-8914	0,308	0,308	0,308	0,308
COPS-5322	0,231	0,231	0,231	0,231

